

# Béton bas carbone : Substitution partielle des ciments Portland

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Antoine MARLOT - Xavier JOURDAIN - Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le  
28/02/2022

école  
normale  
supérieure  
paris—saclay

*Élève de l'ENS Paris-Saclay, Antoine Marlot, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.*

La répartition de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre dans les bâtiments en béton a été évaluée à 30 % au cours de la phase de construction, 70 % en phase d'utilisation et de maintenance, et 1 % lors de l'étape de démolition [1]<sup>1</sup>.

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Actuellement, la consommation de béton est d'environ **1 tonne par an pour chaque être humain**. Les êtres humains ne consomment aucun autre matériau dans ces quantités à l'exception de l'eau. C'est pourquoi même de petites réductions d'émissions de gaz à effet de serre par tonne de béton produit peuvent avoir un impact mondial significatif.

Une première évolution de l'industrie est de modifier la composition du ciment **en substituant une partie du clinker** utilisé dans les ciments Portland par des matériaux à impacts environnementaux moins importants couramment nommés **matériaux cimentaires supplémentaires** (en anglais **Supplementary Cementitious Materials : SCM**).

Cet article présente des modifications de la composition du ciment par substitution d'une partie du clinker dans le ciment Portland par des matériaux cimentaires supplémentaires. Il complète l'article « *Introduction aux enjeux modernes de l'industrie du béton* » [2] qui propose un bilan des émissions de CO<sub>2</sub> lors de la production de béton, les impacts sur le bilan carbone et les caractéristiques du béton ainsi que les enjeux de nouvelles formulations par optimisation du squelette granulaire, du ciment, de la formule globale et enfin des choix de construction. Un dernier article traite des « *Bétons auto-activés* » [3].

**Un glossaire et un récapitulatif des sigles utilisés se trouvent page 9.**

## 1 – Processus

L'objectif est de diminuer l'utilisation de clinker car celle-ci représente 60 % des émissions de Gaz à effet de serre dues au béton. De plus, cette solution a l'avantage de préserver les ressources naturelles.

La solution la plus courante actuellement est de valoriser des déchets d'origine industrielle pour réduire la teneur en clinker **en continuant d'utiliser la technologie conventionnelle du ciment**

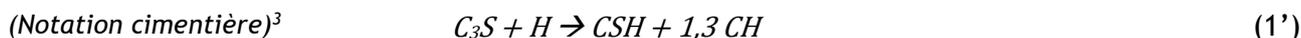
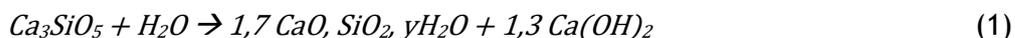
---

<sup>1</sup> Cet article est largement basé sur le livre de A. Nazari et J.G. Sanayan intitulé *Handbook of Low Carbon* [1] publié en 2018. Ce recueil de plusieurs centaines d'articles scientifiques permet au lecteur une compréhension globale des techniques permettant la réduction des émissions de dioxyde de carbone liées à la fabrication de béton.

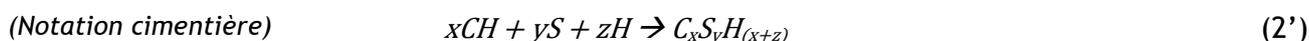
**Portland.** Cette solution a l'avantage de valoriser le savoir-faire centenaire des cimentiers en utilisant des formulations très proches de celles utilisant du ciment Portland.

**L'utilisation de matériaux aux propriétés pouzzolaniques et/ou aux propriétés hydrauliques est requise.** Les réactions chimiques représentant les mécanismes de prise des liants pouvant être utilisés dans la composition du béton, sont contrôlées par les deux équations<sup>2</sup> suivantes :

Équation bilan de la réaction hydraulique :



Équation bilan de la réaction pouzzolanique :



Cette réaction chimique est celle à l'origine du durcissement<sup>4</sup> en présence de chaux par hydratation. Des hydrates de nature analogue à ceux du clinker sont produits [4].

Cette réaction est celle de la formation de la pâte de ciment qui durcit par hydratation. Elle est à l'origine de la prise du béton et du durcissement [4].

Les proportions évoluent actuellement vers une augmentation de la fraction massique des produits de substitution. Celles-ci induisent de **nouveaux enjeux dans la formulation de béton, principalement en termes de variabilité et de durabilité**. En effet, l'utilisation de formulations nouvelles très différentes oblige la recherche à vérifier l'ensemble des caractéristiques des nouveaux bétons pour des raisons évidentes de sécurité mais aussi de durabilité.

## 2 – Matériaux cimentaires supplémentaires (SCM : Supplementary Cementitious Materials)

Les ressources décrites ci-dessous ont eu l'avantage d'être inexploitées et accessibles en relativement grande quantité à travers le monde. En cela, elles sont des solutions privilégiées pour les cimentiers.

La pouzzolane naturelle, le schiste calciné et le calcaire constituent aussi fréquemment des matériaux de substitution du clinker [5].

### 2.1 - Cendres volantes siliceuses (V)

Les cendres volantes siliceuses sont issues de la combustion de charbon par précipitation électrostatique ou mécanique. Dans le monde, il y aurait 780 millions de tonnes de cendres volantes siliceuses, dont seulement la moitié serait utilisée [1]. En masse, cela représente un peu moins de 20 % de la production de ciment.

<sup>2</sup> Ces équations sont des équations bilans et non des réactions chimiques, plus de détails dans [4]

<sup>3</sup> En notation cimentière : C : CaO (oxide de calcium) ; S : SiO<sub>2</sub> (dioxyde de silicium) ; H : H<sub>2</sub>O (eau)

<sup>4</sup> Obtention des propriétés mécaniques

En Australie, pour exemple, il y a 14 millions de tonnes de cendres volantes siliceuses pour une demande de moins de 10 millions de tonnes de ciment par an [1]. Cela s'explique par un mix énergétique pour la production d'électricité composé à 60 % de charbon [6].

Aux États-Unis, un peu moins de 50 % des cendres volantes siliceuses sont recyclées en substitution aux pouzzolanes pour produire du ciment hydraulique ou en remplacement total ou partiel du ciment Portland dans la production de béton dits ternaires ou quaternaires [7].



Figure 1 : Cendres volantes siliceuses (V), source [8]

Les cendres volantes siliceuses sont composées de silicates, d'aluminates, et d'oxydes de fer en proportions dépendantes de leur origine [9].

**Les cendres siliceuses ont des propriétés pouzzolaniques.** Elles ne nécessitent qu'un agent de cimentation pour réagir et produire des composés cimentaires [5]. Ce sont celles-ci qui sont abondantes et considérées dans la suite de ce document.

Les cendres calciques peuvent posséder des propriétés hydrauliques et pouzzolaniques. En présence d'eau, elles durcissent et forment un substrat qui se renforce avec le temps par cristallisation [5].

**Les cendres volantes siliceuses sont utilisées soit comme un constituant apportant la résistance du mélange ou introduites comme une addition minérale dans le béton en tant que filler [12].**

La perte au feu et l'expansion en présence d'eau des cendres volantes siliceuses sont deux éléments déterminants dans le choix d'une formulation à base de ce constituant [5].

**Aussi, la probable diminution de la production de charbon dans le monde entraînera une disponibilité des cendres volantes de moins en moins importante.**

## 2.2 - Laitiers de haut fourneau (S)

Chaque année, la production mondiale d'acier à partir de minerai de fer génère dans les hauts fourneaux environ 400 millions de tonnes de laitiers (résidu inutile aux aciéristes). Cela représente donc environ 10 % de la masse de ciment produite dans le monde [1]. En France, plus de 90 % (en masse) de la production de laitiers de haut fourneau serait réutilisée [10].

Isolés, rejetés de la fonte liquide par flottation, et refroidis brutalement, ils se révèlent être un excellent moyen de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la production de ciment.



Figure 2 : Laitiers de haut fourneau (S) à gauche et un ciment Portland à droite, source [11]

Les laitiers de haut fourneau sont composés de chaux, de silicates, d'aluminates, et de magnésie en proportion dépendantes de leur origine [4].

**Les laitiers de haut fourneau nécessitent une activation par la portlandite pour durcir en présence d'eau.** Sans activation, la prise du béton est lente et ne respecte pas les standards actuels permettant de construire rapidement. Par ailleurs, les laitiers de haut fourneau confèrent aux ciments en contenant une stabilité accrue aux agents chimiques agressifs. **Une fois broyés finement ils peuvent être un constituant important du ciment ou être introduits comme addition minérale dans le béton [12].**

Les bétons employant ces types de ciment sont **sensibles à la dessiccation** : il faut les maintenir humides pendant le durcissement. Le ralentissement de la vitesse d'hydratation par le froid est plus important qu'avec les ciments Portland [12].

La recherche tente par ailleurs d'utiliser cette ressource comme granulat pour le béton dans l'objectif de limiter l'utilisation de ressource naturelle. L'objectif n'étant pas lié aux émissions de carbone, cet aspect n'est pas étudié dans le cadre de ce document.

De plus, les architectes utilisent parfois les laitiers de haut fourneau car leur teinte claire éclaircit le béton à terme (figure 2), en effet ils contiennent moins de fer que le ciment type Portland dont la teinte grise provient de ces oxydes de fer.

### 2.3 - Fumées de silice (D)

Les fumées de silice sont des déchets de la métallurgie du silicium. Elles se présentent sous forme de particules très fines. **Leur surface spécifique est donc très grande. Elles ont des propriétés pouzzolaniques [5].**

C'est pour cela qu'elles représentent une solution de **remplacement du clinker** dans les ciments Portland (cela nécessite d'ajouter des super-plastifiants) **ou** qu'elles sont utilisées aussi comme un **filler dans le béton**. Elles peuvent être utilisées dans leur état d'origine, ou traitées avant utilisation [5].

La surface spécifique des fumées de silice et la perte au feu sont deux paramètres déterminants dans le choix d'une formulation à base de ce constituant [5].

## 2.4 - Utilisation - norme EN-197-1

La norme EN-197-1 définit un matériau comme constituant principal d'un ciment lorsqu'il représente une proportion supérieure à 5 % en masse de la somme des constituants principaux et secondaires [5].

Le tableau 1 explicite les dénominations de la norme dans le cas où les matériaux cimentaires supplémentaires appartiennent aux constituants principaux. Les taux de substitution du clinker (K) sont donnés en pourcentage massique.

Type de ciment	Nom des ciments	V	S	D	K
CEM I	Ciment Portland	-	-	-	95 à 100 %
CEM II	Ciment Portland composé	6 à 35 %	6 à 35 %	6 à 10 %	65 à 94 %
CEM III	Ciment de haut fourneau	-	<b>39 à 95 %</b>	-	5 à 64 %
CEM IV	Ciment pouzzolanique	11 à 55 %	-	11 à 55 %	45 à 89 %
CEM V	Ciment composé	18 à 49 %	18 à 49 %	-	20 à 64 %

Tableau 1 : Composition des différents ciments CEM, source [5]

Les ciments CEM I, II et III sont ceux classiquement utilisés pour faire du béton armé ou du béton précontraint.

## 3 – Empreinte carbone

### 3.1 - Réduction des émissions de dioxyde de carbone

L'objectif premier est évidemment de diminuer les émissions de gaz à effet de serre lors de la fabrication du ciment.

Constituants	Émissions de GES en $\text{teqCO}_2.\text{t}^{-1}$	Émissions de GES en %
K	0,90	0 %
V	0,03	97 %
S	0,02	98 %

Tableau 2 : Réduction de gaz à effet de serre des matériaux cimentaires lors de leur production, source [1]

Les émissions de gaz à effet de serre de ces deux matériaux cimentaires supplémentaires sont donc considérablement moindres (tableau 2).

Ciment utilisé - 25 MPa	Réduction des GES émis en %
100 % K	0 %
25 % V	13 %
40 % S	22 %

Tableau 3 : Réduction des émissions de gaz à effet de serre pour un ciment - objectif de 25 MPa, source [1]

Ciment utilisé - 32 MPa	Réduction des GES émis en %
100 % K	0 %
25 % V	15 %
40 % S	22 %

Tableau 4 : Réduction des émissions de gaz à effet de serre pour un ciment - objectif de 32 MPa, source [1]

Les tableaux 3 et 4 explicitent les gains obtenus pour quatre ciments usuels. Les résultats de ces tableaux démontrent aussi que la **réduction des émissions de gaz à effet de serre est à considérer en fonction des propriétés recherchées** pour le béton (en particulier de la résistance en compression).

Enfin, alors que les laitiers de haut fourneau ont un facteur d'émission plus important que les cendres volantes siliceuses lors de leur fabrication, ils peuvent remplacer une plus grande proportion des ciments Portland, ce qui améliore la réduction des émissions totales de CO<sub>2</sub>.

### 3.2 - Analyse de cycle de vie - des choix politiques et économiques

Il faut garder à l'esprit que **l'attribution des impacts environnementaux des sous-produits industriels tels que les matériaux cimentaires supplémentaires est sujette à évolution**.

En effet, les matériaux cimentaires supplémentaires ont, par le passé, été catégorisés comme des déchets dans leur analyse de cycle de vie. Dans ce cas, il est considéré qu'aucune pollution n'est émise lors de leur production (avant de les transformer).

Devenant un enjeu majeur de l'industrie cimentière, ils pourraient dès à présent être caractérisés de sous-produits de leurs industries respectives dans leur analyse de cycle de vie (ACV). Dans ce cas-ci, il serait pris en compte qu'une partie des émissions de gaz à effet de serre de l'industrie dont ils proviennent a pour origine leur production. Ainsi, le bilan carbone des matériaux cimentaires supplémentaires serait bien moins positif.

De plus, les entreprises effectuent l'analyse de cycle de vie de leurs produits en interne ou sous-traitent à une entreprise de leur choix. **La fidélité de ces données est donc discutable**.

## 4 – Modifications des propriétés du béton

### 4.1 - Propriétés améliorées

Les cendres volantes siliceuses ont une résistance finale plus importante et une maniabilité améliorée. Cette dernière caractéristique s'expliquerait par la forme sphérique des particules de cendres volantes siliceuses.

**Les laitiers de haut fourneau sont utilisés dans les ciments notamment en raison des améliorations** qu'ils confèrent aux matériaux de construction à la fois sur leur **résistance finale** (grâce aux CSH) mais aussi sur leur **durabilité** (les pores laissés par l'hydratation du clinker sont comblés par l'hydratation plus lente du laitier). Les formulations contenant de forts taux de substitution de laitiers de haut fourneau sont reconnues pour leur résistance à la pénétration des chlorures externes pouvant conduire à la corrosion. Leurs propriétés de transfert, une plus grande capacité de fixation des chlorures au sein de la matrice cimentaire, et une carbonatation<sup>5</sup> plus faible explique la durabilité des bétons obtenus avec ce type de ciment.

Ils sont donc à privilégier dans les milieux en eaux agressives ou pour les travaux hydrauliques, souterrains, les fondations.

De plus, pour les **ouvrages massifs**, les ciments Portland **dégagent beaucoup de chaleur**. Cette montée en température favorise la formation d'ettringite qui peut provoquer le gonflement du

---

<sup>5</sup> Phénomène à l'origine d'une baisse du pH qui entraîne la corrosion des aciers

béton. Ce phénomène est appelé attaque sulfatique interne<sup>6</sup>. Les ciments CEM II et CEM III sont donc à privilégier.

## 4.2 - Variabilité des matériaux

La figure 3 révèle une variabilité importante des résultats. Le niveau de substitution est parfaitement connu lors de l'expérience. Le gain sur les émissions de dioxyde de carbone est une donnée indépendante des expériences. La variabilité des résultats s'explique donc principalement par la variabilité de la résistance à compression du béton.

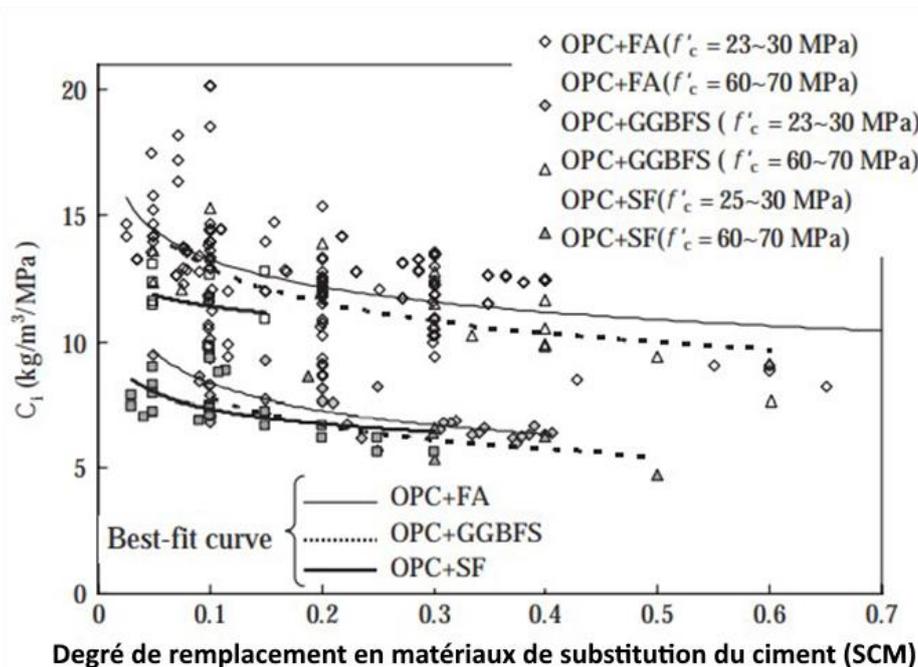


Figure 3 : Intensité de CO<sub>2</sub> en fonction de la résistance du béton, source [1]

OPC : Ciment Portland ordinaire ; FA : Cendres volantes ;

GGBFS : Laitiers granulés broyés finement de haut fourneau ; SF : Fumées de silice

Le tableau 5 illustre la variabilité de la composition chimique des cendres volantes siliceuses.

Origine V	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO
Canada	35 %	10 %	35 %	15 %
France	35 %	12 %	43 %	8 %

Tableau 5 : Exemple de variabilité pour les cendres volantes siliceuses, source [13]

La distribution granulométrique des cendres volantes siliceuses fluctue par exemple en raison de variations dans le broyage du charbon, des performances de la chaudière, ou en raison de conditions différentes de température et de refroidissement [7]. De même, les propriétés des laitiers de haut fourneau fluctuent en fonction de son origine.

Pour être utilisés de manière optimale, ces matériaux doivent alors subir divers contrôles de qualité.

Les formulations composées de ces matériaux ajoutent alors un problème de robustesse. Une solution moderne proposée par la recherche est l'utilisation de « machine learning » pour assister la formulation. L'outil numérique apprendrait au fur et à mesure à ajuster sa formulation pour obtenir les propriétés attendues en fonction des compositions chimiques des constituants, de la

<sup>6</sup> Activation si  $T < 96^\circ\text{C}$  pendant la phase d'hydratation

nature des granulats, de leur forme, de la température et de l'humidité ambiante. Le problème majeur de cette solution est son coût.

De plus, il existe un **décalage entre l'expérience menée dans un laboratoire** où la variabilité des matériaux est faible ou connue **et le milieu industriel** où le volume de matériaux utilisé est important, les provenances sont donc multiples et moins contrôlées. Les résultats issus de la recherche doivent toujours être éprouvés par la production industrielle *in fine*.

### 4.3 - Lenteur de l'hydratation

**De plus, les liants à forte teneur en laitiers de haut fourneau présentent une hydratation plus lente** et donc un développement de leur résistance mécanique moins rapide que celle des ciments Portland [9].

Ceci peut être problématique pour des applications structurelles par exemple. Une faible réactivité à court terme implique un dégagement moindre de chaleur et donc de plus faibles températures dans le béton. Des précautions supplémentaires sont nécessaires pour assurer la cure du béton.

Aussi, les enjeux financiers pour une entreprise sont très importants. Augmenter le temps de durcissement implique de retarder le décoffrage du béton. Le chantier augmente les coûts consécutivement à une augmentation de sa durée.

*La norme EN-197-1 définit la résistance à atteindre à 28 jours comme le critère important de classification des ciments. Néanmoins, les résistances à court terme à 2 jours et à 7 jours sont aussi réglementées [5].*

#### Accélérateurs de durcissement

Afin de corriger la vitesse d'hydratation des liants à base de laitiers de haut fourneau, différents produits dits activateurs ou accélérateurs de durcissement peuvent être ajoutés en quantité très faible. Ils augmentent la vitesse de développement des résistances initiales du béton, avec ou sans modification du temps de prise.

Les activateurs à base de chlorures font partie des solutions les plus courantes et les plus efficaces pour répondre à cet objectif. *Cette technologie est ainsi employée couramment dans de nombreuses formulations commerciales de CEM III [1].*

Néanmoins, l'ajout d'accélérateurs de type chlorures induit des modifications de la microstructure des systèmes qui conduirait à une évolution des propriétés macroscopiques et notamment des propriétés liées à la durabilité [9]. En effet, cet ajout induit la présence de chlorures internes qui peuvent modifier le comportement du béton face aux attaques de chlorures externes.

Ainsi, la lenteur d'hydratation est corrigée par un adjuvant qui provoque d'autres effets secondaires néfastes pour la durabilité. Des études sur la durabilité du béton sont alors nécessaires. Ce raisonnement démontre à quel point il est complexe de réaliser une nouvelle composition de ciment. **Une modification mineure peut engendrer des effets inattendus.**

De plus, le **coût carbone de ces adjuvants** n'est pas négligeable pour un ciment constitué majoritairement de matériaux cimentaires supplémentaires. En effet, pour un des ciments à base de laitiers de haut fourneau proposé par l'entreprise Ecocem, l'adjuvant à base de carbonate de sodium, présent à hauteur de 5 % en masse, représente presque 50 % des émissions de gaz à effet de serre de ce ciment.

## 5 – Conclusion

Cet article montre la diversité des matériaux qui ont été testés en remplacement du clinker pour servir de "colle" aux bétons afin de les rendre moins chers, plus performants d'un point de vue mécanique et durabilité mais surtout en diminuant leur impact environnemental.

La norme EN-197-1 évolue afin de définir de nouveaux ciments plus vertueux et il existe un **réel besoin d'investigation pour s'assurer d'une durabilité** équivalente ou supérieure des structures les utilisant.

## 6 – Glossaire

**Addition minérale** poudre d'origine minérale ajoutée au béton pour modifier certaines de ses propriétés. Les additions sont classées en deux types : les additions quasiment inertes (I) ; les additions à caractère pouzzolanique ou hydraulique lentes (II). [12]. 3,4

**Ciments Portland** liants hydrauliques composés de 95% de clinker composé notamment de silicates de calcium responsables de sa prise et de son durcissement. Sa réaction avec de l'eau (hydratation) produit de la portlandite qui donne son pH basique à la solution interstitielle contenue dans les pores de la pâte de ciment hydratée. 1,4,6,8

**Clinker** constituant du ciment Portland, il est le résultat de la cuisson d'un mélange composé d'environ 70 % à 80 % de calcaire et de 30 % à 20 % d'aluminosilicates (notamment des argiles apportant silicium, l'aluminium et fer). 1,2,4,5,6,7

**Cure** protection mise en œuvre pour éviter une dessiccation de surface du béton, pour lui assurer une maturation satisfaisante et donc favoriser son bon durcissement. [12]. 8

**Filler** matière minérale, finement divisée (de taille inférieure à 0,063 mm selon la norme NF EN 12620) destinée à remplir les vides laissés par l'empilement granulaire. Leur utilisation dans la formulation des bétons permet d'améliorer les propriétés d'écoulement du béton frais et les résistances mécaniques du béton durci. Elles sont généralement moins coûteuses que les ciments. [11]. 3,4

## 7 – Sigles

**ACV** analyse de cycle de vie. 6

**CO<sub>2</sub>** dioxyde de carbone. 1,3,5,6,7

**D** fumées de silice. 4

**GES** gaz à effet de serre. 5

**K** ciments Portland. 5

**S** laitiers de haut fourneau. 4,6,7

**SCM** (Supplementary Cementitious Material) matériaux cimentaires supplémentaires. 2

**V** cendres volantes siliceuses. 2,3,6,7

## Références :

- [1]: Handbook of Low Carbon Concrete, Ali Nazari et Jay G. Sanjayan, Butterworth-Heinemann, septembre 2016.
- [2]: Béton bas carbone : Introduction aux enjeux modernes de l'industrie du béton, A. Marlot, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/beton-bas-carbone-introdcution-aux-enjeux-modernes-de-lindustrie-du-beton](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/beton-bas-carbone-introdcution-aux-enjeux-modernes-de-lindustrie-du-beton)
- [3]: Béton bas carbone : Béton auto-activés, A. Marlot, X. Jourdain, H. Horsin Molinaro, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/beton-bas-carbone-betons-auto-actives](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/beton-bas-carbone-betons-auto-actives)
- [4]: La durabilité des bétons, A. Vichot, P.-P. Ollivier, Collectif Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC)
- [5]: AFNOR : NF EN 197-1
- [6]: La situation énergétique de l'Australie en 3 grandes données, CDE, février 2018, <https://www.connaissancedesenergies.org/la-situation-energetique-de-laustralie-en-3-grandes-donnees-180226>
- [7]: Cendre volante, Wikipédia, janvier 2021, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre\\_volante](https://fr.wikipedia.org/wiki/Cendre_volante)
- [8]: Les cendres volantes, ACPresse, avril 2019, Section : Savoirs, <https://www.acpresse.fr/les-cendres-volantes/>
- [9]: Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction, Sevket Can Bostanci, Mukesh Limbachiya et Hsein Kew, Journal of Cleaner Production, juillet 2018, [https://www.researchgate.net/publication/324443688\\_Use\\_of\\_Recycled\\_Aggregates\\_for\\_Low\\_Carbon\\_and\\_Cost\\_Effective\\_Concrete\\_Construction](https://www.researchgate.net/publication/324443688_Use_of_Recycled_Aggregates_for_Low_Carbon_and_Cost_Effective_Concrete_Construction)
- [10]: Déchets d'aciérie et fonderie | CD2E, consulté avril 2021
- [11]: Le bilan carbone du laitier de hauts fourneaux, épinglé par l'AFGC, ACPresse, avril 2020, Section : Divers, <https://www.acpresse.fr/bilan-laitier-hauts-fourneaux-epingle-afgc/>
- [12]: La base documentaire de référence sur les ciments et bétons, Infociments, <https://www.infociments.fr/>
- [13]: Webinars Videos Collection - Geopolymer Institute, <https://www.geopolymer.org/conference/webinar/webinars-videos-collection/>
- [a]: La fumée de silice : les origines (1), ACPresse, avril 2019, Section : Savoirs, <https://www.acpresse.fr/la-fumee-de-silice-les-origines/>
- [b]: Formulation d'un béton ordinaire, Hélène HORSIN MOLINARO, Xavier JOURDAIN, octobre 2018, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/formulation-dun-beton-ordinaire](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/formulation-dun-beton-ordinaire)
- [c]: Norme ciment NF EN 197-1 : Composition des ciments courants, Infociments, <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-197-1-composition-des-ciments-courants>
- [d]: INIES Les données environnementales et sanitaires de référence pour la bâtiment, <https://www.inies.fr/accueil/>
- [e]: Fabrication du béton, LAFARGE, février 2016, <https://www.lafarge.fr/fabrication-du-beton>
- [f]: Comment la filière ciment va se décarboner, Le Moniteur, page 4, <https://www.lemoniteur.fr/article/comment-la-filiere-ciment-va-se-decarboner.2146309>
- [g]: Fumée de silice, Wikipédia, novembre 2020, [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fum%C3%A9\\_de\\_silice](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fum%C3%A9_de_silice)

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>