

UN CIMENT 100% DÉCARBONÉ EST-IL POSSIBLE ?

Série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes »

À propos de la série « Écosystèmes industriels critiques pour 2035-2050 et technologies sous-jacentes » : issus du séminaire 2024 de l'Académie des technologies, les avis de cette collection proposent une liste (non exhaustive) des technologies et écosystèmes industriels à développer dès maintenant, pour assurer à la France (et l'Europe) la réindustrialisation, la souveraineté et la décarbonation de son économie à l'horizon 2035-2050.

En bref

Le ciment est responsable d'environ 6% des émissions de CO₂ mondiales. La France, malgré son positionnement historique à la pointe du secteur (béton armé, béton précontraint), représente une part marginale de la production mondiale (0,3%). Elle est moins présente au niveau des grands industriels, mais également sur les innovations de rupture, où les Etats-Unis sont à la pointe (remplacement du carbonate de calcium par du silicate de calcium par exemple). Si la réglementation française est reconnue pour son efficacité et permettra une baisse tendancielle des émissions liées au béton, l'État doit également accompagner une réflexion sur l'organisation de la R&D pour le BTP, et participer à identifier les solutions de rupture à soutenir pour une décarbonation plus complète. Enfin, il faudra agir en aval sur le secteur de la construction pour limiter l'usage de béton (construction bois par ex.) ; mais le captage, utilisation et stockage de carbone resteront indispensables pour assurer une décarbonation complète de la production de ciment.

1. Face aux grands enjeux du XXI^e siècle

Le ciment est un liant hydraulique composé en majorité de clinker broyé, le clinker étant obtenu par cuisson à très haute température de calcaire et d'argile. La production annuelle mondiale de ciment de 4,1 Mds de tonnes aujourd'hui va passer à 4,7 Mds en 2050 (source : AIE¹). Les émissions liées à la production du ciment en 2023 étaient de 2,4Gt CO₂, soit 6% des émissions mondiales (37,7Gt CO₂).

Les émissions proviennent donc de deux sources principales :

- La cuisson à 1450°C du clinker (40% des émissions de GES) ;
- La réaction chimique de décarbonatation du calcaire lors de la cuisson (60% des émissions de GES).

Le ciment dit « bas carbone », émet moins de GES pendant sa fabrication que le ciment « traditionnel » (CEM I). Le terme « bas carbone » n'est pas normalisé mais dans la pratique la norme européenne NF EN 197-5 publiée le 1^{er} octobre 2021 par l'AFNOR définit les ciments CEM II/C-M et CEM VI et autorise des ajouts bas carbone dans la composition du ciment².

Les émissions liées au béton sont dues à 98% à la production du ciment qu'il contient.

Même si des alternatives moins émettrices de GES ou moins sujettes au rejet par la société de la bétonnisation assimilée à la destruction de la nature, doivent être recherchées, le béton restera indispensable à l'échelle mondiale. C'est vrai pour le logement des populations mais aussi en particulier pour les grands ouvrages de Génie Civil ou d'infrastructure qui nécessitent des bétons de haute performance.

2. Le positionnement mondial de la France et de l'Europe

La Chine produit 51% du ciment, l'Inde 9%, l'UE un peu moins de 5%. Il est à noter que le ciment, matériau pondéreux et peu coûteux ne se transporte pas sur de longues distances et que la production est largement consommée sur place. En France, par exemple, 90% du ciment consommé est produit localement. On peut distinguer deux grands types d'acteurs.

Les acteurs traditionnels du ciment et du béton. La France a été très bien positionnée historiquement sur le béton, à la pointe d'innovations comme le béton armé ou le béton précontraint. Mais depuis le rachat de Lafarge, il n'y a plus d'entreprises françaises dans les 10 premiers cimentiers mondiaux, et seulement 2 ou 3 européennes (dont Holcim). La France conserve toutefois environ 25 cimenteries. Holcim a conservé sa R&D en France, ce qui est un atout. Vicat est engagée sur certains projets intéressants.

Ces grands acteurs s'intéressent essentiellement pour la décarbonation :

- Aux process liés au chauffage³, point sur lequel l'horizon sans CO₂ est envisageable ;
- A la captation de carbone ;
- Dans une moindre mesure, aux enjeux de chimie liés à la production du clinker par carbonatation de la chaux. Ils ont travaillé sur les substitutions aux clinkers, avec en particulier des ajouts de laitiers de hauts fourneaux⁴, de cendres volantes⁵, qui possèdent des propriétés d'hydraulicité. Compte tenu des évolutions des industries concernées la disponibilité future de ces matériaux en quantité est problématique.

¹ <https://www.iea.org/energy-system/industry/cement>

² Voir informations sur les classes de ciment sur <https://www.infociments.fr/ciments/caracteristiques-et-emplois-des-ciments>

³ Dont à la récupération de chaleur pour réinjection dans le process interne.

⁴ Résidus de production de la fonte composés majoritairement de silicates, d'aluminates et de chaux.

⁵ Déchets de combustion de chaudières à charbon.

Les start-ups qui proposent des innovations de rupture avec du béton « 100% » décarboné. La France est plutôt en retard, malgré l'existence d'Hoffman Green et Materrup (voir plus loin). Les Etats-Unis sont en pointe, avec des start-ups comme Sublime ou Brimstone.

3. Les technologies clés à horizon 2035-2050

Pour limiter les émissions carbone du ciment, la première voie est de diminuer la consommation de ciment en aval, la seconde étant de décarboner la production de ciment.

En aval, pour décarboner la construction, trois voies sont ouvertes aux constructeurs : substituer le béton dans la construction (bois, acier, terre crue) avec des problèmes d'organisation des filières ou l'économiser (conception optimisée), recycler le béton (de façon dégradée par concassage et utilisation sous forme de granulats), et diminuer le dosage de ciment dans le béton en maintenant une résistance suffisante (non traitées dans le présente fiche).

En amont, pour les industriels cimentiers, les voies sont de décarboner l'énergie utilisée dans le process et de diminuer la quantité de clinker dans le ciment grâce à des additions minérales. Toutefois, ces solutions laissent cependant 7Mt de CO₂ à capturer par an en France en 2050 (cf. la feuille de route de décarbonation de l'industrie cimentière 2023, qui structure les actions à mener d'ici 2050 suivant trois scénarios⁶).

Les solutions technologiques de rupture explorées actuellement consistent :

- à remplacer le carbonate de calcium pour fabriquer le clinker par des matériaux sans carbone, comme le silicate de calcium (start-ups américaines Sublime Systems et Brimstone). A noter que Sublime utilise en plus une technologie à base d'électrolyse pour éviter les émissions dues au process (<https://sublime-systems.com/>) ;
- à se passer totalement de clinker en concevant des liants à base de laitiers sidérurgiques, sous réserve d'évaluer la disponibilité future, ou enfin largement à base d'argile, ainsi qu'à l'aide d'adjuvants. Ceci implique de ne pas comptabiliser les émissions de CO₂ de la production des laitiers en les considérant comme un simple déchet, ce qui peut interroger (elles ne sont donc comptées que pour le secteur sidérurgique). Par ailleurs, il convient de diagnostiquer la potentielle nocivité environnementale des adjuvants utilisés pour garantir la résistance du ciment. On peut citer Hoffman Green (laitiers), ou Materrup (argile crue) en France ;
- à combiner le recyclage du béton et la séquestration du CO₂. Citons la solution spécifique de minéralisation du CO₂ par injection dans des granulats de béton de démolition qui est développée par la société suisse Neustark ;
- à ajouter du biochar dans le béton, ce qui permet de bénéficier de l'effet puits de carbone de ce matériau. Cette piste fait l'objet de recherches et d'expérimentations en France (Vicat) et aux Etats-Unis (Université de l'Etat de Washington). – un ajout jusqu'à 5% en masse du ciment paraît acceptable, ce qui pourrait diviser par deux le bilan carbone du béton⁷.

L'Académie des technologies ne se prononce pas à ce stade sur les technologies de rupture les plus prometteuses. Un diagnostic plus précis est à produire.

Cependant, ces solutions ne permettront pas une décarbonation complète de l'ensemble du ciment français, européen et mondial. Les questions de l'accès aux ressources alternatives (type silicate de

⁶ <https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/Priorites-et-actions/Transition-ecologique/feuille-de-route-ciment.pdf>

⁷ Senadheea SS et al., « Application of biochar in concrete – A review », 2023, [disponible en ligne](#) ; Sirico A. et al., « Biochar from wood waste as additive for structural concrete », 2021, [disponible en ligne](#).

calcium), ainsi que celle de la résistance atteignable pour les bétons les plus exigeants (très grands ouvrages en particulier), sont centrales. Le captage du CO₂ sera en conséquence nécessaire.

Le surcoût, d'environ 25% si l'on prend le béton « décarboné » d'Holcim (i.e. moins carboné), est largement acceptable, vue la faible part que représente cette matière première dans la totalité d'un chantier de construction.

4. Les recommandations de l'Académie des technologies

L'importance des émissions carbone de l'industrie cimentière en France, 10Mt par an, même si la part de la France à l'échelle mondiale est faible, justifie que la puissance publique agisse pour diminuer ces émissions par la réglementation et par le soutien à la recherche de solutions de rupture valorisables en France et à l'étranger. Enfin comme la neutralité carbone de l'industrie cimentière ne sera pas accessible d'ici 2050 pour aucun des scénarios de la feuille de route des industries cimentières, les solutions de captage de carbone doivent être soutenues.

En vue de l'atteinte de ces objectifs, l'Académie des technologies recommande :

1- La réduction des émissions liées au process énergétique et à la quantité de clinker peut être assurée par les grands industriels. L'État (au niveau français ou européen) doit se contenter d'agir de manière réglementaire selon une temporalité adaptée. La réglementation doit permettre de créer le marché du ciment « moins carboné »⁸.

Un appui à la constitution d'une filière de récupération des déchets (laitiers notamment) doit être envisagée.

2 – En matière de R&D et de solutions de rupture, une intervention plus directe de l'État doit être visée :

- Au-delà des appuis déjà engagés dans le cadre de Fr2030, une réflexion sur l'organisation de la recherche en France doit être initiée (qui concernerait le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment mais pas uniquement) ;
- La puissance publique doit également élaborer un diagnostic et mettre en place une veille sur les technologies de rupture afin de déterminer les innovations à soutenir et les mécanismes d'aide nécessaires ;
- La puissance publique doit engager une étude sur la disponibilité des matériaux de substitution au calcaire.

3- La promotion des solutions de captage de séquestration et d'utilisation du carbone, en particulier avec des mécanismes d'aide vu les montants très élevés des investissements nécessaires doit être encouragée (un Groupe de Travail de l'Académie des technologies aborde actuellement cette thématique, non spécifique au secteur de la construction).

Vu l'ampleur des enjeux de décarbonation de ce secteur peu visible dans les politiques publiques, le gouvernement français doit s'en saisir pleinement tant en matière de réglementation, de commande publique que de politique d'aide à la recherche.

Auteur principal (liens d'intérêts en relation avec le thème le cas échéant) : François Bertière (Président de Fiminco REIM, société foncière ; 35 ans de carrière dans le groupe Bouygues comme cadre dirigeant puis administrateur ; administrateur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées). L'auteur remercie Laura Cozzi, Dominique Vignon, Bernard Tardieu et Marie-Luce Godinot pour leurs relectures attentives.

⁸ Ce qui implique que l'Europe contrôle les importations de ciments et clinker non ou pas décarbonés.



La déontologie académique exige que tout contributeur à l'élaboration d'un rapport n'apporte au collectif que sa seule expertise, en se gardant de promouvoir tout intérêt personnel, institutionnel ou corporatiste. L'indépendance de nos positions est assurée par le caractère collectif de nos travaux. Ce document a été validé par l'Académie des Technologies selon la procédure disponible sur le site de l'Académie.