

## Les bétons de demain

Présent dans deux tiers des habitations, le béton est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Ceci est dû à sa facilité de mise en œuvre (matériau moulable), à la disponibilité des matières le constituant (sable et granulats, disponibles partout sur la planète) et à son faible coût (de l'ordre de 100 €/m<sup>3</sup>). Les ouvrages construits à base de béton peuvent avoir trois fonctions différentes : esthétique (monument historique, statue), étanchéité (silo à grains, château d'eau, enceinte de confinement de centrale nucléaire) ou tenue structurelle (bâtiment, pont). Selon la fonction qui lui est allouée, la formulation du béton est adaptée ; sa durabilité et les exigences de surveillance de l'ouvrage varient également [1].

La fabrication d'un béton implique la mise en œuvre d'une formulation (composition) qui intègre principalement de l'eau, du ciment (le liant), du sable, des granulats et des adjuvants organiques facilitant sa mise en œuvre (figure 1a). Selon les applications, des fines peuvent être ajoutées au mélange (figure 1b) afin d'optimiser la distribution du squelette granulaire du béton et en améliorer la compacité.

Le ciment est constitué de roches calcaires et d'argile extraites de carrières et concassées. Ce mélange est homogénéisé puis cuit à haute température (1 450 °C) dans un four rotatif avant d'être broyé ; c'est ce qui donne le clinker. Très énergivores et polluantes, ces opérations émettent des gaz à effet de serre (principalement du CO<sub>2</sub>), estimés à 5 % des émissions anthropiques.

Au moment du malaxage, dans une toupie ou une bétonnière, le béton reste fluide. Une fois coulé, la prise du béton intervient en quelques heures. Les réactions qui entrent en jeu sont chimiques, thermiques, mécaniques et physiques. Une fois durci, c'est-à-dire après quelques jours, le béton présente de très bonnes propriétés mécaniques en compression (quelques dizaines de MPa selon le type de béton). C'est un matériau poreux, dans lequel circule une solution interstitielle très basique, de pH de l'ordre de 13 (en comparaison, l'eau du robinet a un pH de 7, la soude caustique de 14). Les constructeurs d'ouvrages ont très rapidement associé des armatures en acier au béton car sa résistance en traction est très mauvaise ; l'acier vient reprendre les efforts en traction et ainsi compenser cette faiblesse.

### La tendance actuelle : intégrer le béton dans son environnement

Jusqu'à récemment, l'usage du béton se limitait à sa fonction première : on le souhaitait peu coûteux, robuste et durable, et seuls quelques architectes avaient travaillé sur son esthétique (Auguste Perret, Le Corbusier...). Actuellement, la tendance évolue pour littéralement intégrer les ouvrages à leur environnement, comme le montrent les exemples suivants.

La **végétalisation des bâtiments** émerge, avec de nombreux projets d'architectes incluant des toits végétalisés. On peut citer l'emblématique centre d'accueil du jardin botanique de Brooklyn à New York imaginé par Marion Weiss et Michael Manfredi. Le bâtiment, qui intègre un toit végétalisé, a été pensé comme une interface entre la ville et le parc ; sa forme épouse ainsi celle des chemins du parc au sein duquel elle « serpente ».

Rudy Ricciotti a rendu célèbre le **béton fibré à ultra-haute performance** [2], matériau de construction du MuCEM (Musée des Civilisations de l'Europe et de la Méditerranée à Marseille, figure 2). Les progrès dans le domaine des méthodes de formulation des bétons, des adjuvants et la possibilité d'intégrer des minéraux ultrafins ont permis cette nouvelle gamme. Après les bétons « courants », de résistance en compression de 30 MPa, sont apparus les bétons à hautes performances, ayant une résistance supérieure à 50 MPa, puis des bétons à très hautes performances, dont la résistance est supérieure à 80 MPa. Une rupture technologique est intervenue au début des années 1990 avec la mise au point de bétons dont la résistance dépasse 150 MPa. Cette résistance est atteinte grâce à l'introduction d'adjuvants de type superplastifiants, des distributions granulaires intégrant des minéraux de plus en plus fins (des « fines »), ainsi que des fibres métalliques ou bien organiques. Le comportement mécanique de ce nouveau composite permet de s'affranchir de l'utilisation des armatures en acier. Il est ainsi possible d'élaborer des structures fines assimilées à de la dentelle, comme c'est le cas au MuCEM.

Les **bétons luminescents** sont également de plus en plus présents dans les projets d'architectes : parvis de gares, allées de jardins et même ouvrages routiers. Deux ponts intégrant du béton luminescent ont ainsi été construits sur la commune

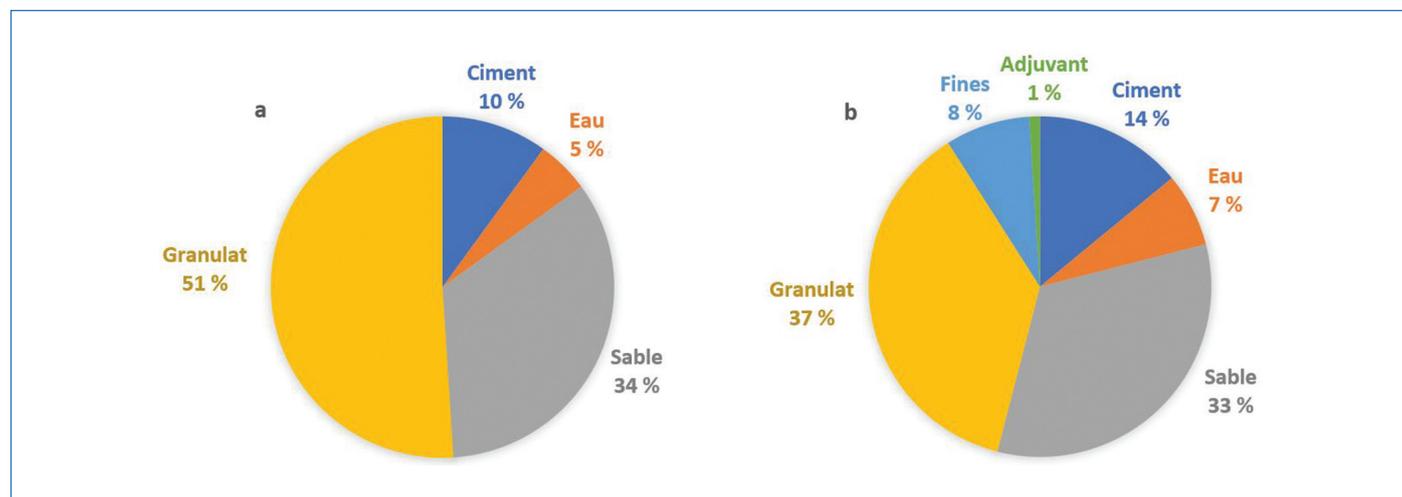


Figure 1 - Constituants d'un béton standard (a) et autoplaçant (b).



Figure 2 - Le MuCEM (photo de Quentin Caron, CC BY-SA 4.0).

d'Aigrefeuille-sur-Maine (Loire-Atlantique). Ce béton permet à ces ouvrages d'art de devenir des marqueurs visuels la nuit. Ainsi, le parvis de la halle des sports de Harnes (Pas-de-Calais) scintille la nuit. Les granulats intégrés dans la formulation du béton sont enrobés d'un produit contenant des pigments photoluminescents qui absorbe les UV le jour et les restitue la nuit.

Le béton devient même **translucide** : dans ce concept, inventé par l'architecte hongrois Aron Losconci en 2001, des fibres optiques sont intégrées au béton contenant majoritairement des granulats fins, ainsi qu'un système sophistiqué d'ampoules LED programmables. La lumière est alors diffusée *via* les fibres optiques. Cette technologie a été mise en œuvre pour le pavillon italien de l'Exposition universelle de Shanghai en 2010. L'architecte Giampaolo Imbrighi a intégré sur la façade plus de 3 700 panneaux transparents, sur une surface de près de 1 900 m<sup>2</sup>.

## Le béton de demain sera écologique

Le talon d'Achille du béton est son empreinte carbone. Les cimentiers redoublent d'effort pour concevoir des bétons moins polluants. En effet, l'industrie cimentière ambitionne de diviser son empreinte par cinq d'ici 2050 [3]. Plusieurs pistes sont à l'étude pour cela : efficacité énergétique dans la production de clinker, combustibles alternatifs, substitution du clinker et capture du CO<sub>2</sub> issu de la production.

Les cimentiers diversifient les sources d'énergie utilisées pour alimenter les fours avec, par exemple, le remplacement d'une partie des combustibles fossiles par des combustibles issus de la biomasse (sous-produits de l'agriculture comme les cosses de café, les balles de riz...) ou des déchets (solvants, déchets plastiques, huiles usagées, peintures...).

Par ailleurs, pour limiter la quantité de clinker, qui est l'élément dont la production est la plus grande source de CO<sub>2</sub> de la chaîne de production (figure 3), des produits de substitution sont intégrés à la formulation. On peut mentionner des produits naturels comme la pouzzolane (roche siliceuse légère produite par des projections volcaniques basaltiques), la chaux et la magnésie. Des produits d'origine artificielle sont également utilisés, tels que des déchets d'autres industries, comme les laitiers des hauts fourneaux de l'industrie sidérurgique ou les cendres volantes issues du filtrage des fumées de centrales électriques à charbon. Les bétons peuvent également comporter des granulats issus du recyclage de déchets de démolition.

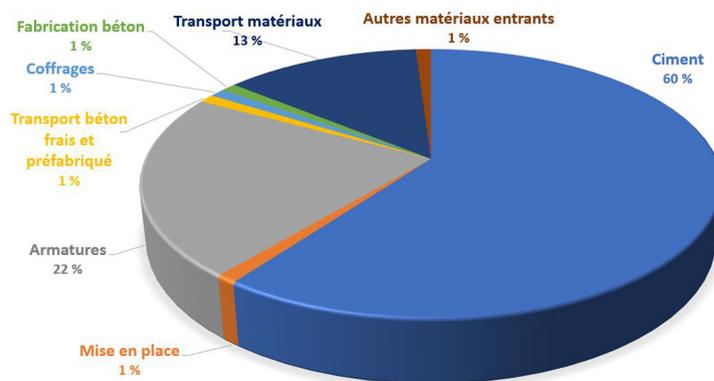


Figure 3 - Exemple de la répartition des émissions de gaz à effet de serre pour un béton [4].

## Le béton du futur sera intelligent

En plus d'être intégré dans son environnement et écologique, la tendance est de fonctionnaliser le béton. Les recherches actuelles s'orientent vers des bétons capables d'autodétecter ses maladies et de s'autocicatriser. Les chercheurs intègrent dans la formulation des nanoparticules (nanotubes ou nanofils de carbone par exemple) qu'ils peuvent fonctionnaliser pour en faire des nanocapteurs.

Des bactéries spécifiques « dormantes » en environnement sec se réveillent en présence d'eau de pluie et produisent du calcaire capable de boucher des microfissures [5]. Dans cette étude, des spores bactériennes et du lactate de calcium sont immobilisés à l'intérieur de billes d'argile expansée. Ces billes sont ensuite utilisées comme granulats dans le béton. Les fissures sont bouchées par le carbonate de calcium qui se forme durant l'activité bactérienne.

Les bétons seront également capables de s'autonettoyer et de lutter contre la pollution. Pour cela, les chercheurs exploitent les propriétés photocatalytiques du dioxyde de titane sous forme de nanopoudre. Intégré dans la formulation, ce semi-conducteur est excité par la lumière UV et peut décomposer par oxydoréduction les micro-organismes organiques (mousses, lichens, moisissures...) qui se sont déposés sur les façades, ou bien les polluants organiques présents dans l'air. Les composés organiques volatils sont ainsi transformés en eau et gaz carbonique, et les oxydes d'azote sont décomposés en sel de nitrate de calcium. Ces résidus sont ensuite lavés et évacués lorsqu'il pleut. Ces bétons dépolluants trouveront toute leur utilité dans des stations-services, écrans acoustiques et autres infrastructures routières.

Plus futuriste encore, les structures en béton pourront être également des capteurs de chaleur. L'idée est d'intégrer des capteurs photovoltaïques capables d'absorber les rayons du Soleil pour les transformer en électricité.

Ainsi, en intégrant des nanomatériaux et autres capteurs issus des toutes dernières recherches, les bétons deviendront de plus en plus intelligents et nous ignorons encore peut-être toutes les applications possibles de ces matériaux !

[1] Torrenti J.M., Du béton frais au béton durci : éléments de comportement, *Techniques de l'Ingénieur*, art. C2240 V2, 2017.

[2] Rossi P., Renwez S., Belloc A., Les bétons fibrés à ultra-hautes performances, *Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, 1995, 196, p. 61.

[3] Cement: more efforts needed, International Energy Agency, 2019, [www.iea.org/reports/tracking-industry-2019/cement](http://www.iea.org/reports/tracking-industry-2019/cement)

[4] Linger L., Boutillon L., CO<sub>2</sub>CRETE Impact : l'empreinte CO<sub>2</sub> du béton, Conférence GC<sup>2</sup>2009, Paris, 18-19 mars 2009.

[5] Wiktor V., Jonkers H.M., Un nouveau béton auto-cicatrisant grâce à l'incorporation de bactéries, *Matériaux & Techniques*, 2011, 99, p. 565.

Cette fiche a été réalisée par **Valérie L'HOSTIS**, chef de projet au CEA (DEN/DANS/DPC Gif-sur-Yvette, [valerie.lhostis@cea.fr](mailto:valerie.lhostis@cea.fr)).

Les fiches « Un point sur » sont coordonnées par un comité éditorial mené par Jean-Pierre FOULON ([jpoulon@wanadoo.fr](mailto:jpoulon@wanadoo.fr)). Elles sont regroupées et en téléchargement libre sur [www.lactualitechimique.org/spip.php?rubrique11](http://www.lactualitechimique.org/spip.php?rubrique11).