

TRACTEBEL

ENGIE



Comment concevoir des  
bâtiments et infrastructures  
plus durables ?

Concevoir et construire avec du

**béton bas  
carbone**







# Sommaire

## **PRÉAMBULE : MYTHE OU RÉALITÉ ?**

---

p.2

## **CONCEVOIR ET CONSTRUIRE AVEC DU BÉTON BAS CARBONE**

Le béton et l'économie bas carbone

Qu'est-ce que le béton bas carbone ?

D'où provient le CO<sub>2</sub> du béton ?

Les recommandations de Tractebel

Les recommandations autorisées par les Eurocodes

Les alternatives futures

## **CONCLUSION**

---

p. 11

## **RÉFÉRENCES**

---

p. 12



# Préambule : MYTHE OU RÉALITÉ ?

Cet article sur le béton bas carbone présente **une avancée concrète vers la conception d'environnements urbains plus verts et plus agréables à vivre**. Il s'agit du premier d'une série d'articles consacrés aux matériaux bas carbone et aux bâtiments passifs.

Les projets de construction de bâtiments et d'infrastructure ont un impact sur l'environnement. Nos experts évaluent chaque projet avec beaucoup d'attention à la durabilité, de la conception et de l'ingénierie à la gestion de projet. Grâce à l'utilisation du béton bas carbone et de divers autres matériaux et initiatives à faibles émissions, nos équipes pluridisciplinaires contribuent à la réalisation des objectifs nets zéro, **tant au niveau local que mondial**. La diversité des compétences techniques de Tractebel lui permet de proposer des services intégrés à chaque étape. Cette capacité est cruciale pour mener des projets qui minimisent efficacement l'impact sur l'environnement.

**Qu'est-ce que le béton bas carbone et comment l'intégrer dans l'ingénierie des bâtiments et infrastructures éco-conçus ?**



**Béton bas carbone : un matériau innovant et autonome**





# Concevoir et construire avec du Béton Bas Carbone

## Le béton et l'économie bas carbone



Usine d'essai Lixhe Belgium – Projet Leilac UE (Fig. 1)

### Quelques informations sur le béton

Le béton est la troisième substance la plus utilisée dans le monde, juste derrière l'air et l'eau. Son rôle crucial dans la civilisation humaine est encore souligné par le fait qu'il représente environ **6 à 10 % des émissions mondiales** de CO<sub>2</sub> attribuées à l'activité humaine. Malgré cela, il reste le matériau de construction le plus utilisé dans le monde.

Voici quelques informations sur le béton :

- La consommation mondiale de béton dépasse 1 mètre cube (m<sup>3</sup>) par personne et par an, ce qui témoigne de son utilisation intensive dans les activités de construction, qu'il s'agisse de divers types d'infrastructures ou de bâtiments résidentiels.
- Chaque mètre cube de béton produit est responsable de 128 à 432 kg d'émissions de CO<sub>2</sub>, ce qui souligne encore davantage l'urgence de trouver des alternatives durables.
- Entre 75 et 95 % des émissions de CO<sub>2</sub> attribuées au béton par m<sup>3</sup> proviennent de la production de son principal ingrédient, le ciment.
- Les principaux composants du ciment sont des matériaux tels que le laitier granulé de haut fourneau moulu, les cendres volantes, la fumée de silice ou le calcaire. Ces matériaux, lorsqu'ils sont chauffés à haute température pendant le processus de fabrication du ciment, contribuent notablement aux émissions.

Malgré ces défis environnementaux, le béton reste une ressource indispensable en raison de ses nombreux avantages, tels que sa durabilité, sa polyvalence et sa résistance. Cependant, l'empreinte carbone élevée de sa production nécessite **l'élaboration et la mise en œuvre d'alternatives plus durables, telles que le béton bas carbone.**



Le béton représente environ 6 à 10 % des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> attribuées à l'activité humaine (Fig. 4)

## Les avantages du béton

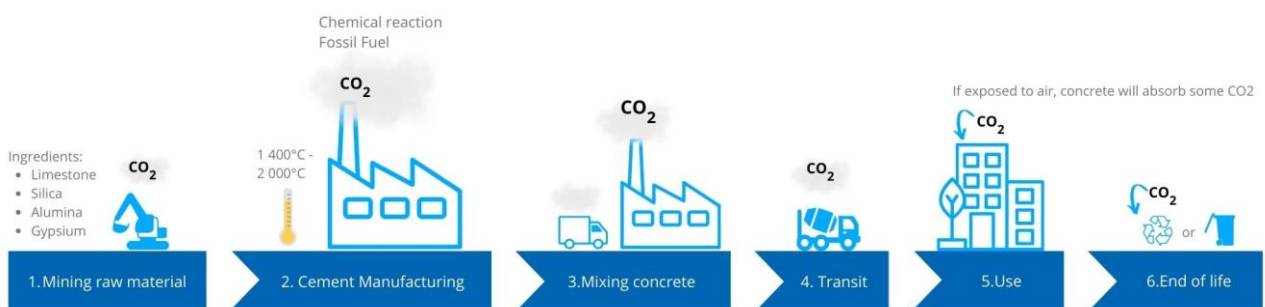
Le béton présente de nombreux avantages qui expliquent son utilisation intensive :

1. **Durabilité et longévité** : Les structures en béton sont durables et nécessitent peu d'entretien. Elles résistent aux intempéries, à l'érosion et aux catastrophes naturelles.
2. **Polyvalence** : Le béton peut être coulé dans n'importe quelle forme, il est donc polyvalent et se prête à une grande variété d'applications structurelles.
3. **Résistance** : Le béton est robuste, il offre une grande résistance à la compression et, lorsqu'il est armé, une bonne résistance à la traction.
4. **Abondance de matières premières** : Les matières premières du béton sont (encore) largement disponibles dans le monde, ce qui en fait une solution de construction rentable.
5. **Masse thermique** : La capacité du béton à stocker et à libérer de l'énergie au fil du temps peut améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.
6. **Séquestration du carbone** : À la fin du cycle de vie d'un bâtiment (démolition), le béton peut être broyé et absorber le CO<sub>2</sub> de l'air selon un processus connu sous le nom de carbonatation. Ainsi, les émissions de CO<sub>2</sub> du béton sur l'ensemble du cycle de vie du bâtiment sont inférieures au CO<sub>2</sub> incorporé initial.

Lorsque l'on conçoit des bâtiments et des infrastructures bas carbone, il faut tenir compte de l'ensemble du processus.

Les émissions de CO<sub>2</sub> du béton ne se limitent pas à sa production ; le processus d'extraction des matières premières et le processus de fabrication du ciment produisent également du CO<sub>2</sub> à cause de la combustion des combustibles fossiles et des réactions chimiques. Le mélange et le transport du béton contribuent également aux émissions. Il est toutefois important de noter que le CO<sub>2</sub> est absorbé tout au long de l'utilisation du bâtiment et à la fin de sa vie, ce qui réduit les émissions totales associées au béton sur l'ensemble de son cycle de vie.

Compte tenu de ces avantages et des considérations relatives au cycle de vie, il est évident que le béton peut contribuer à l'économie bas carbone. Toutefois, les efforts doivent se concentrer sur la réduction des émissions associées à sa production et sur l'amélioration de son efficacité carbone globale. C'est là que le béton bas carbone entre en jeu : **c'est bien une réalité, et non un mythe.**



Impact carbone du béton au cours de son cycle de vie (Fig. 3)

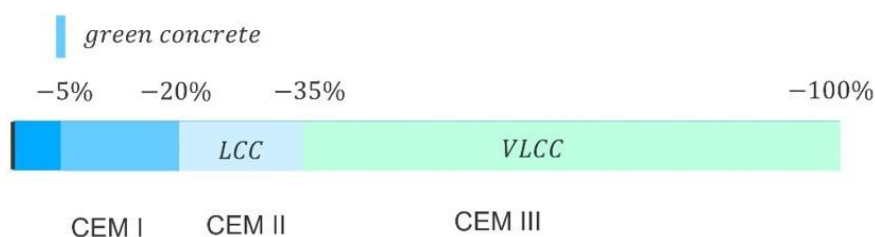
L'extraction, la fabrication, le mélange et le transport du béton génèrent des émissions, tandis que son utilisation et sa démolition entraînent une absorption de CO<sub>2</sub>.

# Qu'est-ce que le béton bas carbone ?

## Trois catégories de béton bas carbone :

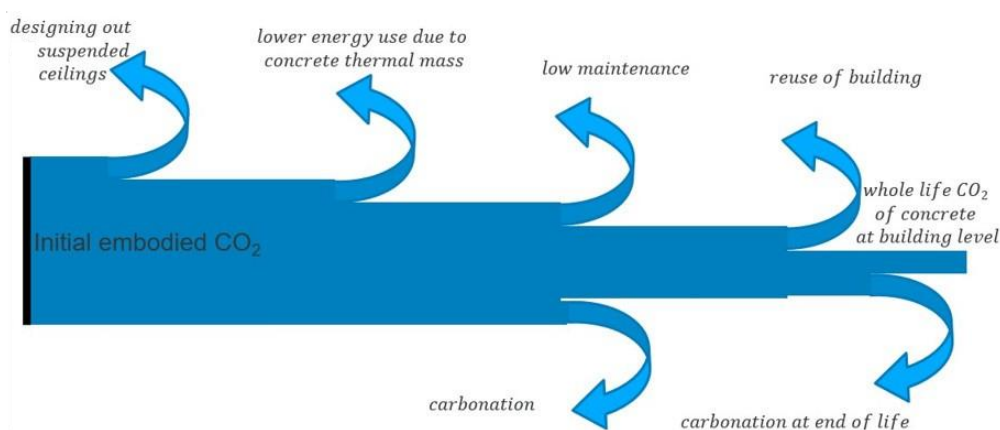
- Le **béton vert** consiste en une réduction de 5 % ou plus des émissions de CO<sub>2</sub>.
- Le **béton bas carbone (BCB)** se caractérise par une réduction d'au moins 20 % par rapport au béton de ciment Portland.
- Le **béton très bas carbone (BTBC)** correspond à une réduction de 35 %. D'autres pourcentages et appellations peuvent être utilisés, l'échelle restant arbitraire.

Dans la pratique, on a pu réaliser des économies allant jusqu'à 100 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>.



La quantité initiale de CO<sub>2</sub> incorporé dans un bâtiment ou une infrastructure est un élément important à prendre en compte. **Voici trois manières de la réduire :**

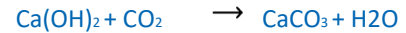
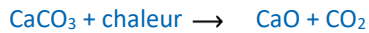
1. En faisant des choix de conception différents, il est possible de **réduire** une partie de la production de CO<sub>2</sub> associée à la construction. Par exemple, en renonçant à l'installation de plafonds suspendus et en optant pour une finition béton, il est possible de réduire la quantité totale de carbone incorporé. Ces choix de conception peuvent contribuer à la création de bâtiments et d'infrastructures bas carbone plus durables.
2. En utilisant du béton bas carbone et d'autres **matériaux innovants**.
3. En encourageant, dès la conception, la **réutilisation** future des matériaux.



La durée de vie totale du CO<sub>2</sub> dans le béton au niveau du bâtiment ou de l'infrastructure est beaucoup plus courte que le CO<sub>2</sub> incorporé initial (Fig. 4).

# D'où provient le CO<sub>2</sub> du béton ?

Il existe deux sources principales émettrices de CO<sub>2</sub> dans le béton : la **décomposition du calcaire** et la **combustion de carburants**.

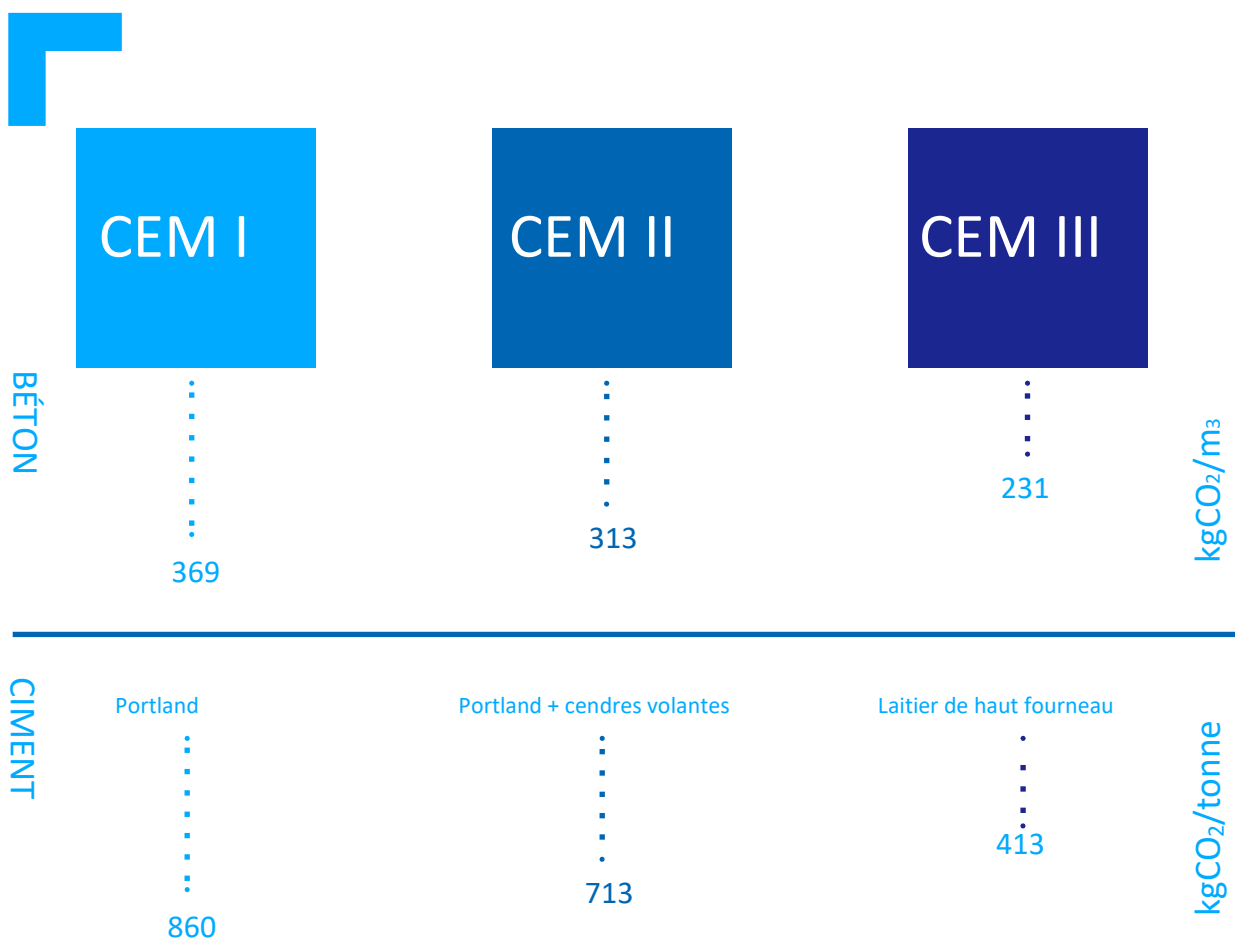


Le calcaire absorbe la chaleur et l'oxyde de calcium, et du CO<sub>2</sub> se forme.

Le CO<sub>2</sub> présent dans l'air réagit avec les phases hydratées du ciment dans le béton et des carbonates se forment. C'est ce qu'on appelle la carbonatation.

La carbonatation peut survenir pendant la durée de vie du produit en béton, mais aussi dans le béton concassé en tant que produit secondaire. Cette absorption du CO<sub>2</sub> dans le béton réduit donc l'émission nette de CO<sub>2</sub> provenant des matières premières. L'absorption pendant la « phase de vie » peut être estimée à 10 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton. De même, l'absorption lors de l'utilisation secondaire (béton concassé) peut également être estimée à 10 kg de CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> de béton.

Comme le montre le tableau ci-dessous, le ciment CEM I (ciment Portland) produit deux fois plus de CO<sub>2</sub> que le ciment CEM III (laitier de haut fourneau). Ce sont les premiers exemples permettant d'expliquer l'évolution du béton. Il existe également les bétons CEM IV, CEM V et CEM VI.



Voici une comparaison des différents impacts des mélanges de béton. Il est essentiel de **limiter l'utilisation du ciment Portland afin de produire un béton bas carbone.**

# Les recommandations de Tractebel

Nos recommandations sont résumées dans trois exemples de « moins, c'est mieux » :

## Moins de clinker dans le ciment

Il est important d'éviter d'utiliser du ciment Portland afin de produire un béton bas carbone.

Il existe des alternatives futures pour de nouveaux types de ciment, mais leur développement n'en étant qu'à ses prémices, il faudra attendre un certain temps avant que la production à grande échelle ne devienne une réalité.

Le **métakaolin** a déjà été utilisé pour remplacer le ciment.

Le métakaolin est la forme calcinée anhydre de l'argile kaolinite (également appelée argile de Chine). La granulométrie du métakaolin est plus petite que celle des particules de ciment, mais moins fine que celle de la fumée de silice. Sa production de CO<sub>2</sub> est de 139 kg CO<sub>2</sub>/tonne, ce qui est très bien par rapport au Portland (860 kg CO<sub>2</sub>) et au laitier de haut fourneau (413 kg).

Le **ciment Hoffman** est une autre variante pionnière de ciment bas carbone, dont la composition ne contient pas de clinker. Ces procédés révolutionnaires dispensent de la cuisson, au profit de réactions chimiques à froid déclenchées par des agents spécifiques. Les matières premières utilisées sont des sous-produits provenant de diverses industries, notamment l'argile métakaolin, le gypse, le laitier de haut fourneau et le métrasilicate de sodium.



Métakaolin (Fig. 5)



Ciment Hoffman green (Fig. 6)

## Moins de ciment dans le béton

La préférence accordée aux options à faible teneur minimale recommandée en ciment et la possibilité d'utiliser des types de ciment présentant les niveaux les plus élevés de remplacement du clinker réduiront directement les valeurs de CO<sub>2</sub> du béton. N'oubliez pas que **moins de ciment, c'est moins de carbone**

Il est possible de choisir différents mélanges de béton pour différentes utilisations. Il est conseillé de ne pas trop mettre en avant les spécifications de résistance. L'utilisation d'adjuvants doit être perçue comme un moyen efficace de réduire la teneur en ciment. Les super plastifiants permettent généralement de réduire la quantité d'eau jusqu'à 30 % sans perte de consistance et sans altération des propriétés finales. Moins il y a d'eau, moins il faut de ciment pour obtenir la même résistance à la compression.

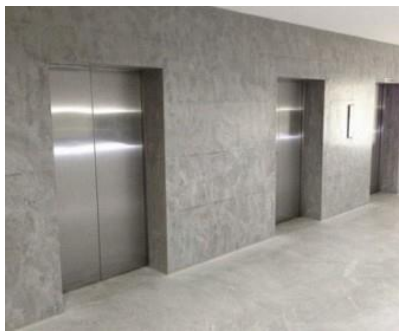


## Moins de matériaux dans les structures

Pour réduire l'impact et les émissions provenant du béton, il est possible d'optimiser l'utilisation des matériaux et d'accroître l'efficacité. C'est possible à condition de n'utiliser des armatures que lorsque nécessaire et d'éviter de spécifier une largeur des fissures pour l'armature minimale. Enfin, il faut prendre en compte les arbitrages entre le béton précontraint et le béton préfabriqué. Les photos ci-dessous montrent des exemples d'optimisation et de prise en compte de l'ensemble du cycle de vie.



Dalle nervurée (Fig. 7)



Finition béton des murs d'ascenseurs (Fig. 8)



Béton concassé (Fig. 9)

Un bon exemple de réduction du poids des dalles. Les dalles nervurées utilisent moins de béton pour la même capacité de charge.

Le béton structurel peut également être utilisé comme matériau de finition, ce qui évite la pose d'une gaine, d'un revêtement ou d'une doublure.

Enfin, compte tenu de l'analyse de l'ensemble du cycle de vie, il convient de broyer et de répandre le béton en fin de vie. Le CO<sub>2</sub> est absorbé durant les phases de démolition et de recyclage. L'ensemble du cycle de vie doit être intégré dans tous les projets.

## Recommandations émises par Eurocodes

Tractebel envisage de spécifier la résistance à 56 jours plutôt que la résistance conventionnelle à 28 jours lorsque cela est approprié. Nous spécifions la résistance requise auprès de producteurs disposant d'une certification de conformité de produit.

Nous spécifions également le béton avec une gamme plus large de types/comбинаisons de ciment. L'utilisation d'ajouts cimentaires peut à la fois réduire le CO<sub>2</sub> incorporé au béton et influencer son aspect visuel. Lorsque l'esthétique est cruciale, nous spécifions le ciment/la combinaison qui permet d'obtenir une couleur homogène.

L'utilisation d'adjuvants est autorisée chez Tractebel. Les adjuvants peuvent être utilisés pour améliorer les et réduire les émissions de CO<sub>2</sub> du béton, ainsi que pour modifier ses propriétés physiques.

La spécification de granulats recyclés et secondaires peut ne pas être l'option la plus durable.

Nous encourageons l'utilisation de granulats recyclés ou secondaires, mais n'en faisons pas trop. L'Eurocode EN 206 autorise les producteurs à utiliser jusqu'à 30 % de granulats recyclés. Ceux-ci ne doivent généralement être spécifiés que lorsqu'ils sont disponibles localement, sinon les impacts du transport de CO<sub>2</sub> risquent d'être supérieurs aux avantages escomptés.

Nous spécifions la taille maximale la plus grande possible afin d'obtenir une mise en place efficace et un compactage complet.

# Les alternatives futures

Les nouveaux types de ciment ont de l'avenir, mais leur développement n'en étant qu'à ses débuts, il faudra un certain temps avant qu'une production à grande échelle ne soit possible. Voici quelques solutions en cours de d'élaboration :

## Ciment à empreinte carbone négative – Novacem

Ce nouveau matériau est fabriqué à partir de silicates de magnésium.

Cela signifie non seulement qu'il nécessite moins de chaleur, mais aussi qu'il est capable d'absorber le CO<sub>2</sub> de l'environnement à mesure qu'il durcit, ce qui en fait un produit de construction « vert ».



Novacem (Fig. 10)

## CO2NCRETE

Cette innovation est un matériau écologique qui remplace le béton.

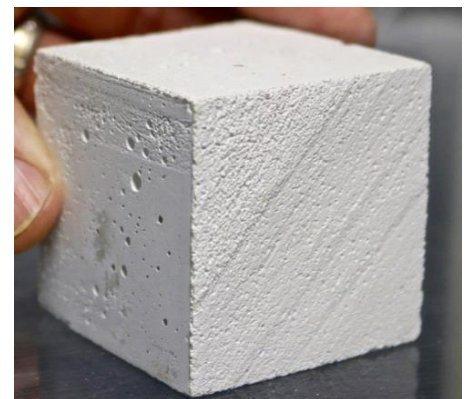
Sa fabrication produit 50 à 75 % de CO<sub>2</sub> en moins que le béton traditionnel, car il est composé de chaux hydratée, qui absorbe le CO<sub>2</sub>.

## Cenocell du prof. Mulalo Doyoyo

Enfin, la dernière innovation qui doit encore être développée, mais qu'il est important de mentionner, est un ciment liquide composé de cendres volantes et de certains éléments chimiques naturels (secrets).

Cette technique permet de fabriquer du béton avec moins d'eau et sans production de chaleur.

Principale caractéristique : durcissement à moins de 100°C (réaction endothermique – pas de dégagement de chaleur) permet de créer un excellent produit bas carbone pour la maçonnerie !



Co2ncrete (Fig. 11)



Cenocell, prof. Mulalo Doyoyo (Fig. 12)



# Conclusion

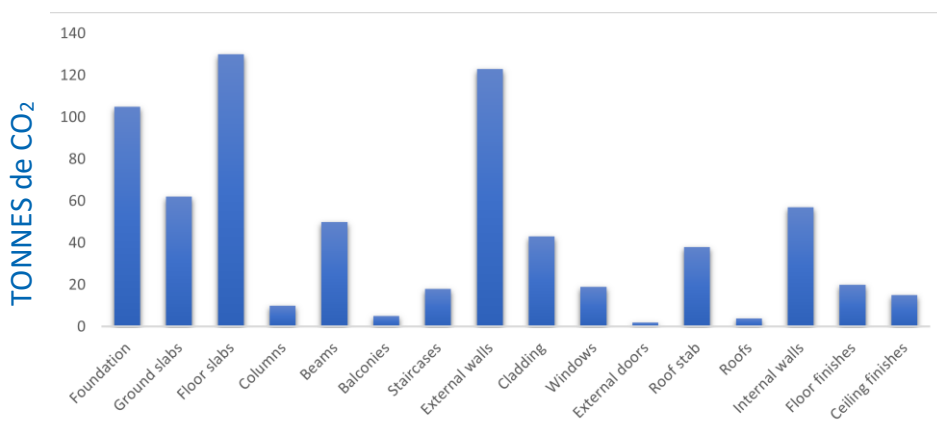
Nos experts s'efforcent de concrétiser des projets à faible empreinte carbone, à l'échelle des bâtiments et des plus grandes infrastructures.

Pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> tout au long du cycle de vie d'un projet, il est impératif d'utiliser des matériaux tels que le béton bas carbone.

Une **éco-conception** minutieuse, tout aussi importante que l'utilisation de matériaux innovants, constitue la base de chaque projet, depuis la phase stratégique jusqu'à sa réalisation. La valeur ajoutée de Tractebel est de mettre l'accent sur la durabilité, depuis la conception et l'ingénierie jusqu'à la gestion du projet.

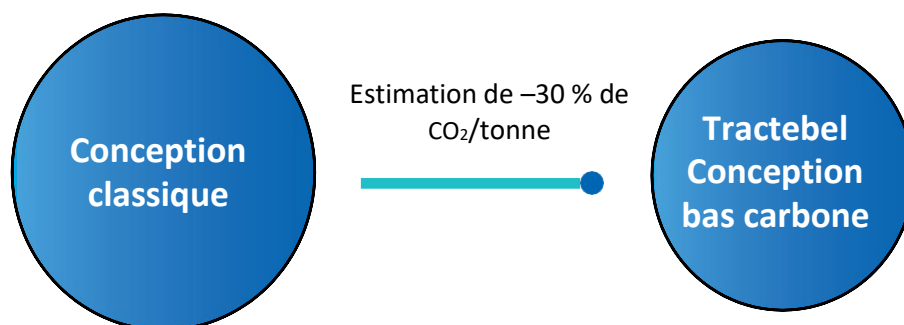
Des méthodes de conception alternatives peuvent réduire les émissions de CO<sub>2</sub>. L'utilisation d'outils d'**analyse du cycle de vie** permet de contrôler l'empreinte carbone intrinsèque à chaque étape de la conception et de la construction, sans oublier la démolition et la réutilisation futures. L'impact carbone des spécifications et des solutions de conception alternatives peut être évalué en temps réel, de même que les produits et matériaux utilisés pendant l'exécution des travaux.

## Exemples d'utilisation d'un outil d'analyse du cycle de vie



**Exemple 1** : Identification des principales sources d'émission d'un immeuble de bureaux.

Analyse du cycle de vie pour une haute qualité environnementale (selon la norme NF EN 15978)  
– changement climatique



**Exemple 2** : Réduction possible de l'empreinte carbone grâce à l'éco-conception et à l'ingénierie avec du béton bas carbone.

# Références

1. *“Minimizing embodied carbon in reinforced concrete beams – Jayasinghe et al.”* – engineering structures 242 (2021).
2. *“CO2 uptake in cement-containing products”* – IVL octobre 2018
3. *“Building with low carbon cement is affordable”* – Bellona.org – avril 2018
4. *“The role of cement in the 2050 low carbon economy”* – the European Cement Association
5. *“Carbon Control and Competitiveness Post 2020: The Cement Report”* – Climate Strategies (fév. 2014)
6. *“Carbon impacts of concrete”*: <https://materialspalette.org/concrete/>
7. *“Specifying Sustainable Concrete”* – mpa the Concrete Centre (fév. 2020)
8. *“Whole-life Carbon and Building”* – mpa the Concrete Centre (2016)
9. *« Le métakaolin flash atout des bétons décarbonés performants et durables »* - mines et carrières n°278 (mars 2020)
10. *« Béton écologique et construction durable – l’essentiel à savoir pour réussir la transition »*, 2 février 2023, Florent Dubois, Eyrolles.

## Crédits photos

**Couverture** : © Photocreo Bednarek, stock.adobe.com

**Page 2** : © Frank Boston, stock.adobe.com

**Figure 1** : © Juan Enrique del Barrio, stock.adobe.com

**Figure 2** : © Ian Scott, stock.adobe.com

**Figure 5** : [https://www.researchgate.net/figure/Metakaolin-image-36\\_fig4\\_259784018](https://www.researchgate.net/figure/Metakaolin-image-36_fig4_259784018)

**Figure 6** : Crédit (CC BY 2.0), <https://www.flickr.com/photos/oskay/2362752989>

**Figure 7** : Pinterest

**Figure 8** : officetar.jp

**Figure 9** : concreteconstruction.net – juin 2011 – Kevin MacDonald

**Figure 10** : [dornob.com/constructive-concrete-incredible-carbon-negative-cement/](https://dornob.com/constructive-concrete-incredible-carbon-negative-cement/)

**Figure 11** : J.R. DeShazo/Gaurav Sant - [universityofcalifornia.edu/news/how-we-can-recycle-co2-make-eco-friendly-concrete](https://universityofcalifornia.edu/news/how-we-can-recycle-co2-make-eco-friendly-concrete)

**Figure 12** : Extrait de la vidéo Carte Blanche – <https://www.youtube.com/watch?v=27D4Kd41JBU>



# Biographie de l'auteur



**Pieter Baekeland**  
Expert senior, Tractebel

**Pieter Baekeland** a plus de 35 ans d'expérience dans la conception d'ouvrages de génie civil en tant que concepteur, chef de projet ou chef de service. Il a participé à de nombreux grands projets tels que le second Tijsmanstunnel, l'Oosterweelverbinding, l'échangeur Kempen Noord Zuid, le projet de tramway Spartacus et le Deurganckdok en Belgique, les écluses du Canal Seine-Nord en France et la centrale nucléaire de Taishan en Chine.

Il est ingénieur civil (VUB), professeur invité à l'Université de Hasselt et actuellement expert senior au sein du centre de compétences Tractebel en ingénierie structurelle. Pieter est également reconnu comme Key Expert en matière de béton au sein d'ENGIE et comme expert national au sein de la commission CEN TC 250 SC2 (Comité européen de normalisation). Il est réviseur de la revue Structural Concrete de la FIB (Fédération internationale pour le béton structurel).

Pieter est spécialisé dans la conception de ponts routiers et ferroviaires, de tunnels, de murs de quai et d'écluses.

Sa spécialité est le béton armé/précontraint, les spécifications DBFM (Design, Build, Finance, Maintain) et la rénovation du béton.