

Les grands ouvrages

Notre époque se passionne pour le microscopique : micromachines, microtransistors, gènes, protéines... Nous passons, blasés, devant les grands ouvrages et nous ne nous émerveillons plus comme à l'époque de Louis Figuier ou de Camille Flammarion, quand furent construits la tour Eiffel ou le canal de Suez. Pourtant les tours gigantesques se perdant dans les nuages ou les ponts enjambant d'immenses détroits sont des constructions comme on n'en a jamais vues.

Ce dossier présente quelques-unes des réalisations les plus grandioses du génie civil moderne. L'Asie, avec son rapide développement économique, a battu des records. En Chine, le colossal barrage des Trois Gorges, sur le fleuve Yangzi, rivalise avec d'autres réalisations gigantesques, en Malaisie, au Japon et à Hong Kong. Leurs dimensions inégalées mettent à l'épreuve les producteurs de matériaux (on évoquera les progrès de l'industrie du béton à titre d'exemple), comme les cabinets d'ingénieurs. L'imagination ne manque pas et les limites techniques sont sans cesse dépassées.

Le béton, matériau moderne

BERNARD CLAUDAUD • FRANÇOIS SAUCIER • LAURENT BARCELO

Les bétons modernes sont beaucoup plus résistants que leurs précurseurs antiques, parce que l'on comprend mieux les réactions chimiques qui régissent leur comportement

Le béton est le produit le plus consommé, après l'eau potable : avec plus de cinq milliards de mètres cubes produits annuellement dans le monde, il dénote l'état de développement des pays. Toutefois le manque de soin apporté à sa réalisation en a fait le symbole d'un environnement dégradé, de grisaille urbaine. C'est injuste, car le béton moderne n'est pas nécessairement gris : il en existe des variétés blanches, noires ou de diverses couleurs, et de textures variées. En outre, le béton est façonnable à volonté, il ne s'oxyde pas, demande peu d'entretien, il est fiable, peu sensible au feu et peu coûteux.

Matériau du XX^e siècle par excellence, le béton n'est pourtant pas une invention humaine : les roches que sont les poudingues et les brèches sont des bétons naturels, formés de galets respectivement arrondis ou non par le charriage dans les fleuves et liés par un ciment naturel. Les Phéniciens en avaient repris le principe, associant de la chaux (l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) et du sable pour réaliser des sols ou des citernes. Le véritable béton, composé de ciment, de sable et aussi de granulats, est une invention des Romains : ils ajoutaient des briques concassées, riches en silice (l'oxyde de silicium SiO_2) et en alumine (l'oxyde d'aluminium Al_2O_3), à de la chaux (l'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$) ; ces briques réagissaient avec la chaux et avec l'eau par une réaction «pouzzolanique» (du nom de Pouzzoles, un petit village proche du Vésuve). Les Romains avaient également constaté qu'en mélangeant la chaux à la pouzzolane (un minéral d'origine volcanique, riche en silice) on obtenait des mortiers qui prenaient même sous l'eau.

La réaction pouzzolanique conférait une résistance mécanique et une

durabilité qui restèrent longtemps inégalées, mais les matières premières étaient en quantité insuffisante pour que le béton soit communément utilisé. Son emploi ne se développe qu'au début du XIX^e siècle, avec la découverte du ciment moderne.

Le succès du matériau résulte de plusieurs de ses propriétés : il est modelable à volonté (contrairement à la pierre de taille) ; sa qualité est constante ; il permet des constructions rapides, parce que sa préparation est plus rapide que la taille de la pierre ; on améliore ses propriétés mécaniques en y noyant des renforts métalliques.

Le béton est-il aujourd'hui un matériau campé dans sa maturité ? Non : il s'embellit, ses qualités s'améliorant à l'aube d'un siècle qui en verra de nouvelles utilisations. Nous examinerons ici les avancées techniques qui seront les clefs des applications de demain.

En conservant le principe du béton, matériau à base de granulats, d'eau et d'un liant, l'industrie a mis au point des matériaux spéciaux, tels les bétons de polymères pour la décoration, ou des bétons à applications spéciales : antiacides, réfractaires, etc. Toutefois l'essentiel du béton de génie civil reste à base de ciment Portland, le ciment le plus commun, inventé et breveté en 1824. On l'obtient en cuisant dans des fours, à 1450°C, des mélanges de roches calcaires, siliceuses et alumineuses.

Une pâte qui durcit

Nous verrons comment, à partir d'un mélange intime d'un liant (généralement du ciment), d'eau et de granulats, l'industrie améliore les propriétés du béton en ajoutant de faibles quantités d'adjuvants.

Le ciment est l'élément actif du mélange, parce qu'il forme avec l'eau,

lors du malaxage, une pâte qui enrobe les granulats (généralement, ceux-ci sont chimiquement inertes). Dès que l'eau et le ciment entrent en contact, une réaction de mouillage et de dissolution a lieu. Elle est suivie par une période de dormance qui, selon les ciments, dure quelques minutes à quelques heures : la pâte conserve alors sa plasticité, de sorte qu'on peut la mettre en place dans des moules ou dans des coffrages. Puis une réaction chimique d'hydratation (nous en verrons plus loin le détail) chauffe la masse et augmente sa viscosité : c'est le début de prise. La masse de ciment hydraté qui se forme alors autour des granulats prend progressivement une cohésion qui confère ses propriétés mécaniques au matériau. Cette réaction est la clef des performances. Les physico-chimistes ont appris à la maîtriser et à la modifier, à l'aide de divers ajouts.

La taille des granulats définit les types de bétons : dans les bétons courants, les granulats ont un diamètre qui atteint 25 millimètres ; entre 10 et 5 millimètres, on les qualifie de microbéton ; au-dessous de cinq millimètres, de mortier. Le béton se transporte par des camions-toupies, pour le béton prêt à l'emploi, et par des pompes. Il est mis en œuvre selon divers procédés : simple coulage, coulage sous vibrations, tringlage (une opération de finition, également nommée réglage ou aplanissage, qui est une sorte de lissage de la surface), projection, extrusion... Chacune de ces méthodes impose des caractéristiques d'écoulement particulières du béton.

Enfin, après un certain temps, quand le béton a une résistance mécanique suffisante, on décoffre. Le matériau, devenu solide, est poreux et perméable ; il continue de durcir et de perdre de l'eau tant que son humidité relative interne reste supérieure à 80 pour cent.

Matériau à rupture fragile, le béton résiste mal aux efforts de traction : c'est pour améliorer sa résistance à ces contraintes qu'on lui ajoute des renforts métalliques inertes (fers passifs) ou des renforts actifs (précontraintes).

Hydratation contrôlée

Pourquoi le béton prend-il progressivement ? Pourquoi chauffe-t-il lors de la prise ? Comment retarder ou accélérer cette dernière ? Comment augmenter les performances des bétons ? Le mécanisme de prise est étudié depuis un siècle environ. Il n'est pas complètement élucidé, surtout parce que les matières premières sont excessivement variées : souvent extraites à proximité des sites de fabrication, elles contiennent des impuretés, qui modifient l'hydratation.

En proportion comprise entre 60 et 80 pour cent du volume total de béton, les granulats ont un rôle déterminant sur les propriétés du matériau. Les performances mécaniques sont d'autant meilleures que le squelette minéral est compact : les granulats doivent avoir des diamètres différents, afin que les plus petits s'insèrent dans les interstices

formés par les plus gros. Pour cela, on mélange des granulats fins (sables et sablons, de diamètre maximal égal à trois millimètres environ) et de gros granulats, gravillons et graviers, de diamètre compris entre 5 et 30 millimètres. Des courbes, telles celles des ingénieurs français M. Faury ou G. Dreux, indiquent les proportions de granulats adéquates qui optimisent la compacité des mélanges. Toutefois les granulats de bonne qualité sont de plus en plus difficiles à trouver, parce que les contraintes environnementales limitent l'accès aux sources potentielles.

Le ciment est souvent confondu avec le béton dont il est la matière première active. C'est une poudre fine, que l'on doit protéger de l'humidité, pendant son transport et son stockage, afin qu'elle ne réagisse pas prématurément avec l'eau. Elle est un mélange de silicates de calcium (les silicates sont les composés minéraux qui contiennent des ions SiO_4^{4-}), d'aluminate de calcium, et d'aluminate de fer et de calcium (les aluminates sont des composés qui contiennent les ions AlO_4^{5-}).

L'hydratation du ciment, qui libère beaucoup de chaleur, engendre le réseau

qui enserre les granulats : le silicate de calcium anhydre (prépondérant dans le ciment) se transforme en silicate de calcium hydraté et en portlandite (ou hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2)). Le silicate de calcium hydraté confère au béton ses performances en établissant un réseau continu dans tout le matériau : on cherche à favoriser sa formation. En revanche, la portlandite ne contribue pas au réseau : on tend à l'éviter. Selon les propriétés recherchées, la quantité de ciment varie entre quelques kilogrammes par mètre cube (un pour cent, en volume) et plusieurs centaines de kilogrammes par mètre cube (15 pour cent).

L'eau n'assure pas seulement la réaction d'hydratation : elle rend le mélange plastique, ce qui facilite le malaxage et la mise en place. La proportion d'eau dans un béton est importante : plus il y a d'eau, plus le mélange se travaille facilement, mais moins le béton final est résistant, parce que plus poreux.

De surcroît, la qualité de l'eau détermine la qualité du béton : divers polluants participent à des réactions indésirables qui diminuent la résistance mécanique ou la durabilité du



1. CES DEUX PONTS, sur la rivière de l'Elorn, près de Brest, ont été construits à 50 ans d'intervalle. L'allégement de la structure du pont récemment construit, en arrière-plan, montre les progrès du béton : les bétons modernes sont dix fois plus résistants que les bétons du début du siècle.