



Chimie et habitat

Lycée professionnel

Le béton, hier, aujourd’hui et demain

Éric Bausson

Ce dossier s'appuie sur les conférences de *L. Duveau* « Comment décarboner l'industrie cimentière et gérer le recyclage du béton » et de *R. Mesnil* « L'impression 3D béton : un catalyseur pour l'innovation constructive » lors du colloque « Chimie et habitat » du 05/11/2025.

Programmes spécifiques de **physique-chimie** pour les classes de **première** et de **terminale** Bac professionnel propres aux Groupements de spécialités 3 et 5.

Le groupement 3 rassemble les spécialités du secteur du bâtiment, du bois et de la métallerie.

Le groupement 5 rassemble les spécialités des baccalauréats professionnels mobilisant des compétences professionnelles qui nécessitent de solides connaissances dans le domaine de la chimie. Il réunit les spécialités de secteurs professionnels variés : industrie chimique, bio-industrie, cosmétologie, teinturerie, textiles, plasturgie, esthétique, gestion des pollutions et protection de l'environnement, verrerie, plastique et composite...

MOTS-CLÉS :

ciment, clinker, béton, décarbonation, impression 3D

ANGLE CHOISI :

La population mondiale devant atteindre près de dix milliards d'habitants en 2050, les besoins en matériaux de construction ne peuvent que croître. Mais comment faire face à cette demande importante tout en limitant son impact écologique ?

Photographie de Rome (Italie) avec le dôme du panthéon à gauche. © E. Bausson

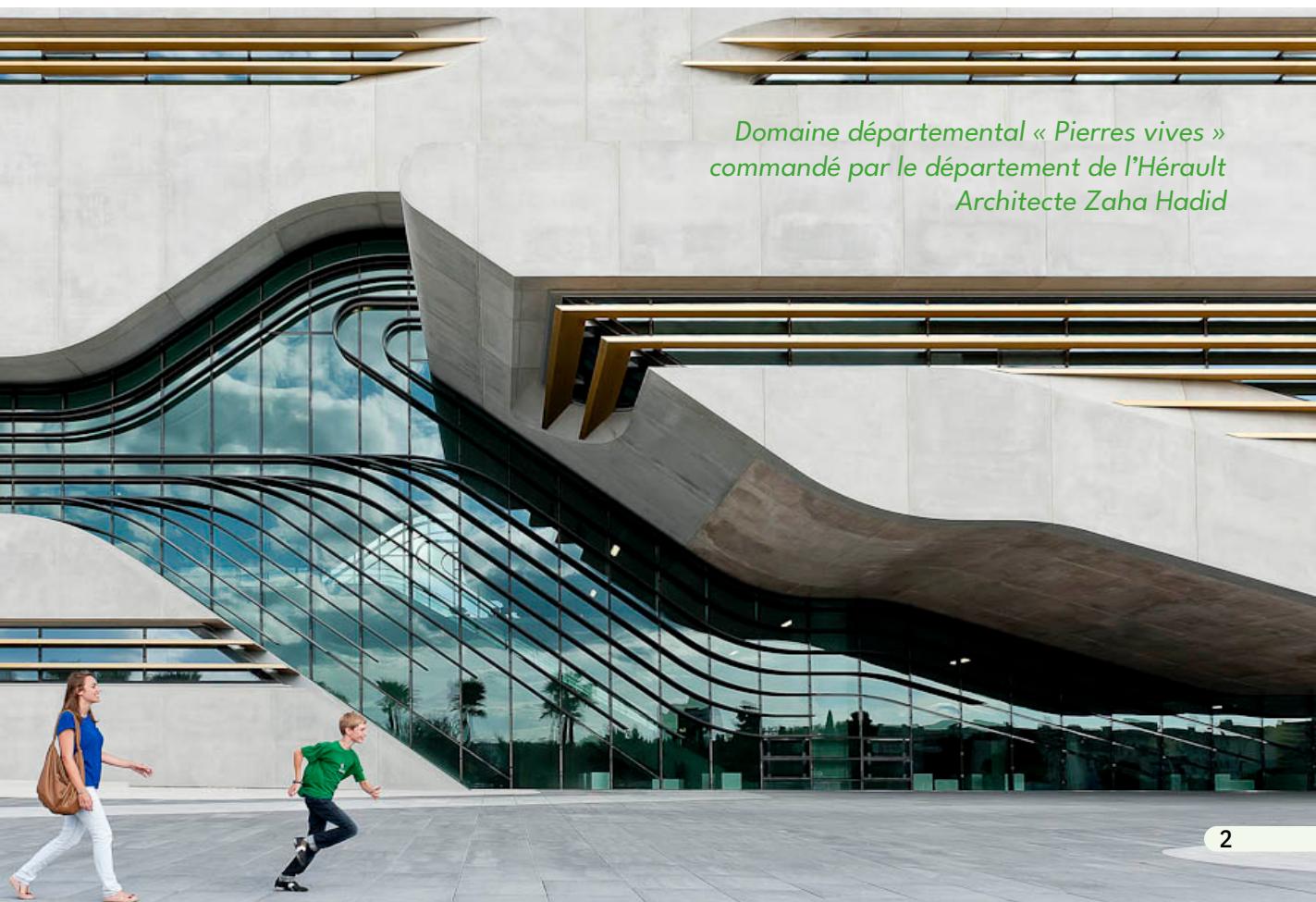


Les architectes du Panthéon à Rome ont modifié l'épaisseur (de 5,9 m à sa base jusqu'à 1,5 m au niveau de l'ouverture ronde supérieure) et la composition du béton sur toute la hauteur du dôme, en le rendant de plus en plus léger de sa base à son sommet. Le béton du bas du dôme, le plus lourd, intègre des morceaux de brique, de basalte et de travertin. En s'élevant dans la coupole, ils ont intégré une roche volcanique poreuse (le tuf) au ciment et dans la partie la plus haute de la coupole, une autre roche volcanique extrêmement légère et très dure, la pierre ponce, l'a remplacé. Ce dôme, de diamètre 43,3 mètres, demeure le plus grand du monde en béton non armé ! Cet édifice construit en 125 après J.-C. ne présente aucun défaut de structure.

A. INTRODUCTION

Depuis l'Antiquité, le béton occupe une place essentielle dans l'histoire de la construction. Les premières traces de son utilisation remontent à plusieurs millénaires, notamment chez les Romains, qui maîtrisaient un béton à base de chaux et de pouzzolane (roche d'origine volcanique). Cette innovation leur a permis de réaliser des ouvrages remarquables, dont le célèbre dôme du Panthéon à Rome, encore intact après près de deux-mille ans, témoignant de la durabilité exceptionnelle de ce matériau. Toutefois, le béton antique présentait des limites mécaniques, en particulier une faible résistance à la traction. Une évolution majeure survient au XIX^e siècle avec l'invention du béton armé, associant le béton à des armatures en acier afin de répondre aux exigences croissantes de la construction moderne. Parallèlement, les progrès de la chimie ont permis d'améliorer les performances du béton grâce à une maîtrise plus fine des proportions de ses composants. Aujourd'hui, de nouvelles technologies comme l'impression 3D béton reposent sur des formulations spécifiques permettant une mise en œuvre couche par couche, offrant une plus grande liberté architecturale, une réduction des déchets et une optimisation des délais de construction. Dans un contexte de transition écologique, la décarbonation du béton constitue désormais un enjeu majeur. Ainsi, l'évolution continue du béton s'inscrit désormais dans une démarche alliant innovation technologique, performance structurelle et responsabilité environnementale. Nous allons développer dans ce dossier tous ces points.

Domaine départemental « Pierres vives »
commandé par le département de l'Hérault
Architecte Zaha Hadid



B. COMMENT FABRIQUE-T-ON DU CIMENT, UN DES COMPOSANTS DU BÉTON ?

Au début du XIX^e siècle, *Louis Vicat* met au point les premiers ciments artificiels en maîtrisant le dosage du calcaire et de l'argile et en identifiant l'importance du chauffage. Cette approche ouvre la voie au ciment Portland, breveté en 1824 par *Joseph Aspdin*, dont le procédé repose sur le chauffage à très haute température, proche de 1 450 °C, d'un mélange finement broyé composé principalement de calcaire (CaCO_3) et d'argiles (sources de silice SiO_2 , d'alumine Al_2O_3 et d'oxydes de fer FeO et Fe_2O_3).

Lors de cette réaction chimique, le calcaire réagit selon l'équation non ajustée suivante :



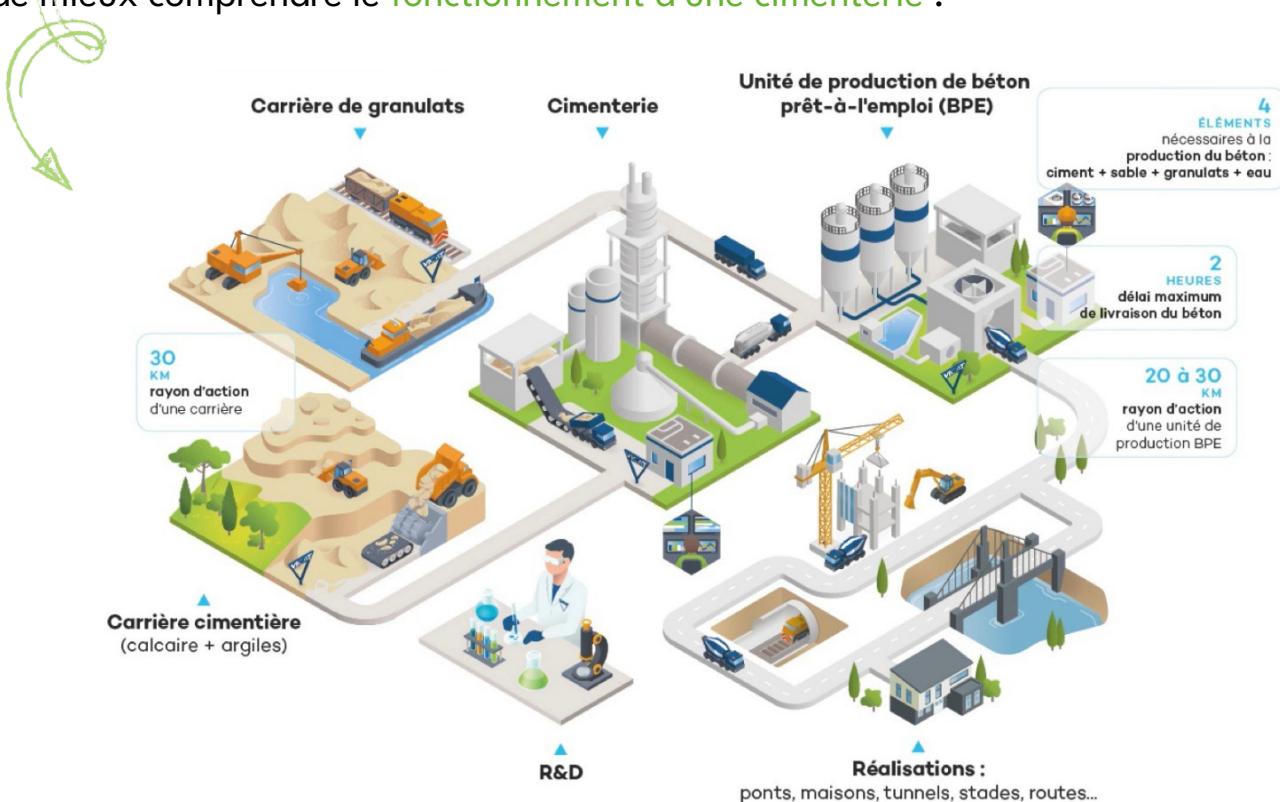
La chaux vive CaO formée réagit avec les oxydes présents dans les argiles pour produire du « **clinker** », contenant les silicates de calcium Ca_2SiO_4 et Ca_3SiO_5 , ainsi que l'aluminate $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ et ferro-aluminate $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$.

Le clinker ainsi obtenu, après refroidissement rapide et broyage avec du gypse (sulfate de calcium hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$), constitue le ciment Portland couramment employé dans le bâtiment et les travaux publics.

Nodules de clinker d'une consistance dure et granuleuse. © BRICS



Voici le schéma présenté par *M. Duveau* lors de sa conférence permettant de mieux comprendre le **fonctionnement d'une cimenterie** :



► 1. Quel est le nombre stœchiométrique lié au dioxyde de carbone CO_2 ?

► 2. Quelle quantité de matière est présente dans une tonne de calcaire ?

Données : $M(\text{Ca}) = 40,1 \text{ g/mol}$; $M(\text{C}) = 12,0 \text{ g/mol}$; $M(\text{O}) = 16,0 \text{ g/mol}$

► 3. En déduire la quantité de matière puis la masse du dioxyde de carbone CO_2 formé lorsque cette tonne de calcaire a totalement réagi.

Les cimenteries sont souvent citées parmi les causes du réchauffement climatique, car elles seules représentent près de 8 % des émissions mondiales de dioxyde de carbone.

► 4. Mise à part l'émission directe de CO_2 liée à la réaction chimique, quelle est l'autre source de CO_2 dans une cimenterie ?

Mais au fait...

de quoi est composé un béton couramment utilisé dans les bâtiments ?

Un béton classique est un matériau composite constitué de quatre éléments principaux, chacun ayant un rôle bien précis :

- Le **ciment** : mélangé à l'eau, il forme une pâte qui durcit et assure la cohésion de l'ensemble.
- L'**eau** : elle permet la réaction chimique d'hydratation du ciment et donne au béton sa maniabilité à l'état frais. Sa quantité doit être contrôlée pour garantir de bonnes résistances mécaniques.
- Les **granulats** : ils représentent environ 70 à 80 % du volume du béton et assurent sa résistance mécanique. Cela peut être du sable (granulats fins) et/ou des graviers ou gravillons (granulats grossiers).
- Les **adjuvants** (facultatifs) : ajoutés en (très) faible quantité, ils permettent de modifier certaines propriétés (fluidité, retardateurs ou accélérateurs de prise, etc.).



Gravier
43 % à 48 %
Ossature résistante Compacité + Maniabilité

Sable
29 % à 35 %

Eau
8 % à 10 %
Liant hydraulique Cohésion puis prise

Ciment
8 % à 16 %
Liant hydraulique Cohésion puis prise

Adjuvant
0,05 % à 0,1 %
Plastifiants Accélérateurs ou retardateurs Entraineurs d'air

+ 1,5 % d'air

Il y a bien sûr de l'air présent dans le béton lors de sa fabrication car le mélange est effectué dans l'air ambiant.

Il vous a été présenté ici le ciment Portland (ciment hydraulique courant) mais il existe d'autres liants hydrauliques qui peuvent le remplacer (fumées de silice, laitiers de haut-fourneau, argiles calcinés, etc.).

C. LA DÉCARBONATION DU CIMENT, EST-CE POSSIBLE ?

Face à l’urgence climatique et aux objectifs de neutralité carbone, la décarbonation du ciment est devenue un enjeu majeur pour l’industrie et la recherche. Elle repose sur plusieurs leviers complémentaires présentés ci-dessous lors de la conférence de *M. Duveau*. Comprendre ces stratégies permet de mesurer les défis technologiques et environnementaux liés à la transition vers une construction plus durable.



Répondre au Q.C.M. ci-dessous sachant qu’au moins une des propositions est juste à chaque fois.

► 1. Quelles actions permettent de réduire directement les émissions liées à la réaction du calcaire CaCO₃ ?

- A. Augmenter le taux de clinker dans les produits cimentiers.
- B. Réduire le taux de clinker dans les produits cimentiers.
- C. Mettre en œuvre de nouvelles méthodes de construction.
- D. Capter le CO₂ en sortie de four.

► 2. Quelle stratégie agit principalement sur la consommation énergétique du procédé ?

- A. Recycler les bétons de déconstruction.
- B. Réduire le taux de clinker.
- C. Substituer les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel) par des sources d’énergie renouvelables.
- D. Capter et stocker le CO₂.

► 3. Quelle action vise à limiter les effets des émissions de CO₂ après leur formation ?

- A. Optimiser l’efficacité énergétique.
- B. Réduire le taux de clinker.
- C. Utiliser des sources d’énergie renouvelables.
- D. Capter, stocker et valoriser le CO₂.

D 4. Quelle solution relève d'une approche d'économie circulaire ?

- A. Produire des ciments bas carbone.
- B. Recycler les bétons de déconstruction.
- C. Substituer les combustibles fossiles.
- D. Optimiser l'efficacité énergétique.

D 5. Quelle affirmation est correcte concernant les émissions de CO₂ du ciment ?

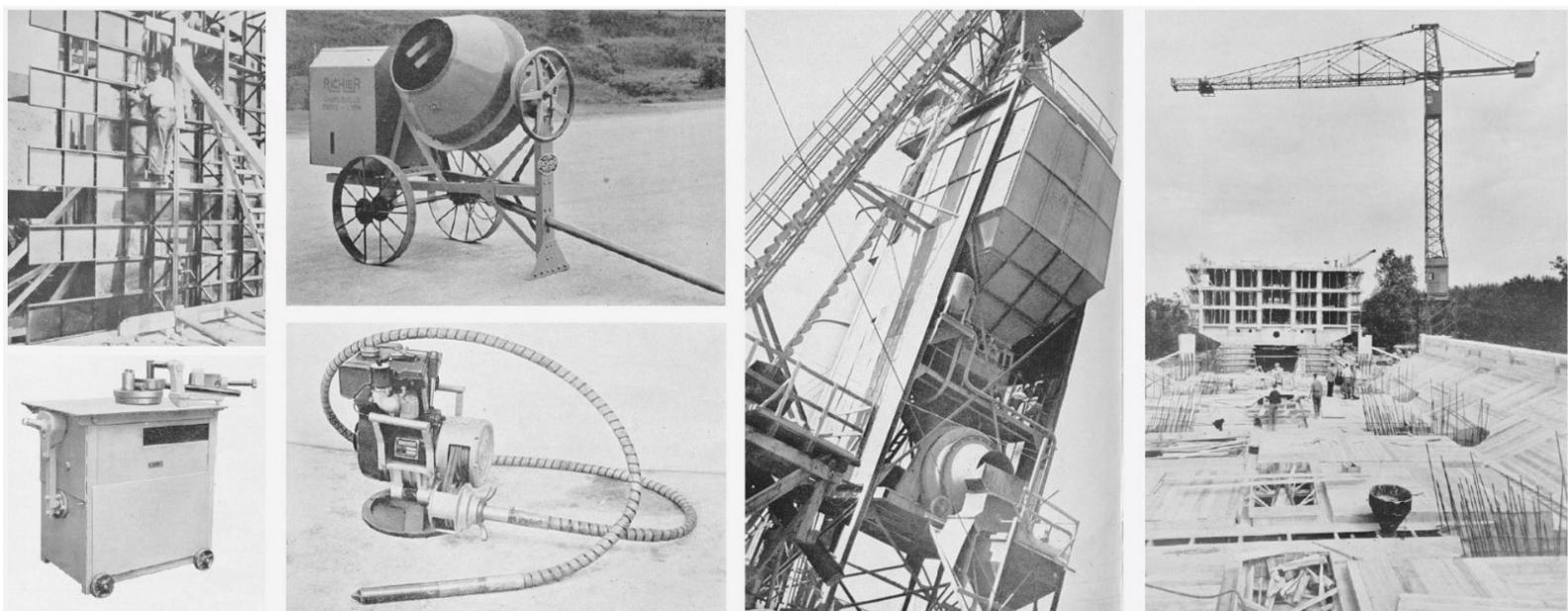
- A. Elles proviennent uniquement de la combustion.
- B. Elles proviennent uniquement de la décomposition du calcaire.
- C. Elles proviennent à la fois de la réaction chimique et de l'énergie utilisée.
- D. Elles peuvent être totalement évitées sans modifier le procédé.

Pour en savoir plus sur la décarbonation du ciment :

« Les industriels à la recherche d'alternatives au clinker, ingrédient peu connu mais très polluant du ciment »
Morgane Anneix et Juliette Laffont (École de journalisme Sciences-Po Paris, finalistes du Grand Prix des Jeunes Journalistes de la Chimie 2024) - Mediachimie 

D. L'IMPRESSION 3D BÉTON, UNE INNOVATION RICHE EN PROMESSES ?

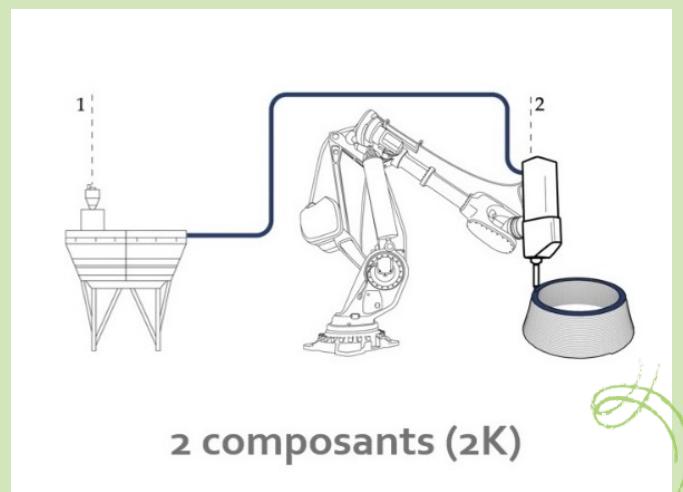
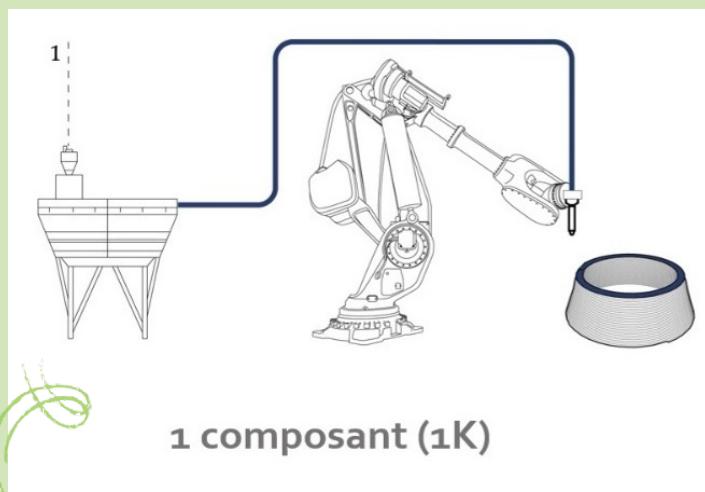
Depuis quelques décennies, les technologies mises en place n'ont guère changé comme le montrent les photographies ci-dessous.



Genouville, Pierre. "1849 - 1949: Cent Ans de Béton Armé. Le Béton Armé, Son Outillage". In: Travaux (194 bis 1949).

Depuis une vingtaine d’années, la recherche innove sans cesse pour le développement des imprimantes 3D béton.

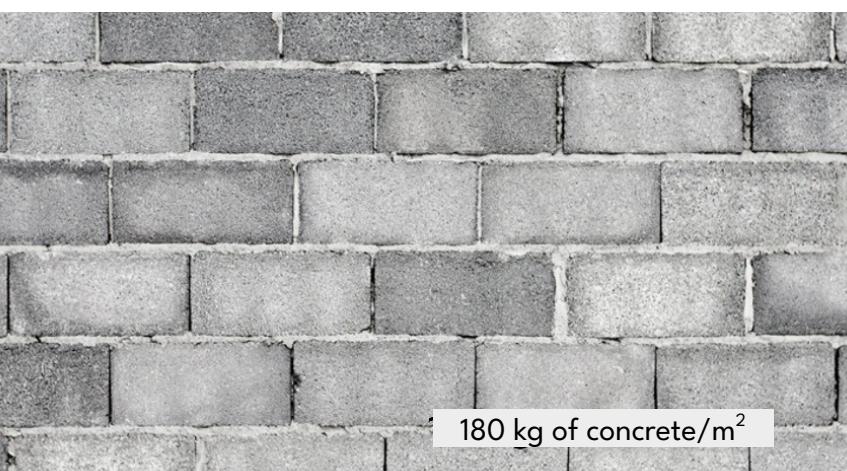
Voici les deux types d’imprimante 3D béton utilisés actuellement :



- celle de gauche : du ciment à prise rapide (10-20 minutes) est utilisé et de faibles quantités de béton sont fabriquées en continu, pompées puis étalées à l'aide d'un bras robotisé programmé ;

- celle de droite : des adjuvants sont ajoutés au ciment pour que la prise ne soit pas trop rapide pour faciliter son pompage. À la sortie du bras robotisé programmé, est ajouté un autre adjuvant pour activer la prise du béton après dépôt.

Nous avons tous vu des résultats d'impression 3D béton (à droite ci-dessous), que nous pouvons comparer à un mur en parpaings (à gauche) avec des masses superficiques passant quasiment du simple au double car elles valent 180 kg/m² pour le mur classique en parpaings à 350 kg/m² pour l'impression 3D béton !



► 1. Ces valeurs de masses surfaciques (en kg/m²) plaident-elles pour l'impression 3D béton ? Justifier.

M. Mesnil nous propose à la fin de sa conférence (↗) après 19'50" « La croisée des chemins » pour nous donner des applications concrètes permettant de répondre aussi aux attentes écologiques.

► 2. Quelles utilisations peut-on faire de ce béton issu de l'impression 3D pour réaliser des économies de béton ?

Mais un des problèmes du béton imprimé, qui n'est pas armé, est qu'il peut casser assez vite sous contrainte mécanique sans se déformer au préalable. C'est donc un risque majeur pour les occupants.

► 3. Que doit-on ajouter pour limiter ce risque ?**E. CONCLUSION**

Le béton demeure un matériau incontournable de la construction moderne, alliant robustesse et coût maîtrisé. Cependant, face aux enjeux environnementaux actuels, il est impératif de repenser ses composants pour réduire drastiquement l'empreinte carbone associée au ciment Portland traditionnel.

Les liants alternatifs au ciment Portland tels que les ciments à faible teneur en clinker ou les matériaux à base de produits recyclés ouvrent des perspectives prometteuses vers des bétons plus durables. Parallèlement, l'essor de l'impression 3D béton offre une révolution dans la façon de concevoir et de réaliser les structures, avec des gains significatifs en termes de forme, de rapidité et de réduction des déchets. Pour que ces technologies atteignent leur plein potentiel, des progrès restent à faire : optimisation des formulations des mortiers, amélioration de la fiabilité et des systèmes de contrôle en continu, ainsi que la standardisation des procédés pour garantir performance, sécurité et reproductibilité. Enfin, l'intégration de capteurs intelligents et de retours d'information en temps réel pourra permettre à l'avenir une automatisation accrue et une meilleure qualité des ouvrages imprimés. C'est en combinant innovation des matériaux et excellence des processus que le béton de demain pourra répondre aux défis de la construction durable.

Imprimante 3D béton en action



Pour en savoir plus sur le thème de l'habitat :

-  Vidéos du colloque « Chimie et habitat » - Mediachimie
-  Quelles solutions pour améliorer la performance énergétique dans l'habitat ? - S. Steydl - Mediachimie
-  La discrète révolution de la performance énergétique des bâtiments - F. Michel - Mediachimie
-  Vidéo : Petites histoires de la chimie - Louis Vicat - Le secret du ciment romain - G. Emptoz, F. Demerliac
-  Question du mois : Quel est le secret de la longévité de la muraille de Chine ? - C. Agouridas
-  Zoom sur la formulation des bétons et des ciments - J.P. Foulon

RÉPONSES AUX ACTIVITÉS

B. COMMENT FABRIQUE-T-ON DU CIMENT, UN DES COMPOSANTS DU BÉTON ?

1. $\text{CaCO}_3 \text{ (s)} + \text{C}_{\text{(s)}} + \text{O}_2 \text{ (g)} \rightarrow \text{CaO}_{\text{(s)}} + 2 \text{ CO}_2 \text{ (g)}$
2. $\text{M}(\text{CaCO}_3) = \text{M}(\text{Ca}) + \text{M}(\text{C}) + 3 \times \text{M}(\text{O}) = 100,1 \text{ g/mol}$
 $n(\text{CaCO}_3) = m(\text{CaCO}_3) / \text{M}(\text{CaCO}_3)$ avec $m(\text{CaCO}_3) = 1 \text{ t} = 1 \times 10^6 \text{ g}$
 Donc $n(\text{CaCO}_3) = 1 \times 10^6 \text{ g} / 100,1 \text{ g/mol} = 9\,990 \text{ mol}$
3. D'après l'équation, pour une mole de CaCO_3 consommée, nous obtenons deux moles de CO_2 .
 Donc $n(\text{CO}_2)_{\text{finale}} = 2 \times n(\text{CaCO}_3)_{\text{initiale}} = 2 \times 9\,990 = 1,998 \times 10^4 \text{ mol}$
 Or $m(\text{CO}_2) = n(\text{CO}_2) \times \text{M}(\text{CO}_2)$ avec $\text{M}(\text{CO}_2) = 44,0 \text{ g/mol}$
 donc $m(\text{CO}_2) = 1,998 \times 10^4 \times 44,0 = 8,79 \times 10^5 \text{ g} = 0,879 \text{ t}$
4. Pour produire ce ciment, il faut chauffer à $1\,450^\circ\text{C}$ donc cela demande une source d'énergie, pouvant être d'origine fossile (pétrole, gaz naturel), dégageant aussi après combustion du dioxyde de carbone CO_2 .

C. LA DÉCARBONATION DU CIMENT, EST-CE POSSIBLE ?

1 : B et D 2 : C 3 : D 4 : B 5 : C

D. L'IMPRESSION 3D BÉTON, UNE INNOVATION RICHE EN PROMESSES ?

1. Il faut beaucoup plus de béton et donc de ciment. Cela n'abaisse pas l'émission de CO_2 . C'est purement économique pour réduire les coûts liés à la main d'œuvre et la durée.
2. Le béton peut être utilisé pour faire des coffrages en béton armé ou des objets structurels qui forment l'ossature porteuse à laquelle est confiée la responsabilité de soutenir et/ou de transférer les charges, de résister aux forces internes et externes pour fournir la stabilité d'un bâtiment.
3. Il faut ajouter des fibres.

ORIENTATION ET MÉTIERS

Partie professionnelle rédigée par Françoise Brénon et Gérard Roussel

Dans le domaine de l'habitat, au cœur des bâtiments et de tous leurs matériaux, l'innovation est permanente bien qu'elle ne soit pas nécessairement visible. Ces innovations concernent aussi bien la structure de base que l'ensemble des équipements techniques et de confort.

Les grands enjeux pour l'habitat et la construction sont la résistance, la durabilité l'évolution vers des matériaux dont les cycles de vie respectent les principes de l'économie circulaire, la recherche d'économies d'énergie dans la fabrication des matériaux et dans leur usage et enfin l'évolution vers des matériaux à faible empreinte carbone.

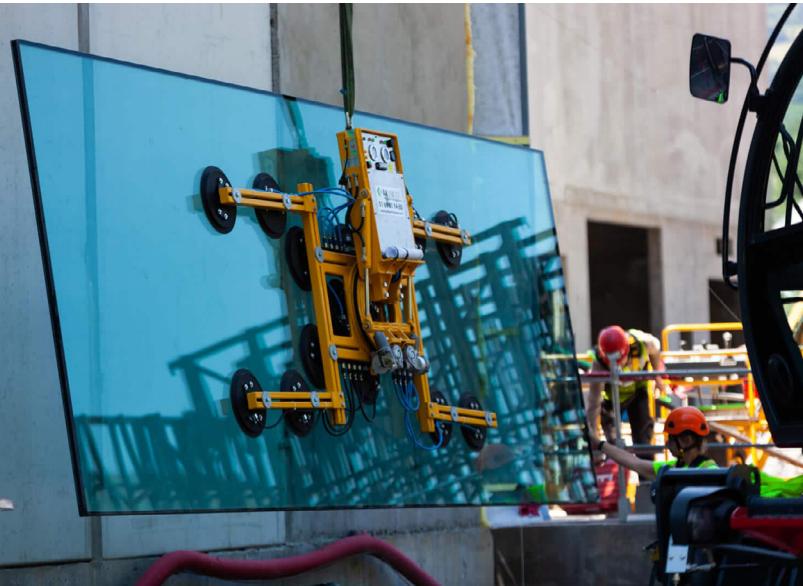
Ces 2 derniers points sont particulièrement critiques pour ce qui est de l'industrie du béton particulièrement concernée par son coût énergétique et son impact très important sur les rejets de CO₂, d'où l'évolution en cours vers la production de bétons bas carbone ou bétons polymère ou de résine.

L'Innovation est présente dans de nombreux autres domaines d'application comme par exemple les bétons : auto-cicatrisants (ajout de polymères ou bactéries), à ultra-hautes performances (construction de ponts...), translucides (inclusion de fibre optiques), pour l'impression 3D, résistants aux radiations (centrales nucléaires), intelligents et connectés (surveillance corrosion, fissures)

La laine de verre reste l'isolant le plus utilisé pour ses qualités thermiques et phoniques, son coût, sa production parfaitement maîtrisée et sa facilité de mise en œuvre. C'est également un matériau ininflammable. Elle fait preuve d'une stabilité chimique excellente, toutefois, une perte de stabilité mécanique peut réduire avec le temps son efficacité.

L'isolation et les économies d'énergie font aussi l'objet de nouvelles approches avec l'utilisation d'aérogels à base de silice ou de polymères, d'isolants biosourcés (laine de bois, ouate de cellulose, liège) traités chimiquement contre le feu et l'humidité. Il existe également des peintures thermiquement isolantes à base de microbilles de verre ou de céramiques. Plus récemment, des pilotes ont été lancés dans le cadre de l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP) afin de stocker la chaleur le jour et la libérer pendant la nuit alors qu'il fait plus froid.

ORIENTATION ET MÉTIERS



Verres electrochromes © SECM

Les vitrages intelligents concourent au confort et à la gestion de l'énergie et de la lumière.

Vitres électrochromes, thermochromes, photochromes, à cristaux liquides, à opacité variable, connectées, autant de technologies que d'applications spécifiques.

Toutes les conceptions de différents matériaux de l'habitat font appel à des procédés chimiques et aux compétences des chimistes. Pour découvrir certaines de ces réalisations, visionnez les conférences du colloque Chimie et habitat de novembre 2025 et consultez également la sélection ci-dessous.

»»» LES VIDÉOS

La peinture qui dépollue *Collection Des Idées plein la tech*

L'intelligence du verre *Collection Idée plein la tech*

L'architecture bois-sourcée *Collection Idée plein la tech*

Les industriels à la recherche d'alternatives au clinker, ingrédient peu connu mais très polluant du ciment

Prix des jeunes journalistes de la chimie - 2024

»»» LES RESSOURCES

Zoom sur la formulation des bétons et des ciments

Zoom sur les progrès de l'optoélectronique : des LED aux OLED

Zoom sur l'éco-conception des produits de consommation : vers une économie circulaire. Exemple des peintures

ORIENTATION ET MÉTIERS

Les chimistes, du Bac au Bac+8, sont spécialisés : en science des matériaux, bétons classiques et bétons innovants, chimie des polymères, chimie verte, économie circulaire, écoconception, matériaux intelligents, chimie de l'environnement, analyse, formulation, corrosion, électrochimie, chimie des batteries, génie des procédés, chimie industrielle.... La part d'innovation est importante dans un contexte de durabilité, de transition énergétique, d'économie circulaire, de produits de construction bas carbone, de qualité de vie.

Système d'impression sur béton ©DR



ORIENTATION ET MÉTIERS

Ci-dessous une sélection de ressources relatives aux formations et métiers concernés :

Parmi les fiches « Les chimistes dans... »

- ❖ Les chimistes dans : L'aventure des nouveaux matériaux
- ❖ Les chimistes dans : Les énergies nouvelles face au développement durable
- ❖ Les chimistes dans : les métiers de l'eau
- ❖ Les chimistes dans : l'économie circulaire



Parmi les fiches métiers

- ❖ Technicien matériaux (H/F)
- ❖ Ingénieur matériaux (H/F)
- ❖ Technicien de formulation (H/F)
- ❖ Ingénieur en formulation / formateur (H/F)
- ❖ Technicien génie des procédés / génie chimique (H/F)
- ❖ Ingénieur chimiste procédés (H/F)
- ❖ Technicien de fabrication production (H/F)
- ❖ Ingénieur de recherche / chercheur (H/F)
- ❖ Technicien chimiste (H/F)
- ❖ Technicien d'analyse chimie / physico-chimie (H/F)



...



Les formations

- ❖ Bac +2/3 : vers les métiers de techniciens et de techniciennes
- ❖ Bac +5/8 : vers les métiers d'ingénieur(e)s et de recherche

