

Le rôle clef des bétons dans la décarbonation de la construction

Laure REGNAUD,

Directrice Fondation Ecole Française du Béton, www.ecole-beton.fr

RESUME Le béton, bien que largement utilisé dans la construction, doit évoluer pour répondre aux enjeux environnementaux. Il représente 30 % de l’empreinte carbone des bâtiments, et la filière s’est engagée à réduire ses émissions de 50 % d’ici 2030 et de 80 % d’ici 2050. Pour atteindre ces objectifs, plusieurs leviers sont mis en œuvre : optimisation des structures et des quantités, formulations bas carbone, amélioration des procédés industriels et cadre réglementaire renforcé avec la RE2020. Tous les acteurs sont impliqués : cimentiers, maîtres d’ouvrage, maîtres d’œuvre et entreprises, chacun jouant un rôle clé. La formation des futurs professionnels et la sensibilisation sont essentielles pour réussir cette transition et bâtir un avenir durable.

Mots-clefs béton, construction, décarbonation, leviers

I. INTRODUCTION

Le secteur de la construction joue un rôle majeur dans la transition environnementale. Il représente environ 33 % des émissions nationales de gaz à effet de serre (GES) en France, une part significative (2%) étant attribuée à la fabrication et l'utilisation du béton. Ce matériau, largement employé pour ses qualités de résistance, de durabilité et de disponibilité, doit évoluer pour répondre aux exigences environnementales actuelles. La réduction de son empreinte carbone, l'optimisation des volumes de béton utilisés et l'intégration de solutions constructives innovantes constituent des axes stratégiques pour une construction plus durable. Par ailleurs, la formation des futurs acteurs de la construction aux nouvelles pratiques et aux nouveaux matériaux est essentielle pour assurer une transition efficace et pérenne.

II. L'IMPACT CARBONE DU BETON DANS LA CONSTRUCTION

1. Le béton, matériau incontournable de la construction

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé au monde, avec une production annuelle de plus de 14 milliards de mètres cubes. Ses performances inégalées en termes de résistance mécanique, de durabilité, d'adaptabilité et de rapidité de mise en œuvre en font un choix privilégié pour les infrastructures et les bâtiments. Sa fabrication repose sur des ressources locales abondantes, ce qui le rend économique et facilement disponible.

Les caractéristiques des bétons sont bien maîtrisées et répondent à un cadre normatif et règlementaire bien établi. Cela en fait un matériau de référence pour les projets soumis à des exigences strictes de sécurité et de performance.

Le béton possède une forte inertie thermique, ce qui permet de réguler les variations de température et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments. Il offre aussi une bonne isolation acoustique, particulièrement dans les logements collectifs et les bâtiments tertiaires. Le béton est incombustible, ce qui le rend très résistant au feu. Il protège les structures contre les incendies et ralentit leur propagation. Il résiste aussi aux catastrophes naturelles (séismes, inondations, tempêtes), ce qui en fait un matériau clé pour les constructions sécurisées.

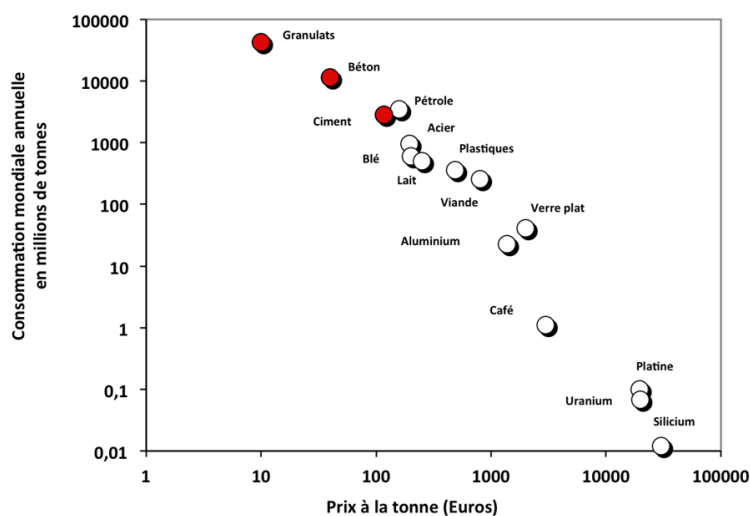


FIGURE 1. Marché mondial de différents matériaux de consommation courants - 2018

En France, environ 50 millions de mètres cubes de béton sont produits chaque année. 82% des logements collectifs et 74% des bâtiments tertiaires sont construits en béton.

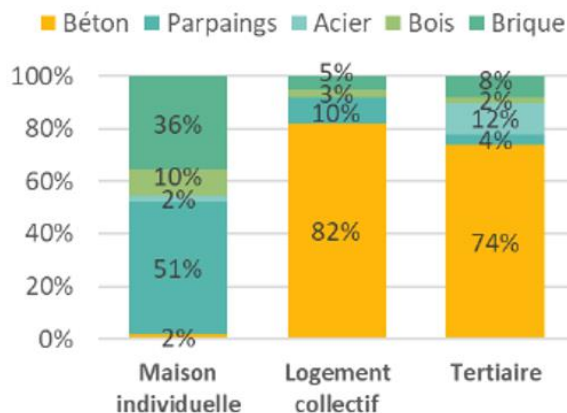


FIGURE 2. : Parts de marchés par modes constructifs en France

2. L’empreinte carbone du béton

L’empreinte carbone du béton non armé provient essentiellement de l’empreinte carbone du ciment qu’il contient. La majorité des bétons coulés sont aujourd’hui armés, avec en moyenne 25 à 40 % d’émissions en plus que le béton non armé liés aux armatures en acier. A titre d’exemple, l’empreinte carbone moyenne d’un béton C25/30 en CEM II-A non armé s’élève à 208 kg/m³, tandis que celle du même béton armé s’élève à 265 kg/m³.

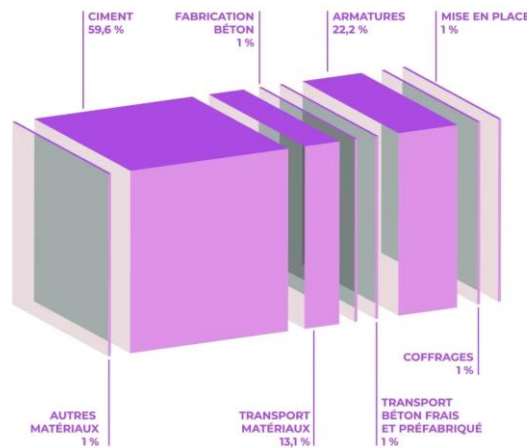


FIGURE 2. Répartition de l’Empreinte carbone du béton armé

L’empreinte carbone du ciment dans le béton est directement liée à sa teneur en clinker, principal composant actif dans son hydratation, et à son dosage dans la formulation de béton.

La fabrication du clinker repose sur la cuisson à très haute température (1450°C) d’un mélange d’argile et de calcaire. Ce processus de cuisson est responsable des émissions de CO₂ à deux niveaux : d’une part, la combustion des combustibles nécessaires à l’alimentation de la flamme génère 40 % des émissions ; d’autre part, la décarbonatation du calcaire en chaux vive qui se produit à plus de 800°C ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) génère 60 % des émissions de CO₂.

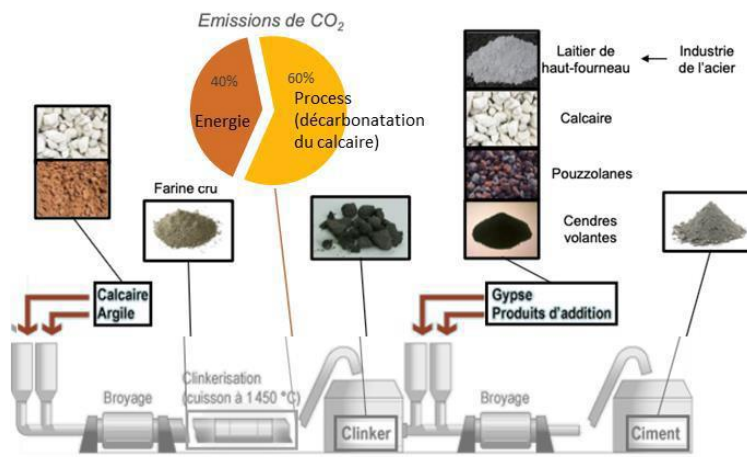


FIGURE 2. Processus de fabrication des ciments

Le clinker est broyé avec du gypse et différents ajouts tels que des calcaires (L, LL), des laitiers de haut fourneau (S), des cendres volantes (V), des pouzzolanes naturelles (P) et calcinées (Q), et du shiste calciné (T) pour produire les différentes compositions des ciments normalisés.

Type de ciment	Désignation	Clinker (%)	Autres constituants principaux (%)	Constituants secondaires (%)
CEM I	Portland	95-100	-	0-5
CEM II/A, B et C	Portland composé	50-94	Laitier/Calcaire/Pouzzolane/Cendre/Shiste : 6-50	0-5
CEM III/A, B et C	Haut fourneau	5-64	Laitier : 36-95	0-5
CEM IV/A, B	Pouzzolanique	45-89	Pouzzolanes : 11-55	0-5
CEM V/A, B	Composé	40-64	Laitier : 18-50, Pouzzolane/Cendre : 18-50	0-5
CEM VI	Composé	35-50	Laitier : 31-50, Pouzzolane/Cendre/Calcaire : 6-20	0-5

FIGURE 3. Compositions des ciments normalisés selon la NF EN 197-1 et la NF EN 197-5

L’empreinte du béton dans un logement collectif (R+4, mode constructif béton) représente environ 30 % de l’empreinte carbone PCE du bâtiment. Les données de l’observatoire E+C- montrent que les lots liés au gros œuvre (fondations, infrastructure et superstructure) – essentiellement du béton et de l’acier, représentent entre 25 et 36% de l’empreinte carbone des bâtiments en structure béton. La production de ciment en France émet environ 10 millions de tonnes de CO₂ par an, ce qui représente environ 3 % des émissions nationales.

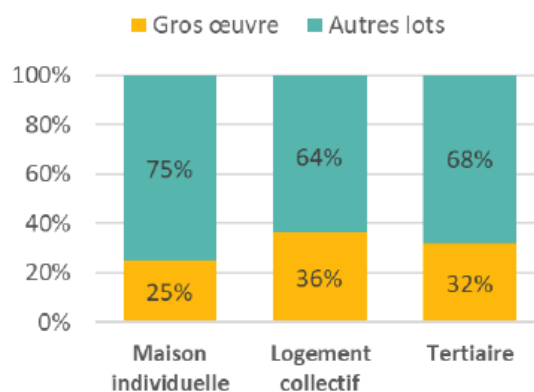


FIGURE 2. Poids carbone des lots du gros œuvre par typologie de bâtiments

3. Un impact global important à réduire fortement

Face à l’urgence climatique, il apparaît donc essentiel de réduire drastiquement l’impact carbone de la construction en béton pour répondre aux objectifs de Neutralité carbone fixés par la loi

Energie-Climat à l'horizon 2050. En agissant sur l'ensemble du cycle de vie du matériau béton et de l'acte de construire il est possible d'imaginer plusieurs routes de réduction.

Afin de répondre aux enjeux de décarbonation, l'ensemble de la filière ciment-béton s'est engagée au niveau français à travers la Stratégie Nationale Bas Carbone, à réduire les émissions du secteur de moitié dès 2030, selon la feuille de route ci-dessous, et à atteindre la neutralité carbone du secteur en 2050 (-80% d'émissions), au travers de différents leviers visant à décarboner le ciment et à décarboner la fabrication du clinker.

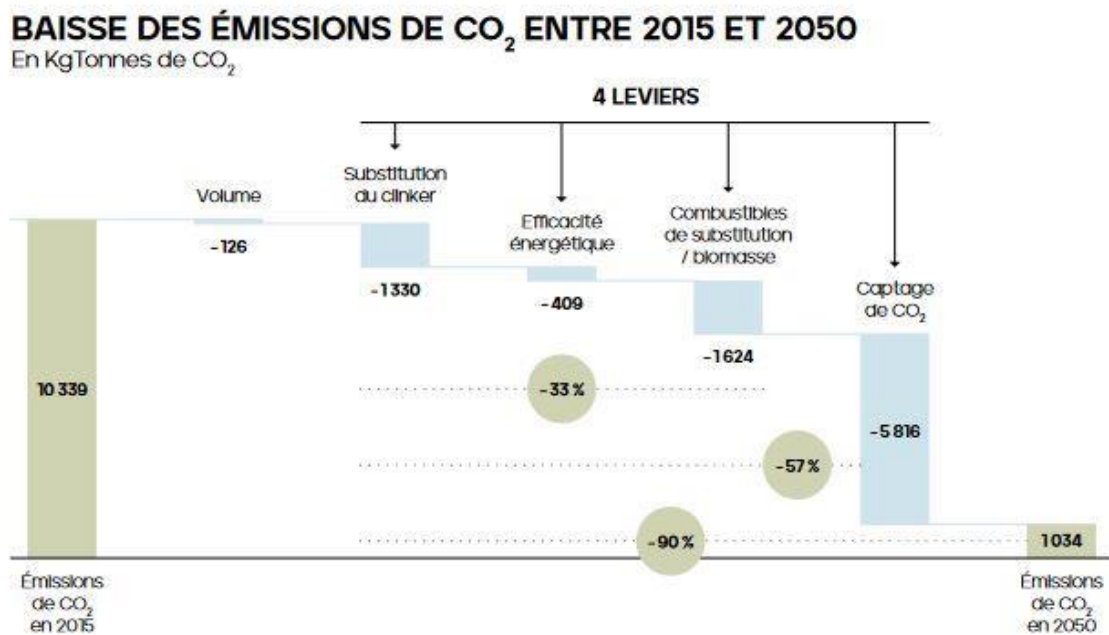


FIGURE 3. Feuille de route de décarbonation à l'horizon 2050 de l'industrie cimentière française

III LES LEVIERS POUR DECARBONER LA CONSTRUCTION EN BETON

1. Optimisation des structures et du dimensionnement

Faire mieux en utilisant moins et de façon plus appropriée le béton

L'optimisation des volumes de béton passe par la réhabilitation des structures existantes, comme le chemisage des poteaux et le renforcement des planchers, pour limiter la construction neuve. Elle repose aussi sur une sélection rigoureuse des matériaux selon leur usage, en appliquant le principe du « bon matériau au bon endroit ». Le développement de solutions en béton décarboné, telles que les dalles alvéolaires, permet de réduire la consommation tout en garantissant de bonnes performances. Enfin, le béton offre une durée de vie très élevée (100 ans), qui permet d'anticiper différents usages et éviter l'obsolescence du bâtiment qui obligera à la déconstruction,

aussi anticiper la réversibilité des structures, avec des systèmes poteau-dalle flexibles par exemple sera un point crucial.

Imaginer des structures innovantes

L'allègement des structures est un levier essentiel pour réduire la quantité de matériaux utilisés. Le recours aux bétons précontraints (jusqu'à 30% de gain en volume), l'exploitation des BFUP, la préfabrication, le développement de l'impression 3D béton et la mixité des systèmes constructifs offrent des solutions prometteuses pour optimiser les ouvrages tout en réduisant leur impact environnemental. Ces nouvelles approches permettent également de rationaliser les processus de construction et de diminuer les déchets produits sur les chantiers.

Optimiser les armatures

L'optimisation des armatures en acier est un levier important de réduction carbone du béton armé. Plusieurs stratégies permettent de diminuer cette empreinte. L'augmentation de la limite d'élasticité de l'acier, par exemple en passant de 500 MPa à 600 MPa, réduit la quantité de matériau nécessaire pour assurer la même résistance structurelle. L'utilisation de coupleurs ou de manchons pour assembler les barres d'armature limite les zones de recouvrement, réduisant ainsi la consommation d'acier. Enfin, l'exploration d'alternatives aux armatures traditionnelles, telles que les fibres ou les armatures composites offre des solutions prometteuses pour alléger l'impact environnemental du béton armé.

2. Formulations Bétons Bas Carbones

Adapter la formulation en fonction de l'usage

L'application du principe du « bon béton au bon endroit » permet d'optimiser la quantité de matériaux utilisés en fonction des exigences spécifiques de chaque projet ou chaque partie de projet. Cette approche évite la surconsommation de ressources et favorise l'emploi de formulations adaptées aux contraintes mécaniques et environnementales des ouvrages. Ce principe consiste à étudier l'exposition des différentes parties du bâtiment, mais également les résistances attendues pour chaque partie, et ainsi choisir la formulation et le dimensionnement optimum. D'autre part, l'adaptabilité aux contraintes du chantier et la disponibilité locale des matériaux sont également des points à étudier.

Développer l'emploi de ciments avec des taux de clinker réduits

L'empreinte carbone des ciments étant quasiment proportionnelle à leur taux de clinker, il semble que l'emploi de ciments normalisés avec des taux réduits de clinker contenant des ajouts minéraux comme les CEM II-B, les CEM III, les CEM IV et les CEM V, ainsi que les nouveaux CEM II-C et CEM VI qui sont en cours de déploiement, soit une nécessité aujourd'hui. Le mix produit actuel entraîne un taux de clinker moyen dans le ciment en France de 75% en 2021, et les objectifs de réduction sont de passer à 68% en 2030 et 62,5% en 2050.

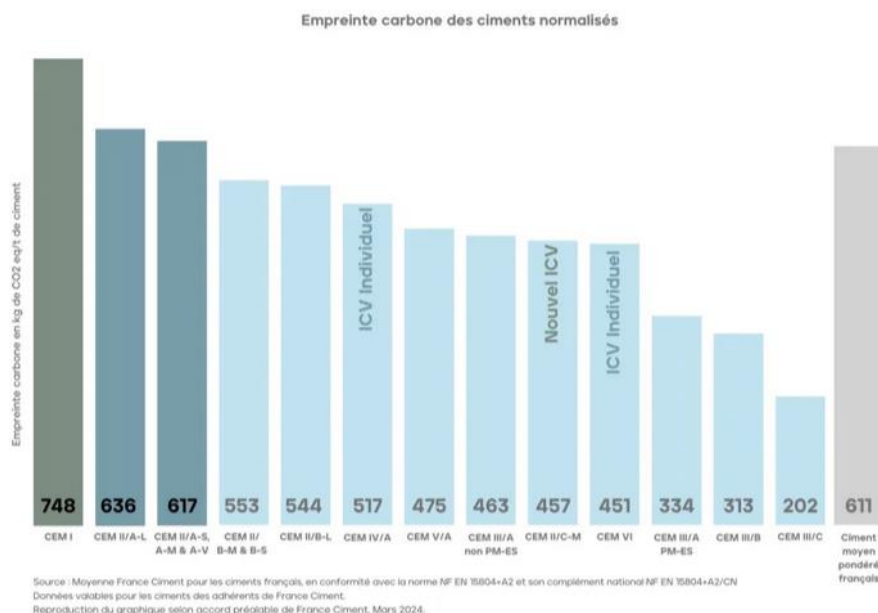


FIGURE 4. Empreinte carbone en kg de CO₂ eq/t de ciment pour chaque ciment normalisé
(Données collectives France Ciment)

Les produits alternatifs issus de la sidérurgie ou des centrales thermiques au charbon sont employés en Europe en substitut au clinker, mais les ressources disponibles décroissent. C'est pourquoi en France, les cimentiers ciblent davantage sur l'emploi des argiles calcinées ou des calcaires broyés finement (fillers calcaires), des matières naturelles très présentes dans notre environnement.

Des technologies de rupture ne contenant pas de clinker comme les géopolymères, qui consistent à activer par un réactif alcalin, un matériau aluminosilicaté telle que du laitier de haut fourneau ou des argiles calcinées sont également en développement.

Optimiser les formulations pour minimiser l'empreinte carbone

L'optimisation des formulations repose sur plusieurs techniques complémentaires. L'empilement granulaire permet de maximiser l'emboîtement des particules, réduisant ainsi la consommation de liant et améliorant la compacité du béton, ce qui renforce sa durabilité. L'approche performantielle, quant à elle, consiste à adapter précisément la formulation en fonction des performances requises (résistance mécanique, durabilité, retrait limité), permettant ainsi une meilleure efficacité des ressources utilisées. Enfin, l'utilisation d'adjuvants innovants, tels que les superplastifiants ou les activateurs de réaction, contribue à améliorer les propriétés mécaniques et la durabilité du béton tout en limitant son empreinte carbone. D'autre part, le recours au recyclage du béton dans le béton et à la carbonatation accélérée sont également des leviers pour réduire l'empreinte environnementale des formulations de béton.

Adapter les pratiques de mise en œuvre

L'adaptation des techniques de mise en œuvre est importante pour garantir le recours à des bétons bas carbone dont la réduction d'émissions de CO₂ est supérieure à 30%.

En effet, pour les bétons bas carbones ayant une réduction inférieure ou égal à 30% environ, leur mise en œuvre reste inchangée. En revanche, au-delà de 30% de réduction, des restrictions d'usage apparaissent, nécessitant un ajustement des temps de décoffrage. En effet, ces bétons sont moins réactifs, ce qui entraîne un retard de prise, notamment par temps froid. Pour pallier cette contrainte, les entreprises travaillent en amont avec les maîtres d'ouvrage afin d'adapter les formulations en fonction des saisons et d'intégrer des équipements spécifiques, tels que des banches chauffantes, pour maintenir leur utilisation en hiver.

D'autre part, l'emploi des bétons bas carbone complexifie la gestion des chantiers : il impose une multiplication des formulations, un pilotage renforcé, un ralentissement des rotations ainsi qu'une formation accrue des équipes. Cette complexité impacte les entreprises de travaux mais aussi les maîtrises d'œuvre, et implique un renforcement de l'ingénierie et des méthodes. Construire bas carbone, c'est construire avec une nouvelle organisation et une nouvelle temporalité.

3. Réduction de l'empreinte carbone du clinker

Substitution des combustibles fossiles et amélioration de l'efficacité énergétique

La réduction des émissions de CO₂ passe d'abord par l'amélioration de l'efficacité énergétique des fours de cuisson, notamment par l'optimisation des processus thermiques et le recours à des technologies de récupération de chaleur. Ainsi un four voie sèche avec un préchauffeur 6 étages, un précalcinateur et un refroidisseur à haute efficacité permet un gain énergétique de l'ordre de 30 % comparativement au procédé voie sèche sans préchauffeur. La modernisation des cimenteries par ces nouveaux procédés est en cours dans la plupart des cimenteries françaises.

Par ailleurs, la substitution des combustibles fossiles comme le coke de pétrole et le charbon utilisés pour alimenter la flamme par des combustibles secondaires comme de la biomasse, et des déchets non recyclable, solides ou liquides (bois, boues, huiles, solvants, pneus, mélanges de plastiques) de la collectivité permet également de limiter l'empreinte carbone du processus. En France actuellement, la part de ces ressources énergétiques secondaires est de plus de 50%, pour une économie de CO₂ d'environ 18%, avec comme objectif de dépasser un taux de substitution de 80% en 2030.

Capture, stockage et valorisation du CO₂ (CCUS)

Le captage, le stockage et la réutilisation du CO₂ constituent un défi majeur pour l'industrie du ciment. En effet, seules ces nouvelles technologies pourront décarboner la partie fatale du CO₂ issue du processus de décarbonatation du calcaire qui représente 60% de son empreinte.

Trois techniques de capture sont actuellement à l'étude par l'industrie cimentière. Le captage du CO₂ par solvant est la technique la plus connue. La fumée produite par l'activité industrielle est captée. L'ajout d'un solvant sépare le CO₂ du reste des composants. Le mélange est chauffé pour ne récupérer que le CO₂. Il est ensuite comprimé, refroidi et enfin liquéfié avant d'être transporté dans des sites de stockage. Le CO₂ capté est ensuite réutilisé (valorisé) ou stocké dans les sols.

Plusieurs projets pilotes au niveau européen visant à développer des solutions de stockage et de revalorisation du CO₂ au niveau des cimenteries sont en cours actuellement. Heidelberg Materials

devrait expédier en 2025 les premières tonnes de dioxyde de carbone captées sur sa cimenterie de Brevik en Norvège. Elles sont destinées à être stockées dans des aquifères salins en mer du Nord.

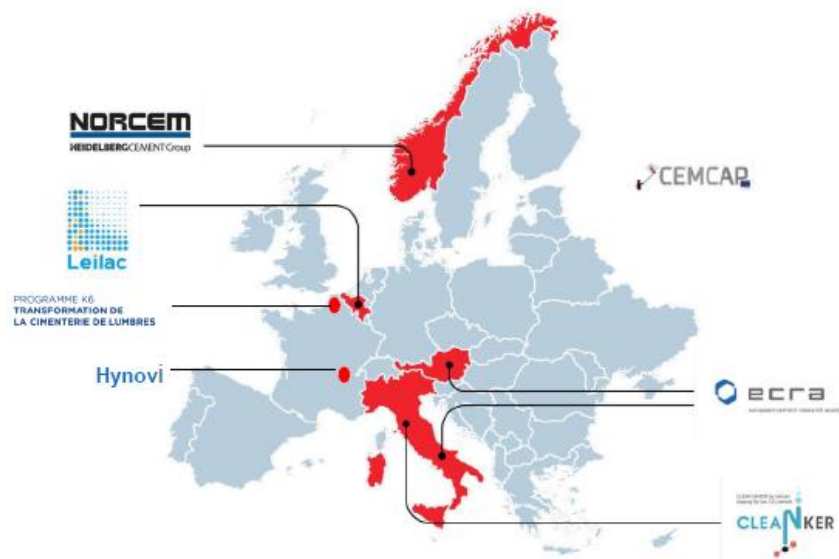


FIGURE 3. Principaux Projets pilotes Européens de CCUS (2024)

Plusieurs voies d'utilisation du CO₂ émis lors de la fabrication du ciment sont explorées :

- les silicates de calcium du ciment peuvent réagir avec le CO₂ pour former des carbonates de calcium. Le procédé consiste à faire durcir le mélange ciment-eau-granulats injecté dans du béton frais en l'exposant à un gaz riche en CO₂.
- un autre procédé consiste à accélérer la carbonatation naturelle des bétons, qui est un processus très lent. Les granulats recyclés, notamment les parties fines, incorporent de la portlandite et des silicates hydratés qui peuvent être carbonatés rapidement. C'est l'objet du Projet National FastCarb.
- des matériaux de construction peuvent être fabriqués à partir de CO₂ et de déchets (scories de fer, cendres volantes de charbon, résidus de bauxite...).
- l'augmentation du rendement des cultures grâce au CO₂ (production d'algues, cultures sous serre...) peut être significative, pouvant aller jusqu'à 25 à 30 %.

L'industrie cimentière française anticipe un plan d'investissement cumulé de plusieurs milliards d'euros d'ici 2040 en vue de se décarboner. Des financements publics sont nécessaires pour les accompagner notamment dans la capture, la valorisation et la séquestration de carbone (CCUS).

4. Un cadre normatif et réglementaire qui évolue

Le cadre normatif et réglementaire de la construction évolue pour accompagner la transition environnementale, en particulier dans le secteur des bétons. En France, l'évolution NF EN 206+A2/CN en 2022 a marqué une avancée majeure en intégrant l'utilisation de granulats recyclés

et de nouveaux ciments décarbonés (CEM II-C et CEM VI) dans le béton. Une nouvelle révision du complément national est en cours et intégrera les performances environnementales des bétons. Parallèlement, des travaux structurants sont menés pour accélérer l'adoption des solutions innovantes bas carbone. À l'échelle européenne, la révision du Règlement Produits de Construction (RPC) vise à aller au-delà des seules performances techniques des matériaux en mettant l'accent sur leur recyclabilité et leur impact environnemental. Sur le plan réglementaire, la RE2020, en vigueur en France, impose des exigences strictes en matière d'empreinte carbone des bâtiments, favorisant ainsi l'emploi de ciments et bétons à faible impact environnemental. Ces évolutions témoignent d'une volonté forte d'adapter les cadres normatifs et réglementaires aux enjeux climatiques, tout en soutenant l'innovation pour une construction plus durable.

IV LA SENSIBILISATION ET LA FORMATION DES FUTURS ACTEURS

La transition environnementale du secteur de la construction repose également sur la sensibilisation et la formation des futurs professionnels. Face aux nouvelles exigences réglementaires et aux défis environnementaux, il est essentiel d'accompagner les acteurs du secteur dans l'acquisition des compétences nécessaires à la conception et à l'utilisation des bétons bas carbone.

L'enseignement et l'intégration des enjeux environnementaux

Les établissements de formation en génie civil et en architecture intègrent de plus en plus les enjeux environnementaux dans leurs cursus. Les programmes pédagogiques évoluent pour inclure des modules dédiés à l'analyse du cycle de vie, aux matériaux alternatifs et aux techniques de construction à faible impact environnemental. L'objectif est de former des ingénieurs et architectes capables de concevoir des bâtiments plus vertueux en réduisant leur empreinte carbone dès la phase de conception et en appliquant une approche multi critères et contextualisée afin de ne pas négliger d'autres aspects fondamentaux tels que la disponibilité des ressources, les impacts sur la biodiversité, ou les contraintes locales.

La formation continue des professionnels

Les acteurs en poste doivent également être formés aux nouvelles pratiques et réglementations. Des formations spécifiques sur la RE2020, les évolutions normatives et les nouvelles solutions constructives sont proposées par divers organismes professionnels et centres techniques. Ces formations permettent aux entreprises du BTP de s'adapter aux évolutions du marché et de garantir la conformité de leurs projets aux exigences environnementales.

Sensibiliser pour mieux construire

La sensibilisation passe aussi par la diffusion des bonnes pratiques auprès des maîtres d'ouvrage, des bureaux d'études et des collectivités. Des outils pédagogiques comme des guides, des webinaires et des plateformes d'échanges permettent de vulgariser les enjeux liés au béton bas carbone et de promouvoir son adoption à grande échelle. En intégrant ces connaissances dès la formation initiale et en accompagnant les professionnels tout au long de leur carrière, le secteur du béton pourra accélérer sa transition vers une construction plus durable et responsable.

V CONCLUSION

Face aux enjeux climatiques, il devient indispensable de transformer nos pratiques à chaque étape de la construction afin de mesurer, optimiser et réduire l'impact environnemental de chaque m³ de béton utilisé. L'optimisation de la conception et l'emploi raisonné des matériaux constituent des leviers essentiels pour atteindre la neutralité carbone. Cette transition impose une mobilisation collective de l'ensemble des acteurs de la filière.

Les cimentiers et fabricants de béton doivent poursuivre la décarbonation de leurs processus, concevoir des ciments alternatifs et accompagner la diminution des quantités mises en œuvre. Leur rôle est aussi d'apporter un soutien technique sur le choix des formulations et leur mise en œuvre.

Les maîtres d'ouvrage ont la responsabilité de préserver les structures existantes et d'optimiser la conception des bâtiments en réduisant les surfaces et en hybridant les usages. Par des pratiques de prescription adaptées, ils doivent valoriser l'économie de matériaux et favoriser le réemploi.

Les maîtres d'œuvre jouent un rôle clé dans l'optimisation du design et des quantités de béton mises en œuvre. Leur mission inclut également le choix judicieux des matériaux, l'analyse des flux de matière et le renforcement de l'ingénierie dès la conception jusqu'au pilotage de l'exécution.

Les entreprises de construction doivent, quant à elles, adopter des solutions bas carbone, optimiser leurs méthodes pour limiter la consommation de matière et réduire les pertes sur les chantiers. L'adaptation des pratiques de mise en œuvre est une nécessité pour répondre aux nouveaux enjeux de la construction durable.

Les enseignants et établissements de formation ont également un rôle déterminant à jouer. En intégrant les enjeux environnementaux dans les cursus d'architecture et de génie civil, ils préparent les futurs professionnels à concevoir et mettre en œuvre les solutions bas carbone.

Seule une action concertée et coordonnée entre tous les acteurs permettra de réduire l'empreinte carbone de la construction en béton et de bâtir un avenir plus durable.

REFERENCES

- F. Dubois (2023). Béton Ecologique et Construction Durable, l'essentiel de ce qu'il faut savoir sur la transition, Editions Eyrolles
- Brief Filière Béton : Les messages clés (2020), Le Hub des prescripteurs bas carbone, Ifpeb, Carbon4
- Livre Blanc : Béton objectif Bas Carbone (2024), Build and Connect
- Agence Qualité Construction, Rapport Bétons bas carbone – Perspectives et recommandations (2021)
- Article Energie plus, « Comment les cimentiers tentent de se bâtir un avenir décarboné » 2024
- Global Cement and Concrete Association (GCCA): gccassociation.org

- Map of Innovation Projet Cembureau : <https://cembureau.eu/innovation/map-of-innovation-projects>
- France Ciment : www.france-ciment.fr
- Cimbeton : www.infociments.fr