

# L'ACV dans le domaine de la construction : le cas du matériau béton

A. Feraille <sup>1</sup>, T. Desbois <sup>2</sup>, M. Saadé <sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Navier, Ecole des Ponts ParisTech, 6-8 av Blaise Pascal, 77455 Champs sur Marne

<sup>2</sup>Cerema, Equipe-projet DIMA, Direction Ouest, 5 rue Jules Vallès, F-22000, Saint-Brieuc, France

**RESUME** Les questions environnementales sont de plus en plus présentes dans notre quotidien, qu'il s'agisse d'accessibilité aux ressources ou des différentes formes de pollution causées par les activités humaines. En août 2021, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a une nouvelle fois alerté sur l'urgence climatique et l'importance de la réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre (GES) en vue de maintenir une élévation de température inférieure à 1,5°C. Le secteur de la construction doit s'adapter pour répondre aux exigences réglementaires, et au-delà respecter une trajectoire vertueuse en matière de limitation du changement climatique. Après une présentation du contexte environnemental du secteur de la construction et des enjeux associés, la méthode d'Analyse du Cycle de Vie permettant l'évaluation d'impacts environnementaux est explicitée. Quelques pistes de réflexion sur la réduction des impacts des bétons sont explorées, ce de manière non exhaustive. La neutralité carbone envisagée par l'industrie cimentière en 2050 ne pourra être obtenue que par la multiplication des actions de réduction et de captage des émissions de GES.

**Mots-clefs** ACV, Changement climatique, bétons

## I. INTRODUCTION

Les questions environnementales sont de plus en plus présentes dans notre quotidien, qu'il s'agisse d'accessibilité aux ressources naturelles ou des différentes formes de pollution toujours plus nombreuses et diversifiées, causées par les activités anthropiques. L'urgence climatique impose la réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre (GES). En août 2021, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a une nouvelle fois alerté sur l'importance d'une réduction rapide de ces émissions dans le but de maintenir une élévation de température inférieure à 1,5°C ce qui semble dorénavant très difficile à contenir. Le secteur de la construction n'échappe pas à cette injonction, étant responsable de 35% de l'énergie finale consommée et de presque 40% des émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)<sup>1</sup>.

Dans un premier temps nous présenterons le contexte du secteur de la construction avec un focus sur le béton, puis après une rapide présentation de la méthode ACV nous évoquerons quelques

<sup>1</sup> <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-2018>

pistes permettant de réduire l'impact environnemental des bétons, et plus particulièrement son empreinte carbone.

## II. CONTEXTE

6 milliards de m<sup>3</sup> de béton sont coulés par an dans le monde, soit environ 1m<sup>3</sup> par habitant. Ceci en fait le matériau de construction le plus utilisé à l'échelle planétaire<sup>2</sup>. En tenant compte de l'accroissement de la population actuelle, le besoin en nouvelles constructions a été estimé autour de 230 milliards de m<sup>2</sup> (Munyon & al, 2018). L'utilisation du matériau béton n'est donc pas prêt de diminuer.

Le béton est constitué de ciment, sable, gravier et eau. L'industrie cimentière est énergivore (la fabrication de ciment requiert une température de 1450°C) et son processus de fabrication induit une décarbonatation des minerais, par conséquent des émissions directes de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Elle est responsable de 5 à 8% des émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale. En moyenne, la fabrication en France d'une tonne de ciment génère 600 kg de CO<sub>2</sub>, équivalent<sup>3</sup> à comparer à la moyenne mondiale qui est de l'ordre de 1000 kg<sup>4</sup>. Ce type d'information peut être obtenu sur le site infociment<sup>5</sup>, où les cimentiers français mettent à disposition les déclarations environnementales de produits de leurs différents types de ciment. Ainsi si l'on s'intéresse à l'impact sur le changement climatique d'un béton contenant 280 kg de ciment par m<sup>3</sup>, on obtient en moyenne 285 kg de CO<sub>2</sub> équivalent émis par m<sup>3</sup> de béton. Compte tenu de la consommation mondiale annuelle de béton (les 6 milliards de m<sup>3</sup> mentionnés précédemment) les émissions de CO<sub>2</sub> équivalent représentent autour de 2Gt. En comparaison avec les émissions totales annuelles (43,1 Gt CO<sub>2</sub> <sup>6</sup>) la part du béton est donc très importante !

Si le ciment n'est a priori pas un constituant « écologique » du béton, ses autres constituants méritent également qu'on s'y attarde. Le sable est en effet la 2<sup>ème</sup> ressource naturelle la plus consommée au monde après l'eau. Selon les estimations à disposition, on en extrait 15 milliards de tonnes par an (UNEP 2019). Denis Delestrac dans son documentaire intitulé « Le sable enquête sur une disparition », sur Arte en 2013, sonne l'alerte sur un matériau qui n'était initialement pas classé comme ressource épuisable. Il met l'accent sur le fait que, après avoir utilisé du sable issu de carrières puis de rivières, on extrait massivement du sable des fonds marins ce qui n'est pas sans effets sur les écosystèmes ; 11 milliards de tonnes de sable marin auraient ainsi été extraites des océans en 2010<sup>7</sup>.

L'utilisation de l'eau n'est pas non plus neutre d'un point de vue environnemental. La ressource hydrique fait l'objet d'une des limites planétaires définies par Rockström et al. 2009. Ces limites sont des seuils définis pour un certain nombre de processus et systèmes régulant la stabilité et la résilience du système terrestre. Le principe est qu'il est nécessaire d'être en dessous des seuils

---

<sup>2</sup> <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1374-.html>

<sup>3</sup> Le CO<sub>2</sub> équivalent est l'unité de référence pour quantifier l'impact sur le changement climatique. Différents GES peuvent être émis, leur contribution à l'impact changement climatique est évaluée au travers de leur Potentiel de Réchauffement Climatique permettant leur évaluation sur la base d'une même unité.

<sup>4</sup> <https://www.infociments.fr/enjeux-societe/la-fabrication-du-ciment-source-maitrisee-de-co2>

<sup>5</sup> <https://www.infociments.fr/ciments/ciments-declaration-environnementale-inventaire-analyse-du-cycle-de-vie>

<sup>6</sup> <https://www.lemonde.fr/blog/huet/2019/12/04/368-gigatonnes-de-co2-emis-en-2019/>

<sup>7</sup> <https://sciencepost.fr/le-beton-ce-desastre-ecologique/>

pour que l'humanité puisse se développer dans un écosystème « sûr ». Selon Rockström et al, plusieurs limites ont déjà été dépassées (changement climatique, érosion de la biodiversité, cycle de l'azote).

Pour l'instant le seuil planétaire initialement fixé à la consommation d'eau n'est pas dépassé. Sur les 15'000 km<sup>3</sup> d'eau douce accessibles globalement, une limite de 4000 km<sup>3</sup> est considérée acceptable pour les activités humaines, compte tenu des besoins des écosystèmes etc. Comparée aux 2600 km<sup>3</sup> d'eau consommés, la situation n'est a priori pas aussi dramatique que pour d'autres processus planétaires. Ce seuil global ne doit cependant pas faire oublier que la ressource en eau est inégalement répartie, avec des situations d'équilibre entre demandes et disponibilités en eau qui varient très fortement d'un territoire à un autre (Zipper et al 2020).

En résumé la consommation des constituants du béton a des effets multiples sur l'environnement et pas uniquement sur le changement climatique ; d'où l'importance d'évaluer ces effets par une méthode multicritère.

Nous venons de présenter le contexte environnemental de la production du matériau béton dans le secteur de la construction. Il est bien évident que les autres phases du cycle de vie d'un bâtiment ou d'un ouvrage impactent notre environnement. On pense bien sûr au transport, avec de grandes quantités de matériaux déplacés sur de plus ou moins longues distances et générant outre des émissions de GES des nuisances diverses en terme sociétal (bruit, accidentologie, ...).

La phase de fin de vie est également à considérer avec attention. Le secteur de la construction est en effet un important consommateur de matériaux mais également un important producteur de déchets. Ainsi en 2014 ce secteur a produit en France 227,5 millions de tonnes de déchets dont 80% inertes<sup>8</sup>. Ces déchets inertes pourraient être réutilisés. Cela a été par exemple l'objet du projet national RECYBETON<sup>9</sup>. L'évaluation par une méthode multi-étapes présente ainsi tout son intérêt.

### III. LA METHODE D'ANALYSE DU CYCLE DE VIE

#### A. Historique

L'ACV permet de faire le lien entre des systèmes techniques et les dommages quantifiés qu'ils peuvent occasionner sur l'environnement. Son objectif est de fournir des éléments permettant, sur une base environnementale, de prioriser entre plusieurs solutions techniquement faisables et économiquement acceptables<sup>10</sup>. L'ACV constitue le socle d'une grande variété de méthodes plus connues du grand public et généralement limitées à un petit nombre de problématiques environnementales ou à une partie du cycle de vie (bilan ou empreinte carbone, étiquetage énergétique, etc.) et ce, depuis plus de 50 ans (Fig. 1).

---

<sup>8</sup> enquête « Déchets et déblais produits par l'activité de construction en 2014 », SOeS

<sup>9</sup> <https://www.pnrecybeton.fr/>

<sup>10</sup> Cette partie a été publiée dans la revue transitions de l'école des PontsParisTech intitulée Finances vertes « L'ACV une méthode fonctionnelle, multicritère et comparative d'évaluation des impacts environnementaux, L Brochard, A Feraille, M Saadé » <https://www.ecoledesponts.fr/publications-documentation?tab=transitions>

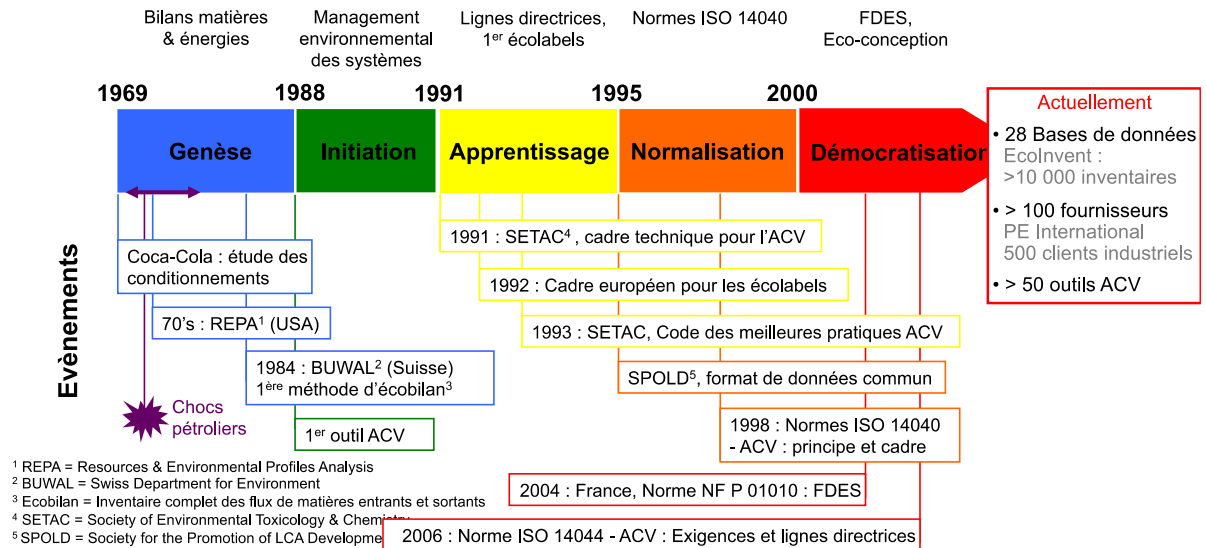


FIGURE 1. Historique de l'ACV

Il est intéressant de noter :

- que le premier outil d'ACV date de 1988 ;
- que la SETAC, lieu d'échange autour des questions de l'ACV entre professionnels regroupant 6000 membres et institutions, a été créée en 1991 ;
- qu'un format commun de données a vu le jour en 1995 ;
- que la méthode ACV a été normalisée en 1998
- qu'elle a été créée pour des produits industriels, son adaptation au secteur de la construction reste encore du domaine de la recherche.

### B. Principes d'une méthodologie normalisée

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

Cette méthode repose sur trois principes de base :

- il s'agit d'une analyse fonctionnelle rapportant le calcul des émissions, extractions et impacts associés à une fonction clairement définie ;
- elle est multicritère, permettant de calculer différents types d'impacts environnementaux (changement climatique, santé humaine, écosystèmes, ressources...);
- elle est multi-étapes.

Les résultats d'une ACV sont exprimés en termes d'impacts potentiels sur l'environnement générés tout au long du cycle de vie, et ils sont rapportés à une unité fonctionnelle intégrant une

durée de vie. L'unité fonctionnelle est donc l'unité de compte à laquelle va se référer l'ACV. Elle doit être définie avec précision et en cohérence avec les objectifs et le champ d'étude car toutes les données d'entrée et de sortie du système ainsi que les flux lui sont affectés. Il faut également garder en mémoire le fait que sa définition se fait en vue d'une analyse comparative. En effet une ACV est destinée à évaluer des scénarii alternatifs d'un point de vue environnemental.

### C. Les phases d'une ACV

Réaliser une analyse du cycle de vie permet ainsi d'évaluer l'impact environnemental global du système étudié rapporté à l'unité fonctionnelle préalablement définie, en suivant la méthodologie décrite dans les normes ISO 14040 et ISO 14044. C'est un processus itératif décrit ci-après qui se décompose en 4 phases (Fig. 2).

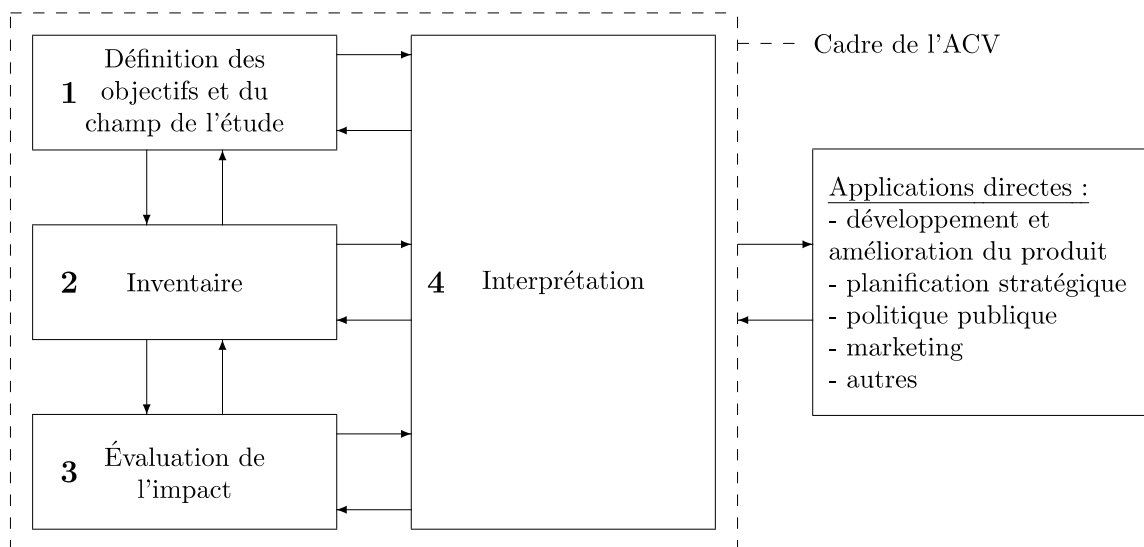


FIGURE 2. Cadre de l'étude de l'ACV d'après la norme ISO 14040

## IV. L'ACV APPLIQUÉE AU BETON

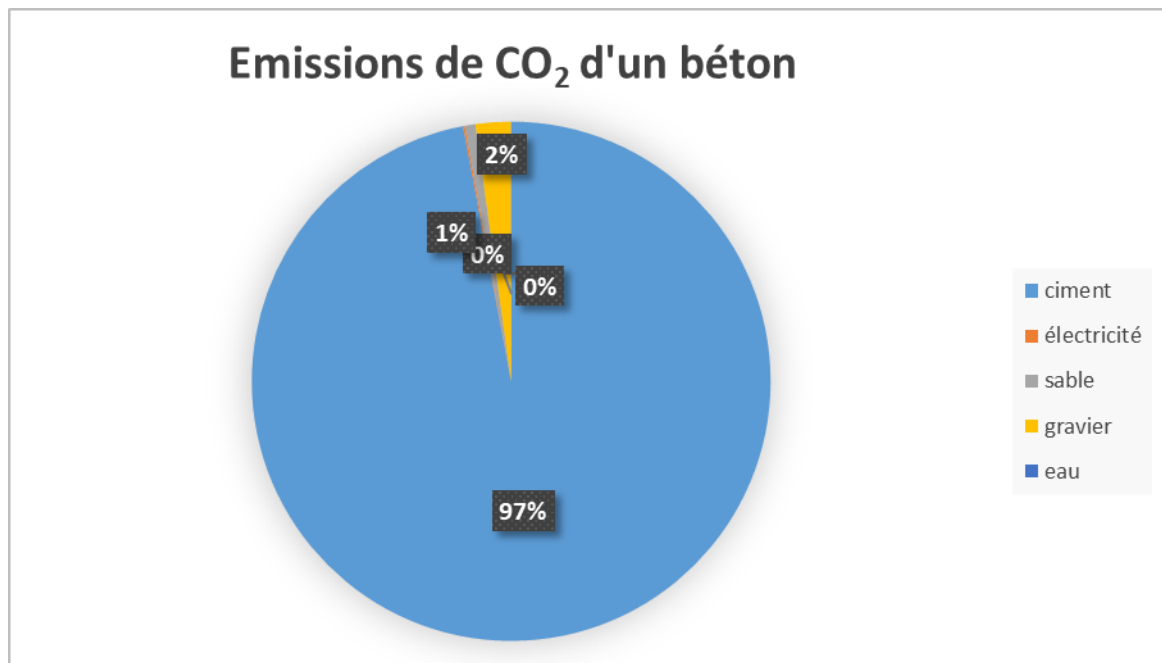
L'industrie de la construction, bien consciente de l'importance de réduire son impact environnemental, travaille depuis des années à l'amélioration de ses processus. Ainsi l'industrie cimentière a réduit de 40% ses émissions de dioxyde de carbone en 30 ans. L'efficacité des fours et de l'entière des processus a été mise en exergue ainsi que la substitution de fiouls par exemple. Pour aller plus loin et atteindre les objectifs que cette industrie s'est fixés (réduction de 24 % des émissions en 2030<sup>11</sup>), plusieurs voies sont envisageables. Nous en présenterons 3 qui représentent pour nous les principales. Ce choix n'est cependant pas exhaustif d'une part, et d'autre part il est évident que dans le contexte climatique très tendu toutes les pistes envisageables doivent être

<sup>11</sup> <https://www.infociments.fr/ciment-et-construction-beton-au-coeur-de-la-decarbonation-dossier-presse>

étudiées en parallèle. Il faut mentionner que chaque piste présente des limites, voire même peut se révéler contre-productive dans certaines conditions.

#### A. Substitution du ciment

Dans un béton, comme vu précédemment, c'est le ciment qui est responsable de la majorité de l'impact changement climatique (Fig. 3). Rappelons cependant que cet impact est loin d'être le seul à évaluer mais devant l'urgence climatique il est important de chercher à le réduire.



**FIGURE 3. Emissions de CO<sub>2</sub> d'un béton répartition de la part des constituants**

Réduire la part de ciment dans le béton semble prometteur. Dans le ciment c'est le clinker qui est responsable des émissions de CO<sub>2</sub> puisque c'est le processus de clinkerisation (haute température et décarbonatation) qui en est la cause principale. Le clinker peut être substitué principalement par :

- des laitiers de haut fourneau (co-produits de l'industrie sidérurgique) ;
- des cendres volantes (déchets des centrales thermiques) ;
- des fillers calcaires .

Pour un CEM I (Ciment Portland) contenant 95 à 100 % de clinker et 0 à 5 % de constituants secondaires, l'impact sur le changement climatique est de 765 kg eq CO<sub>2</sub>/t ; pour un CEM III/A (Ciments de haut fourneau) composé de 35 à 64 % de clinker, 36 à 65 % de laitier de haut fourneau et 0 à 5 % de constituants secondaires, l'impact sur le changement climatique est de 400 kg eq CO<sub>2</sub>/t.

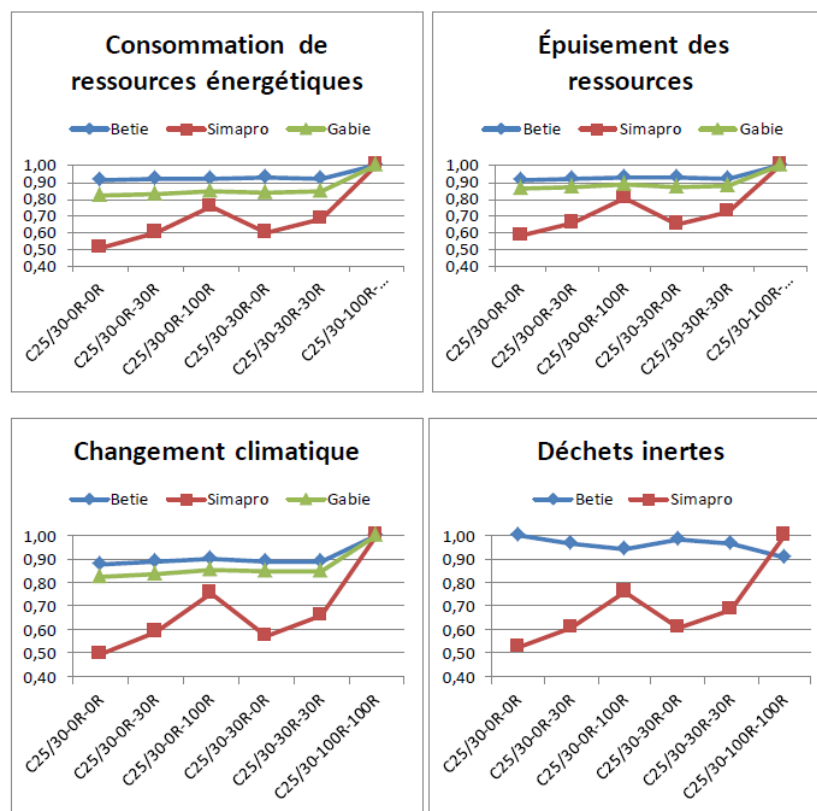
Ces impacts peuvent ainsi varier de manière relativement importante ; le bilan du béton s'en trouve modifié en conséquence. Cependant il est très important de noter que tous ces ciments n'ont pas les mêmes propriétés, et qu'ainsi une comparaison ne se fait pas à unité fonctionnelle

équivalente. D'autre part la ressource en ajouts cimentaires tels que les laitiers, cendres volantes, fumée de silice n'est pas inépuisable. Il est en effet illusoire de penser que l'on construira tout avec des ciments contenant de grandes proportions de laitiers. Enfin la polémique autour du calcul environnemental lié à ces co-produits/déchets a permis d'identifier le souci de leur coût environnemental qui ne peut plus être considéré dans tous les cas comme nul.

### B. Granulats recyclés

Une voie de réduction des émissions de GES est celle de l'utilisation de granulats recyclés dans le béton. Elle a fait l'objet du projet national intitulé RECYBETON<sup>9</sup>.

Afin d'obtenir un béton avec des granulats recyclés qui soit équivalent à un béton avec des granulats naturels, il est nécessaire d'augmenter la teneur en ciment du béton. Cette augmentation va se traduire par une augmentation de leur coût environnemental (Fig. 4). Sur cette figure quatre indicateurs environnementaux sont présentés et ont été évalués pour 1m<sup>3</sup> de béton C25/30 avec différentes proportions de sable et granulat recyclés allant de 0 à 100% en utilisant différents logiciels (Betie, configurateur béton et Simapro et Gabie : logiciels « classiques » d'ACV mais appuyés sur des bases de données différentes).



**FIGURE 4.** Extrait du rapport (Braymand S. et al., 2017), p.19/127, avec l'appellation xR-yR où x est la proportion de sable recyclé et y la proportion de granulat recyclé dans le béton de classe de résistance C25-30

Fort de ce constat, dans le cadre de ce projet national, des formulations visant « des objectifs raisonnables de résistance à dosage en ciment constant » ont été proposées. L'évolution vers un béton plus respectueux de l'environnement passe, une nouvelle fois, par l'utilisation la plus adéquate du matériau compte-tenu de ses caractéristiques. Ainsi pour un béton formulé avec des granulats recyclés, un usage courant paraît optimal.

Alors que l'intérêt environnemental d'utiliser du granulat recyclé dans le béton apparaît intuitivement évidente, le projet national a montré que la méthode ACV ne permettait pas de mettre en avant ce bénéfice. En effet, l'une des conclusions de ce projet est la suivante : « lorsque la composition est formulée à dosage volumique constant, l'utilisation de granulats recyclés n'améliore ni ne détériore les indicateurs d'impacts ». Les indicateurs d'impact évalués, et plus particulièrement l'indicateur épuisement des ressources, ne mettent pas en évidence l'intérêt de l'utilisation d'un granulat recyclé. Cet indicateur n'est en effet pas adapté au domaine de la construction puisque son mode d'évaluation basé sur l'évaluation de la ressource en silice, considérée comme très disponible et également répartie à la surface de la planète. Une évolution de la prise en compte de cet indicateur serait intéressante. Dans le cadre du projet national il a été proposé de prendre en compte des critères de non épuisement de la ressource en granulats naturels et d'évitement de la production de gravats.

### *C. Recarbonation des bétons*

Une autre voie de réduction des impacts des bétons sur le changement climatique envisagée est celle du stockage de carbone par minéralisation du CO<sub>2</sub> atmosphérique ou contenu dans des gaz industriels, via la carbonatation accélérée des granulats de béton recyclé. C'est l'objet du Projet National FastCarb<sup>12</sup>. Le projet se fonde sur le processus de carbonatation des bétons.

Sur la base de démonstrateurs industriels, une évaluation préliminaire a mis en évidence les points suivants (Saadé et al 2021) :

- La carbonatation accélérée de la fraction grossière (4-16 mm) entraîne le captage d'une quantité de CO<sub>2</sub> du même ordre de grandeur que le CO<sub>2</sub> émis lors du processus de carbonatation ;
- La carbonatation accélérée de la fraction fine (0-4 mm) se révèle par contre plus intéressante en termes de captage de CO<sub>2</sub> ;
- Le transport des granulats de béton recyclé a un poids environnemental important dans le bilan total. La carbonatation accélérée doit donc avoir lieu sur les sites proches des chantiers et nécessite une analyse fine des sources de CO<sub>2</sub> industrielles, soumises à SEQUE ou non (raffineries, usines sidérurgiques ou électro métallurgiques, de production de chaux, de verre, de céramique, de papier, de produits chimiques, UIOM...sites industriels) et des lieux d'utilisation potentielle.

---

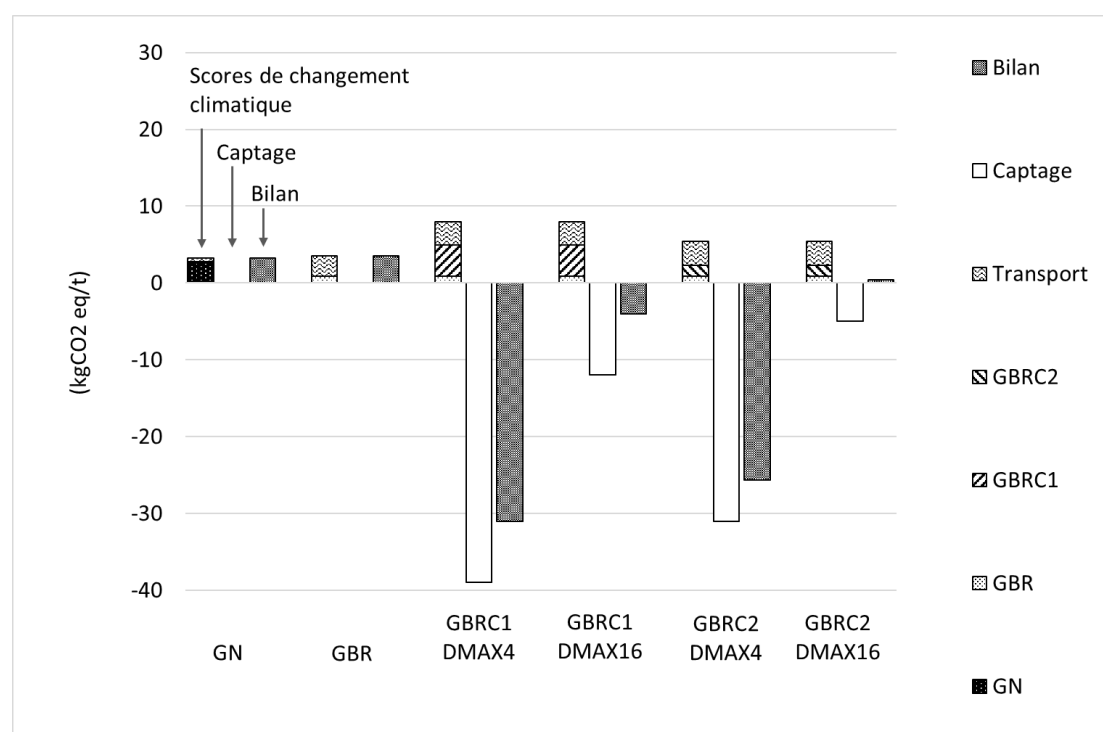
<sup>12</sup> <https://fastcarb.fr/>



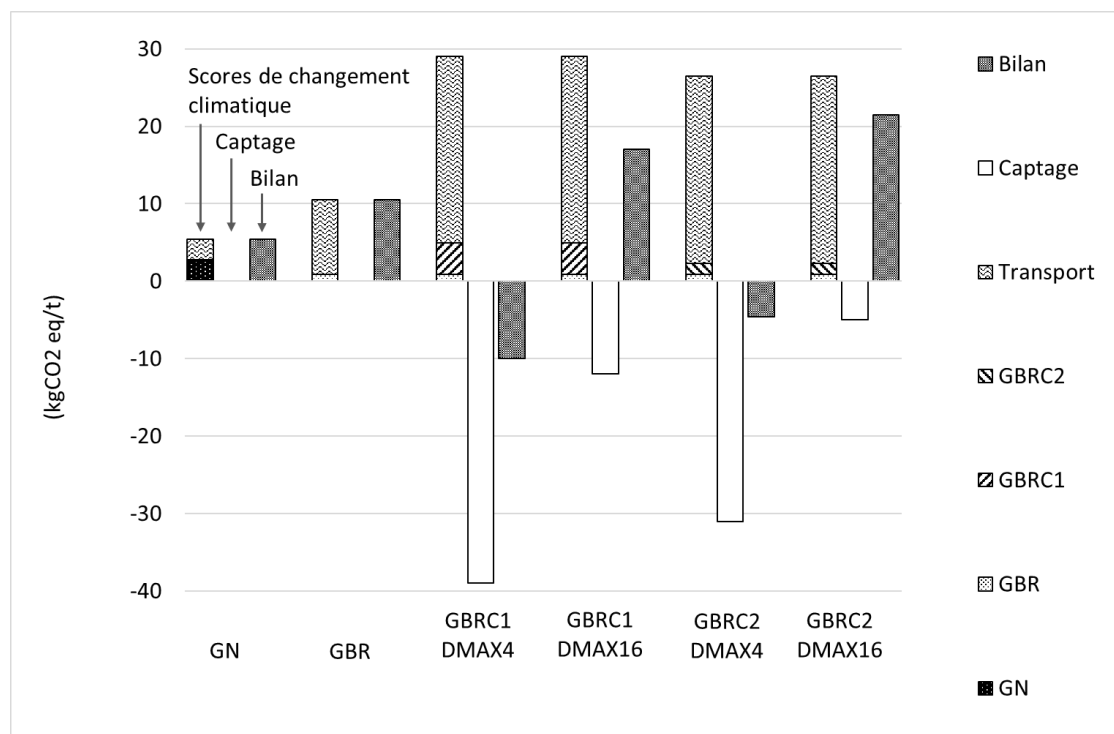
**TABLEAU 1.** Scénarios d’approvisionnement en granulats

Scénario		Distance min	Distance max
GN	Granulat 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

La comparaison de différentes options de mise à disposition de granulats (granulats naturels issus de carrière GN, granulats de béton recycle GBR, et granulats de béton recycles carbonates GBRC, Tab. 1) sans prise en compte d’éventuelles substitutions, montre encore une fois la prédominance du transport dans l’impact total (Fig. 5). Elle met également en évidence l’importance de la distinction entre gravier (DMAX 16) et sable (DMAX 4) en matière de captage.



a)



b)

**FIGURE 5.** Comparaison de différents scénarios d'approvisionnement en granulats, a) distance minimum ; b) distance maximum.

La carbonatation accélérée de granulats de béton recyclés ne permet pas de capter plus de CO<sub>2</sub> qu'un optimum, obtenu également par carbonatation naturelle pour des conditions idéales de température, humidité etc. La carbonatation accélérée de GBR permet cependant de réduire les incertitudes sur le captage de CO<sub>2</sub> lié au devenir sur le temps long de ces GBR, par rapport à de la carbonatation naturelle.

D'autre part, si le sable recyclé carbonaté est intéressant en tant que matériau stockant du CO<sub>2</sub>, se pose la question de ses usages possibles, dans le béton, en prefabrication ou comme matériau de remblais. La question centrale étant de savoir quelle ressource naturelle ce matériau peut venir substituer, l'idée n'étant pas de créer des besoins artificiellement.

## V. DISCUSSION

L'industrie cimentière vise la neutralité carbone à échéance 2050. De nombreux progrès ont été réalisés (efficacité des fours et des processus, optimisation de la teneur en clinker des ciments, substitution de combustibles fossiles, exploration de voies de substitution de clinker par des co-produits et/ou déchets, ...) mais cette industrie a le pouvoir de faire bouger encore les lignes. Ainsi la neutralité carbone ne pourra être obtenue que par une multiplication des solutions mises en œuvre. Ceci vaut pour l'industrie cimentière mais bien au-delà ! La solution unique n'existe

mais c'est bien l'exploration et l'exploitation de toutes les voies possibles qui peuvent faire évoluer positivement les choses d'un point de vue environnemental. A titre d'exemple il est illusoire de penser remplacer la quasi-totalité du clinker par du laitier de haut fourneau ; les quantités disponibles sont bien trop faibles ... Ainsi gardons bien la substitution du clinker par du laitier pour les applications les plus pertinentes.

Cette multiplicité des solutions a été bien comprise et intégrée par cette industrie, et ce depuis bien des années. Une nouvelle voie d'amélioration est en passe d'être examinée et paraît très prometteuse et ce au-delà de la seule industrie cimentière. En effet, celle-ci s'intéresse au changement des modes de transport pour s'orienter vers des modes plus vertueux. On sent bien que l'importance d'une telle industrie pourrait faire bouger ces modes de transport en influençant sur le développement du fret ferroviaire et du fret fluvial, deux modes de transport plus efficaces en terme de changement climatique.

## V. CONCLUSION

En conclusion de cette étude non exhaustive, il nous semble judicieux de rappeler ce qui est largement souligné : en terme de respect environnemental, la meilleure utilisation d'un matériau c'est de l'utiliser à bon escient ce qui peut être résumé par le bon matériau au bon endroit ! Le bon matériau c'est à la fois un matériau utilisé pour ses propriétés intrinsèques et sans « surqualité » ainsi qu'un matériau dont la durabilité est adaptée à l'usage. Le meilleur matériau c'est bien celui qui dure très très longtemps et qui évite ainsi trop de remplacement. Le meilleur matériau d'un point de vue environnemental est bien celui que l'on ne produit pas !

## REFERENCES

Braymand A., Feraille A., Serres N. Thème 3 Évaluation environnementale du béton de granulats recyclés – 2<sup>ème</sup> étape. Rapport de recherche. Projet National de recherche et développement RECYBETON. Juillet 2017

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

Kuzmenko K. (2021) Environmental performance in Construction. A case-study of 3D Concrete Printing Technology. *PhD Thesis Ecole des Ponts*.

Munyon, V., Bowen, W., & Holcombe, J. (2018) Vehicle fuel economy and vehicle miles traveled: An empirical investigation of Jevon's Paradox. *Energy Research & Social Science*, 38, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2018.01.007>

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

Brochard, L., Feraille, A., Saadé, M. (2021), L'Analyse du Cycle de Vie, une méthode fonctionnelle, multicritère et comparative d'évaluation des impacts environnementaux, *Revue Transitions, La finance verte*.

Saadé, M., Feraille, A., Rospars, C., Torrenti, J.M. (2021) Captage de CO<sub>2</sub> : Analyse du cycle de vie d'un processus de carbonatation de granulats de béton recyclés, Journée GC 2021.

UNEP 2019. Sand and sustainability: Finding new solutions for environmental governance of global sand resources. GRID-Geneva, United Nations Environment Programme, Geneva, Switzerland.

Zipper, S. C., Jaramillo, F., Wang-Erlandsson, L., Cornell, S. E., Gleeson, T., Porkka, M., Häyhä, T., Crépin, A.-S., Fetzer, I., Gerten, D., Hoff, H., Matthews, N., Ricaurte-Villota, C., Kummu, M., Wada, Y. and Gordon, L. (2020). Integrating the water planetary boundary with water management from local to global scales. *Earth's Future*, 8(2). e2019EF001377. <https://dx.doi.org/10.1029/2019EF001377>