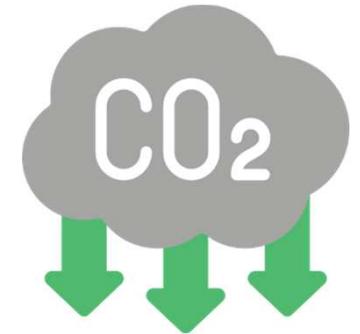


# **Matériau béton :**

*Les enjeux et leviers pour  
atteindre la décarbonation*



**Gabriel SAMSON**  
Enseignant-chercheur  
[samson@insa-toulouse.fr](mailto:samson@insa-toulouse.fr)

## **I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale**

- I.1) Composition, propriétés
- I.2) Contexte normatif (norme EN 206, norme ciment EN 197)
- I.3) Empreinte environnementale

## **II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant**

- II.1) Leviers de réduction
- II.2) Additions minérales
- II.3) Liants alternatifs
- II.4) Captation CO<sub>2</sub> (stockage ou utilisation)

## **III. Déploiement des bétons bas carbone**

- III.1) Approche performantielle - Nouvelle norme béton EN 206+A2/CN (2022)
- III.2) Assurance

## **IV. Conclusions**

## V. Références

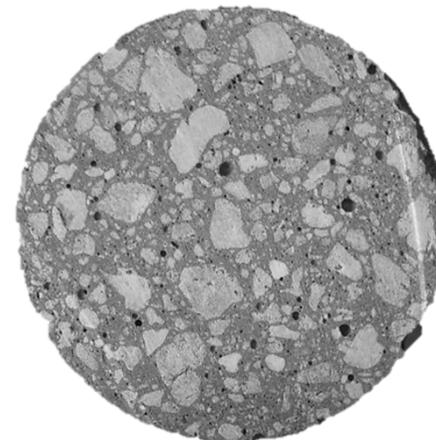
### I.1) Composition, propriétés

#### ■ Béton : mélange de différents constituants

- Ciment
- Granulats (gravier + sable)
- Eau
- Additions
- Adjuvants



- Matériau polyvalent, robuste, bon marché, disponible presque partout
- Matériau poreux (~ 12 à 18%)



# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale

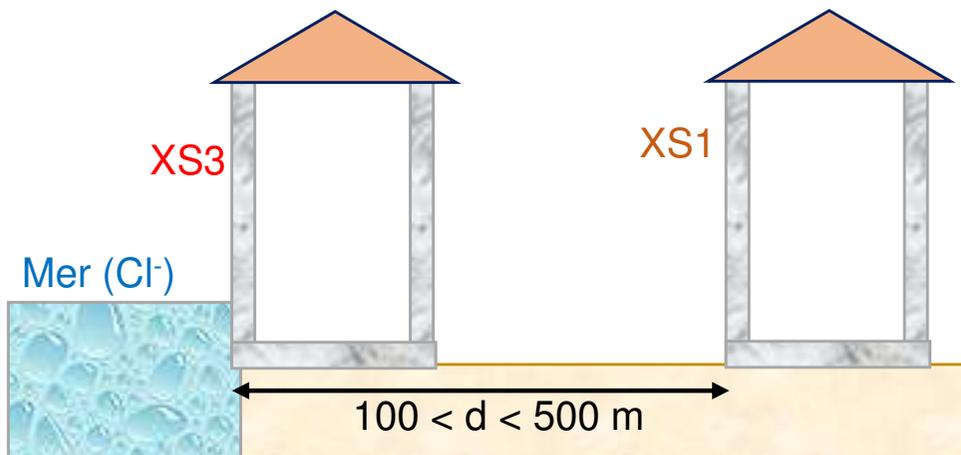
### I.2) Contexte normatif (norme EN 206, norme ciment EN 197)

■ Le béton (armé) peut être altéré par contact avec le milieu environnant

- Corrosion :  $\text{CO}_2$  et  $\text{Cl}^-$  (mer, sel déverglaçage)
- Gel-dégel
- Sulfate, etc...

■ Normes **béton** EN 206-1/CN (2018) introduisent des classes d'exposition par pathologie puis degré d'agressivité qui imposent des paramètres de formulation  
=> **Approche prescriptive**

Exemple (Classe XS :  $\text{Cl}^-$  marin) :



	Rapport E/C max	Dosage min en liant éq. [kg/m <sup>3</sup> ]	Classe de résistance
XS1	0,55	330	C30/37
XS3	0,50	350	C35/45

■ Norme remplacée par EN 206+A2/CN (2022) qui autorise également l'**approche performantielle => partie III**

# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale

### I.2) Contexte normatif (norme EN 206, norme ciment EN 197)

#### ■ Normes ciment : NF EN 197-1 (2012)

#### NF EN 197-5 (2021)

AFNOR le 07/09/2015 à 16:07  
Pour : INSA

NF EN 197-1:2012-04

FA149898

ISSN 0335-3931

norme européenne

NF EN 197-1  
Avril 2012

norme française

Indice de classement : P 15-101-1

ICS : 91.100.10

#### Ciment

Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants

E : Cement — Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements

D : Zement — Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement

#### Norme française homologuée

par décision du Directeur Général d'AFNOR le 14 mars 2012 pour prendre effet le 14 avril 2012.

Remplace les normes homologuées NF EN 197-1, de février 2001 et ses amendements A1, de décembre 2004 et A3, d'avril 2009 et NF EN 197-4 (indice de classement : P 15-101-4), de décembre 2004 qui restent en vigueur jusqu'en juin 2013.

#### Correspondance

La Norme européenne EN 197-1:2011 a le statut d'une norme française.

#### Analyse

Le présent document définit et présente les spécifications de 27 ciments courants différents, de 7 ciments courants résistants aux sulfates, de 3 ciments de haut fourneau différents à faible résistance à court terme, de 2 ciments de haut fourneau à faible résistance à court terme résistants aux sulfates et de leurs constituants. La définition de chaque ciment inclut les proportions dans lesquelles les constituants doivent être associés pour obtenir ces produits différents dans une plage de neuf classes de résistance. La définition inclut également les exigences auxquelles les constituants doivent satisfaire. Il inclut également les exigences mécaniques, physiques et chimiques. Par ailleurs, le présent document établit les critères de conformité et les règles correspondantes. En outre, il est fait référence aux exigences relatives à la durabilité.

ISSN 0335-3931

norme française

NF EN 197-5  
Mai 2021

Indice de classement : P 15-101-5

ICS : 91.100.10

Ciment — Partie 5 : Ciment Portland composé CEM II/C-M et Ciment composé CEM VI

E : Cement — Part 5: Portland-composite cement CEM II/C-M and Composite cement CEM VI

D : Zement — Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI

#### Norme française

homologuée par décision du Directeur Général d'AFNOR en septembre 2021.

#### Correspondance

La Norme européenne EN 197-5:2021 est mise en application avec le statut de norme française par publication d'un texte identique.

La version anglaise de cette norme française a été prépubliée dès que la norme européenne a été disponible, en mai 2021.

#### Résumé

Le présent document traite du ciment Portland composé CEM II-C/M, non couvert par la NF EN 197-1, et d'un nouveau type de ciment composé CEM VI, qui n'est pas non plus couvert par la NF EN 197-1, dont l'usage prévu est la préparation de béton, mortier, coulis, etc.

#### Descripteurs

Thésaurus International Technique : ciment, ciment portland, carbonate de calcium, carbonate de magnésium, oxyde de calcium, oxyde de magnésium, masse, spécification, désignation, composition chimique, clinker, produit laitier, ciment siliceux, pouzzolane, schiste, résistance des matériaux, classe de qualité, essai de conformité, marquage, étiquetage, certification.



# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale

### I.2) Contexte normatif (norme EN 206, norme ciment EN 197)

#### ■ Norme ciment EN 197-1 (2012) :

	CEM I	CEM II A-L	CEM III/A	CEM II A PM-ES	CEM III-B	CEM V/A	CEM II/C-M	CEM VI
<b>Clinker (K)</b>	95-100 %	80-94 %	35-64 %	35-40%	20-34 %	40-64 %	50-64 %	35-49 %
<b>Laitier (S)</b>			36-65 %	60-65%	60-65%	18-30%	36-50 %	31-59 %
<b>Metakoalin (MK)</b>						18-30%	ou 36-50 %	6-20 %
<b>Filler Calcaire (LL)</b>		6-20%					max 20 %	max 20%
<b>Constituants secondaires</b>	0-5 %	0-5 %	0-5 %	0-5 %	0-5 %	0-5 %	0-5 %	0-5 %

#### ■ Norme ciment EN 197-5 (2021) : ciments ternaires

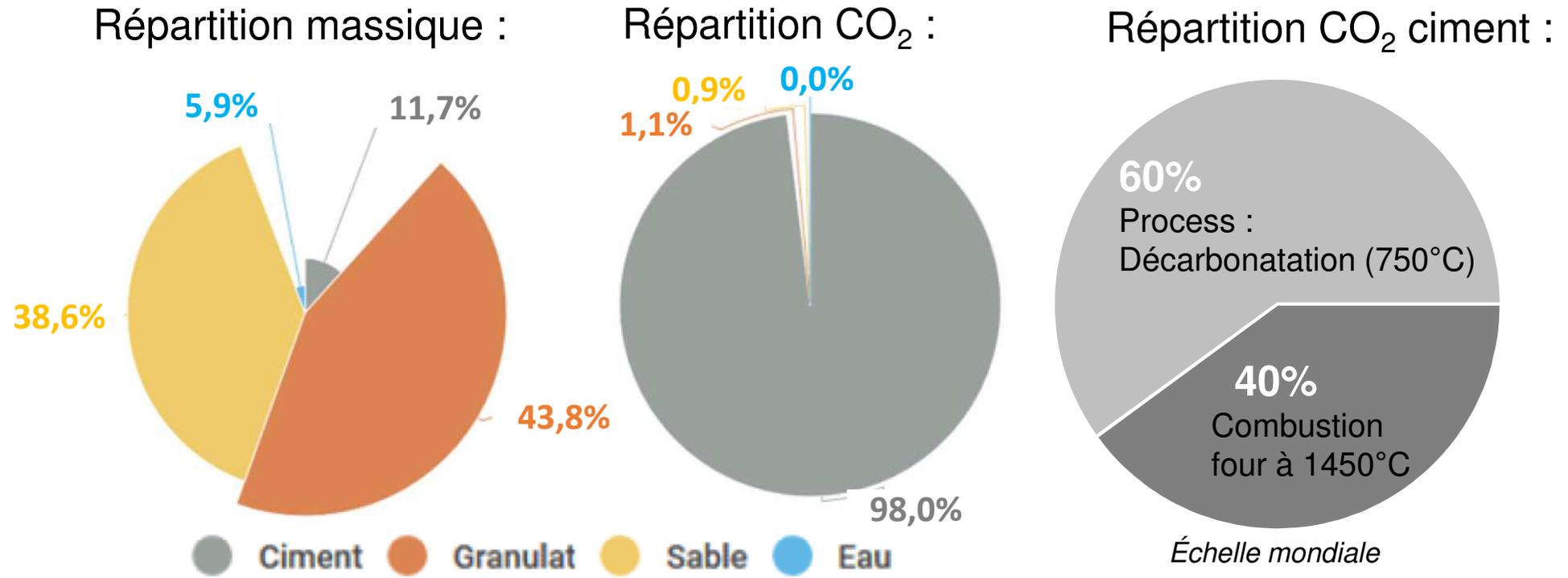
- **CEM II/C-M** : 50 - 64 % clinker
- **CEM VI** : 35 - 49 % clinker

# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale

### I.3) Empreinte environnementale

- Béton = ciment + granulats + sable + eau (+ adjuvant(s) + ajouts)
- CO<sub>2</sub> de la filière béton → filière ciment
- Granulats → épuisement des ressources = meilleur indicateur



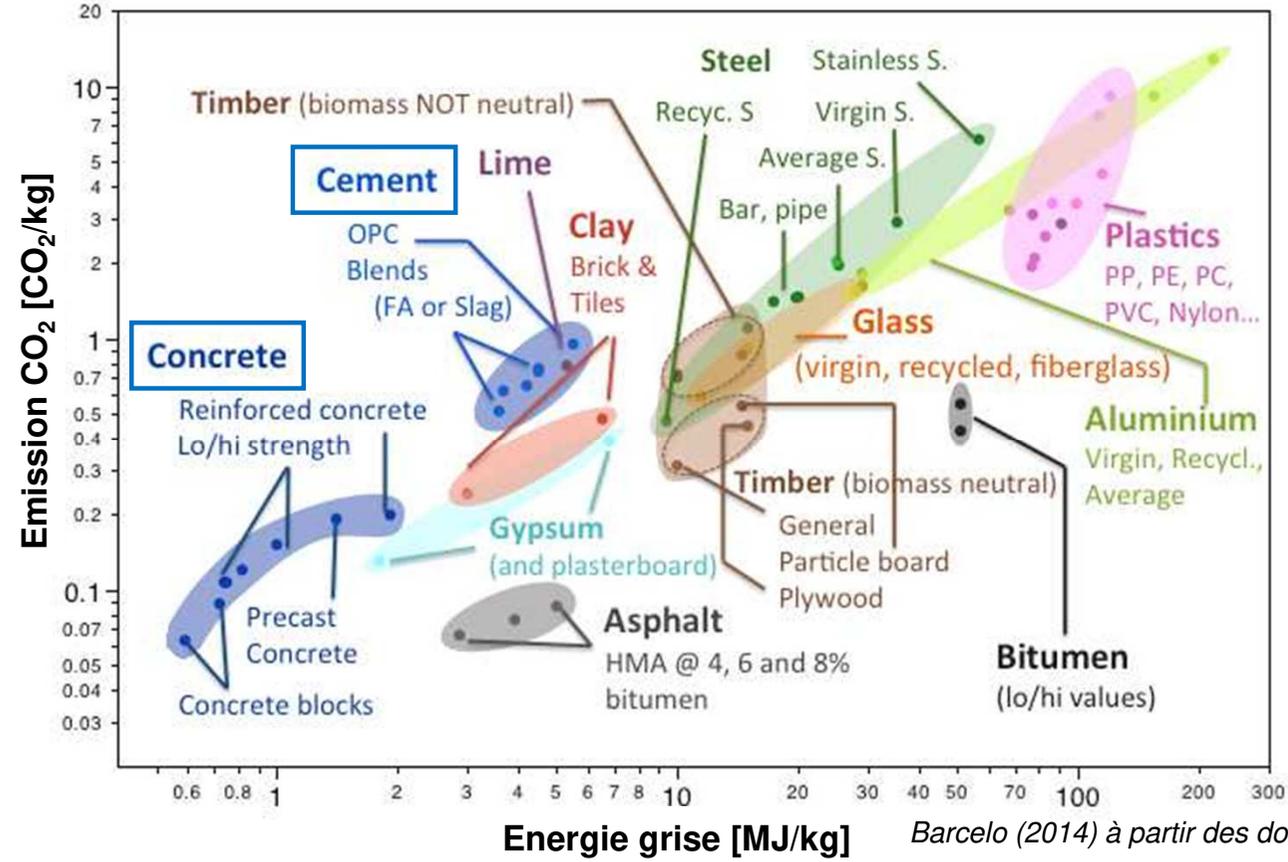
Béton CEM I

Données : ATILH & UNPG – Graphiques : ARTELIA Bâtiments Durables

# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## I. Le béton : propriétés, contexte normatif et empreinte environnementale

### I.3) Empreinte environnementale



- France :
- 20 millions de tonnes de ciment / an
  - Béton ~ 1,6% émissions CO<sub>2</sub>

- Monde :
- 4 milliards de tonnes de ciment /an
  - Béton ~ 7,6% émissions CO<sub>2</sub>

- Le béton est plutôt « écologique », mais c'est le produit manufacturé le plus consommé au monde ! De plus, il est très souvent armé avec de l'acier.
- RE2020 impose une émission maximale /m<sup>2</sup> sur les constructions neuves

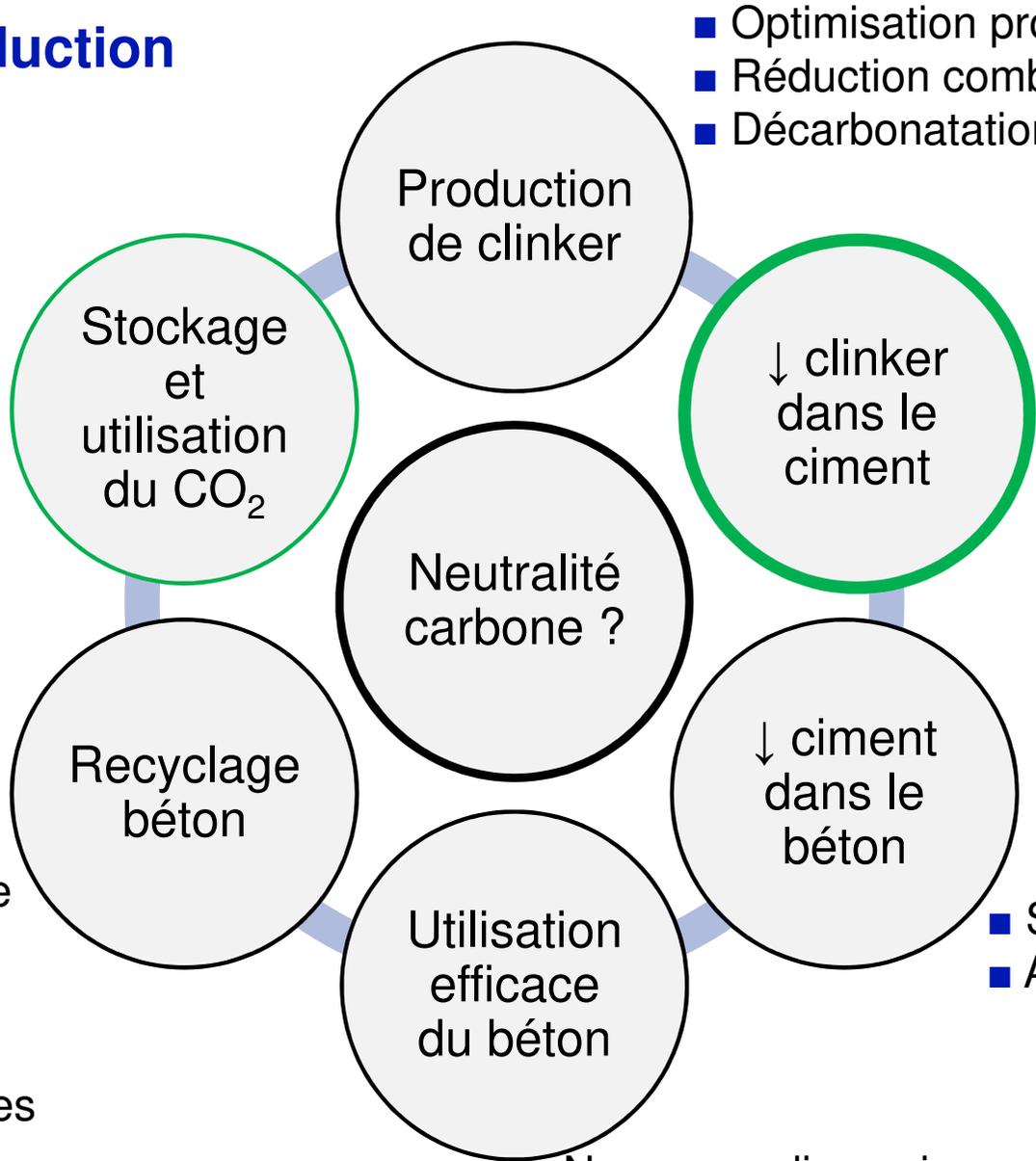
### Béton bas carbone ?

- Pas de définition officielle
- Comparaison souvent faites avec un béton CEM I (même classe résistance)

# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.1) Leviers de réduction



- Optimisation processus
- Réduction combustibles fossiles
- Décarbonation du calcaire inévitable

- Béton : Forte demande en ciment, adjuvant
- Généralement moins bonnes propriétés
- Préservation ressources

- Squelette granulaire
- Adjuvantation

- Ne pas surdimensionner
- Bon béton au bon endroit (classes exposition)
- Autre matériaux (bois)

## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.2) Additions minérales

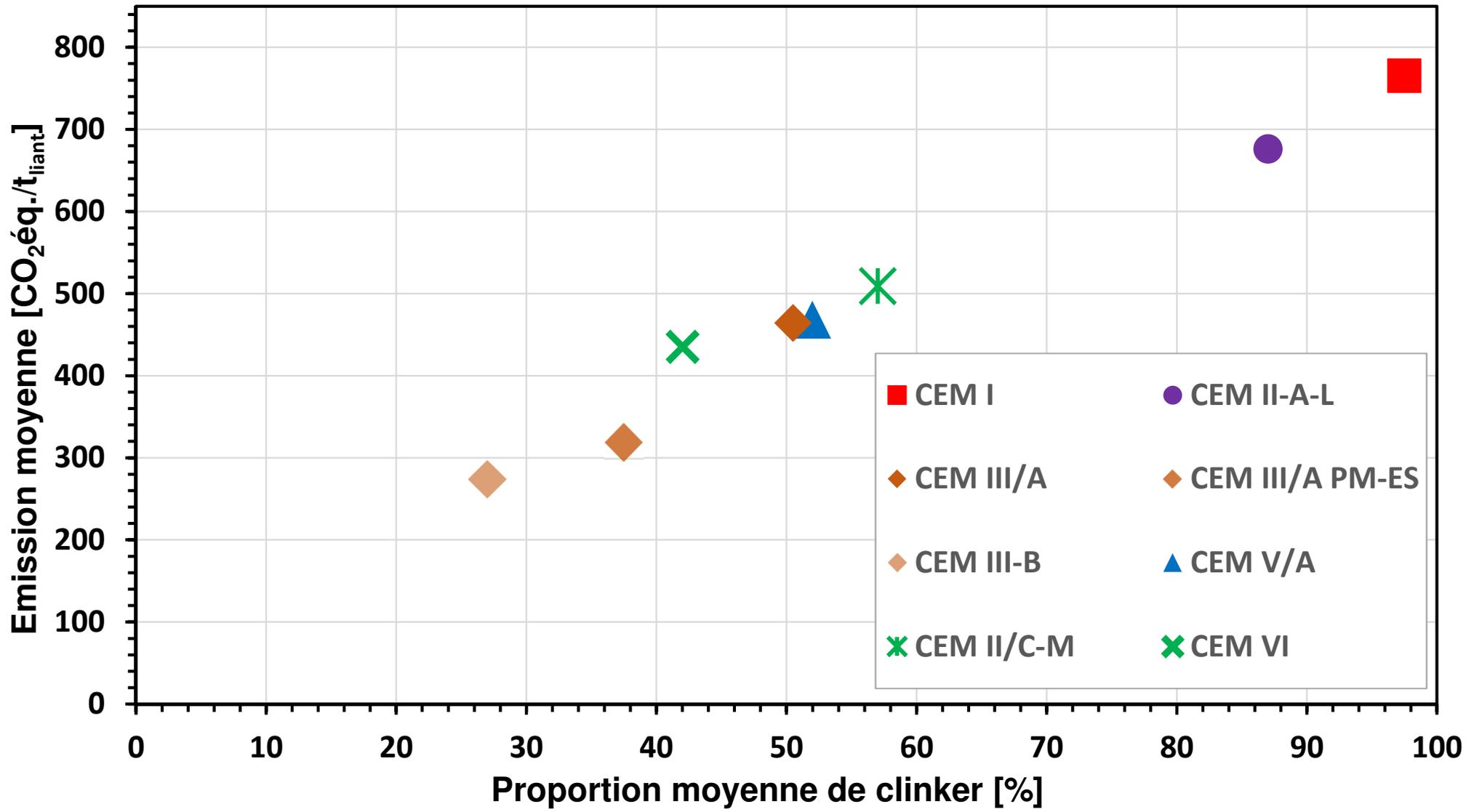
- Économie des matières premières (CEM I : ~ 110 €/t)
- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> (CEM I : **765** kg eq.CO<sub>2</sub>/t)
- Amélioration de certaines performances (état frais et/ou durcis)



Additions	Production	Composition	CO <sub>2</sub> [kg eq.CO <sub>2</sub> /t]	Dispo. ressources	Remarques
<b>Filler calcaire (LL)</b>	Extraction, broyage	CaCO <sub>3</sub> (> 95%)	35	++	Pas de prise hydraulique
<b>Laitier (S)</b>	Co-produit industrie du fer	CaO, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	~ 107	--	Aujourd'hui, environ 8% en masse de la production de ciment
<b>Argile calcinée (MK)</b>	Extraction, calcination (700°C), broyage	SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO	~ 140	++	Pas de prise hydraulique Forte demande en eau
<b>Fumée de silice, cendres volantes</b>	Déchets industrie - centrale thermique	FS : SiO <sub>2</sub> > 85% CV : SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> CaO	~ 140 - 350	---	Pas de prise hydraulique (pouzzolanes) Améliore souvent durabilité

## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.2) Additions minérales



# Matériau béton : Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation

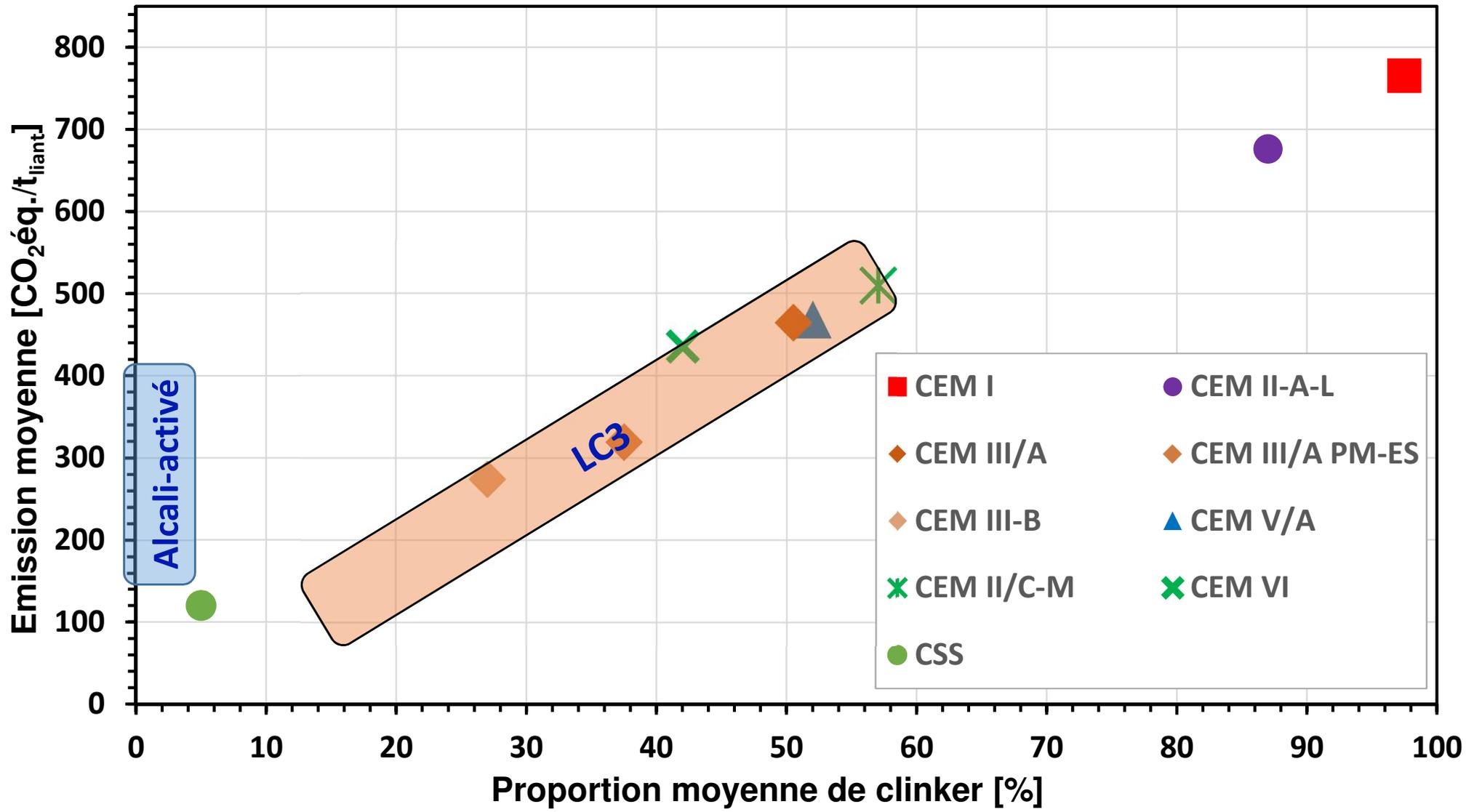
## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.3) Liants alternatifs

Liant	Composition	CO <sub>2</sub> [kg eq.CO <sub>2</sub> /t]	Dispo. ressources	Résistance mécanique		Durabilité		Remarques
				Jeune âge	Long terme	CO <sub>2</sub>	Cl <sup>-</sup>	
<b>LC3</b> (~ CEM II/C-M)	Clinker + MK + filler	250 - 500 +	++	-	++	-	++	50 - 64% clinker : CEM II/C-M EN 206+A2/CN (2022) Sensible T coulage, durée de cure, retrait
<b>CSS</b> Ciment sursulfaté	Laitier (80%) + CaSO <sub>4</sub> + clinker (5%)	100 +++	-	--	++	-	++	Liant normé (EN 15-743) Sensible T coulage Cure thermique ou activateur Carbo. rapide => Corrosion ?
<b>Laitier alcali-activé</b>	+ activateur	150 - 400	-	- à +	++	-	++	Sensible au retrait (cure) Performance méca jeune âge et poids CO <sub>2</sub> dépend de l'activateur. Corrosion ?
<b>MK ou CV alcali-activé</b>	+ activateur	150 - 400	+	- à +	++	-	-	

## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.3) Liants alternatifs



## II. Bétons bas carbone : leviers de réduction avec focus sur le liant

### II.4) Captation CO<sub>2</sub> (stockage ou utilisation)

- Des projets expérimentaux sont en cours pour :

#### Utiliser du CO<sub>2</sub> :

- Granulats recyclés (*Vicat, Holcim : projet Fastcarb*)



Izoret et al. 2022. Impact of Industrial Application of Fast Carbonation of Recycled Concrete Aggregates

- Eléments pavés ou blocs béton (*Solidia, CarbiCrete*)
- BPE (*CarbonCure*)
- Processus à moyen/long terme, assez coûteux, consommateur d'énergie  
→ **Recherches et investissements nécessaires**

#### Stocker du CO<sub>2</sub> :

- Usine production ciment Nordcem Brevik (Suède)

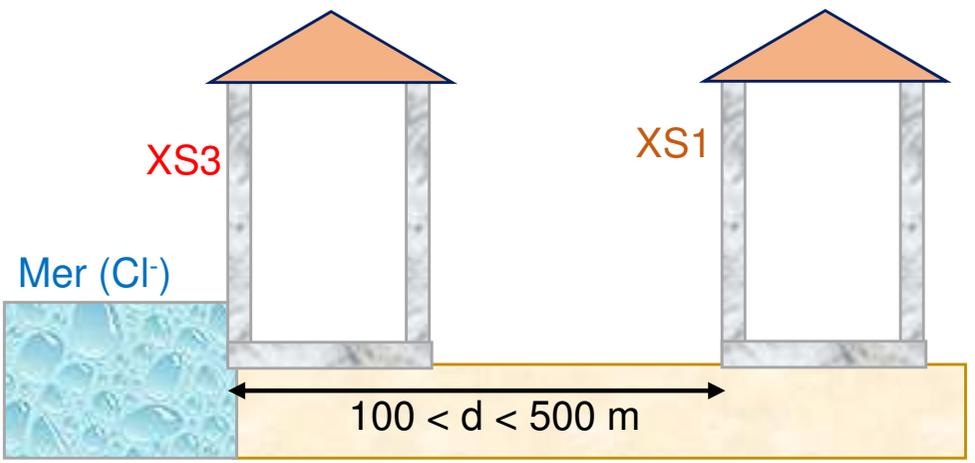
## III. Déploiement des bétons bas carbone

### III.1) Approche performantielle (EN 206+A2/CN (2022))



- Normalisation des essais permettant de qualifier des formulations de béton hors EN 206
- Indicateurs de durabilité
- Optimisation plus poussée de la teneur en clinker

- EN 206+A2/CN (2022) :
  - Augmente % autorisés en granulats recyclés
  - Approche performantielle (FD P18-480)
- Exemple (Classe XS : Cl<sup>-</sup> marin) :



#### ■ EN 206-1/CN (2014) :

	Rapport E/C max	Dosage min en liant éq. [kg/m <sup>3</sup> ]	Classe de résistance
XS1	0,55	330	C30/37
XS3	0,50	350	C35/45

#### ■ EN 206+A2/CN (2022) :

	Classe de résistance	Coeff. de migration Cl <sup>-</sup> max. (50 ans) [x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]	Coeff. de migration Cl <sup>-</sup> max. (100 ans) [x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s]
XS1	C30/37	28	22
XS3m	C35/45	9	9

## III. Déploiement des bétons bas carbone

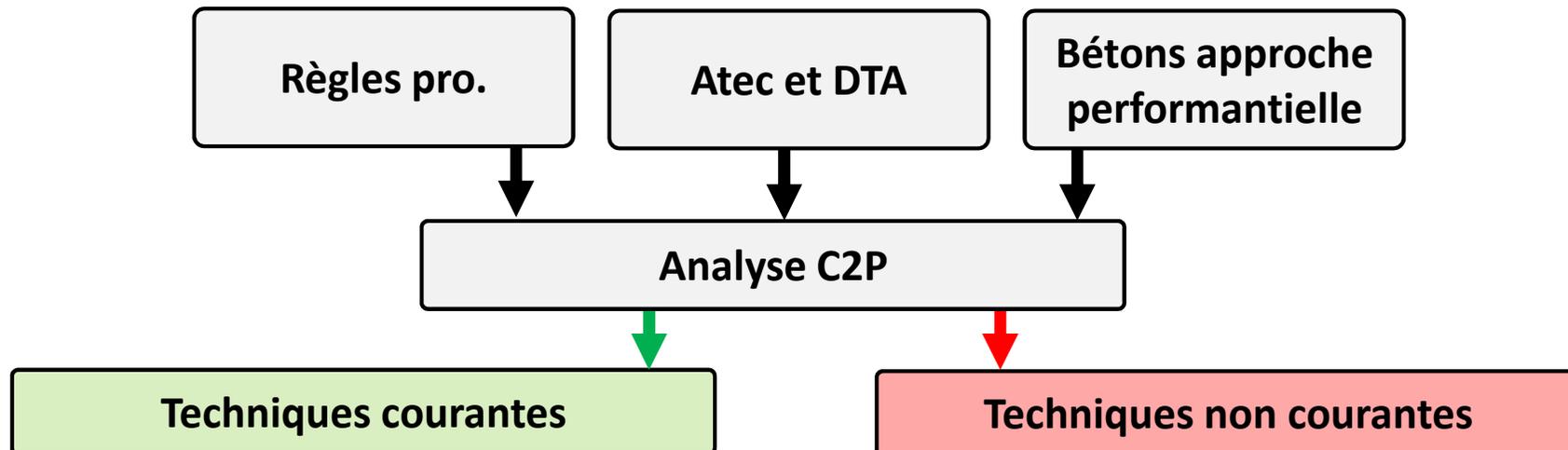
### III.2) Assurances (bâtiment)

- AQC Agence Qualité Constructions et la commission prévention des produits (C2P) se prononce sur la classification des produits et leur assurabilité (Responsabilité Civile Décennale (RCD))

- **Techniques courantes (automatique) :**

- Les produits à base de béton normés (EN 206+A2/CN (2022))
- Documents techniques unifiés (NF DTU)
- ATEX favorable

- Avant l'approche performantielle (FD P 18-480) :



- Validation automatique théorique avec la FD P 18-480 (norme)

## IV. Conclusions

### Bétons bas carbone avec réduction de clinker

- Bétons souvent moins robustes, moins performants à jeune âge, sensible aux conditions de coulage (T, durée de cure), nécessitant plus d'adjuvantation
- Leviers améliorations : finesse, accélérateur prise, cure thermique (préfa)...
- Complexification de la mise en œuvre : **Adaptations des pratiques du GC.**
- Recherches nécessaires (liants bas clinker ou sans clinker...)

### Contexte normatif

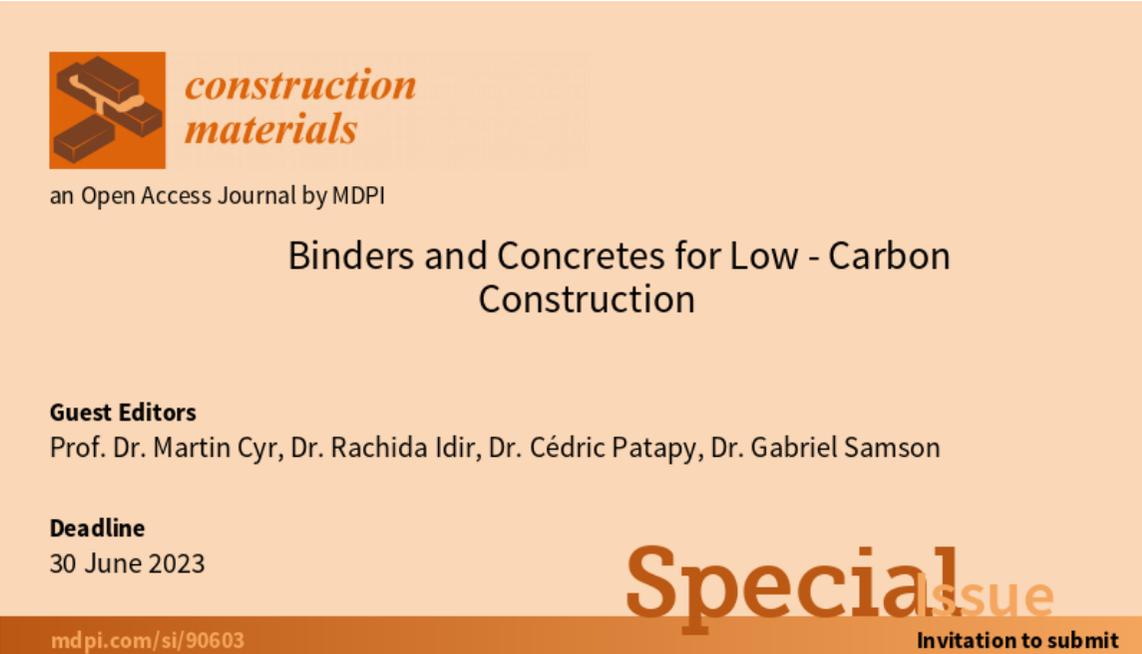
- RE2020 va forcer le passage vers les bétons bas carbone
- EN 206+A2/CN (2022) :
  - Elargissement des bétons « courants »
  - Approche performantielle autorisée (FD P 18-480) => anticipation, coût
- Validation AQP nécessaire : Techniques courantes

### Stockage et utilisation du CO<sub>2</sub>

- Obligatoire pour espérer atteindre la neutralité CO<sub>2</sub>
- Recherches et investissements nécessaires

## ■ Merci pour votre attention

- **Special Issue "Binders and Concretes for Low-Carbon Construction"**
- [https://www.mdpi.com/journal/constrmater/special\\_issues/bindereconcretes\\_low\\_carbon\\_construction](https://www.mdpi.com/journal/constrmater/special_issues/bindereconcretes_low_carbon_construction)
- Soumission jusqu'au 30 juin 2023



 **construction materials**  
an Open Access Journal by MDPI

**Binders and Concretes for Low - Carbon Construction**

**Guest Editors**  
Prof. Dr. Martin Cyr, Dr. Rachida Idir, Dr. Cédric Patapy, Dr. Gabriel Samson

**Deadline**  
30 June 2023

**Special Issue**  
Invitation to submit

[mdpi.com/si/90603](https://www.mdpi.com/si/90603)

# Matériau béton : *Les enjeux et leviers pour atteindre la décarbonation*

## V. Références

- [1] K.L. Scrivener, V.M. John, E.M. Gartner, Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO<sub>2</sub> cement-based materials industry, *Cement and Concrete Research*. 114 (2018) 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>.
- [2] Le vrai du faux béton bas carbone, Elioth. (2020). <https://elioth.com/le-vrai-du-faux-beton-bas-carbone/>
- [3] Béton bas carbone : perspectives et recommandations, Agence Qualité Construction. <https://qualiteconstruction.com/communique-de-presse/beton-bas-carbone-perspectives-recommandations-cp-aqc-09-2021>
- [4] RILEM Association, Cement and CO<sub>2</sub>, the reality by Prof. Karen Scrivener, 2020. <https://www.youtube.com/watch?v=a7fpWA19aYc>
- [5] Norme béton NF EN 206+A2/CN (2022) : méthode de conception performantielle. <https://www.infociments.fr/norme-beton-nf-en-206-cn-methode-de-conception-performantielle>
- [6] Les ciments “bas carbone” : de nouveaux mélanges ternaires, Infociments. <https://www.infociments.fr/ciments/les-ciments-bas-carbone>
- [7] C. Shi, B. Qu, J.L. Provis, Recent progress in low-carbon binders, *Cement and Concrete Research*. 122 (2019) 227–250. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.009>.
- [8] Projet Fastcarb, <https://fastcarb.fr/>.
- [9] Projet National PERFDUB - approche PERFormantielle de la DURabilité des ouvrages en Béton, PERFDUB. <https://www.perfdub.fr>
- [10] Institut de Science des Matériaux, Décarbonation de l'industrie cimentière : les ciments bas carbone - Laurent Izoret (SFIC), 2022. <https://www.youtube.com/watch?v=AYpq2D6nKOM>
- [11] L.-M. Bjerge, P. Brevik, CO<sub>2</sub> Capture in the Cement Industry, Norcem CO<sub>2</sub> Capture Project (Norway), *Energy Procedia*. 63 (2014) 6455–6463. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.11.680>.
- [12] J.S.J. van Deventer, C.E. White, R.J. Myers, A Roadmap for Production of Cement and Concrete with Low-CO<sub>2</sub> Emissions, *Waste Biomass Valor*. 12 (2021) 4745–4775. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01180-5>.
- [13] P.-A. D'argento, La filière béton vers la neutralité carbone, (2022).
- [14] P. Guiraud, Empreinte carbone des ciments. Feuille de route de l'industrie cimentière 2020 2050, (2022).
- [15] J.-M. Torrenti, Vers un béton net-zéro carbone, (2022).
- [16] Ic construction : l'impact carbone des bâtiments, Etude thermique RE 2020. <https://re20-20.fr/ic-construction>
- [17] AQC - Pôle prévention produits, Agence Qualité Construction. <https://qualiteconstruction.com/aqc/nos-missions/pole-prevention-produits>
- [18] L. Barcelo, J. Kline, G. Walenta, E. Gartner, Cement and carbon emissions, *Mater Struct*. 47 (2014) 1055–1065. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0114-5>.
- [19] G. Hammond, C. Jones, F. Lowrie, P. Tse, Building Services Research and Information Association, University of Bath, Embodied carbon: the Inventory of Carbon and Energy (ICE), BSRIA, Bracknell, 2011.
- [20] NF EN 197-1, Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1971/ciment-partie-1-composition-specifications-et-criteres-de-conformite-des-ci/>
- [21] NF EN 197-5, Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-1975/ciment-partie-5-ciment-portland-compose-cem-ii-cm-et-ciment-compose-cem-vi/fa200094/264804>
- [22] NF EN 206/CN, Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-206-cn/beton-specification-performance-production-et-conformite-complement-nationa/fa185553/1463>
- [23] NF EN 206-1/CN, Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-2061-cn/beton-partie-1-specification-performance-production-et-conformite-complemen/fa175964/40292>
- [24] NF EN 206+A2/CN, Afnor EDITIONS. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-206-a2-cn/beton-specification-performance-production-et-conformite-complement-nationa/fa203976/336018>
- [25] Norme FD P18-480 - béton - Justification de la durabilité des ouvrages en béton par méthode performantielle, <https://norminfo.afnor.org/norme/fd-p-18-480/justification-de-la-durabilite-des-ouvrages-en-beton-par-methode-performantielle/195900>