

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.

béton. Quand l'eau contient trop de sulfates, par exemple, des aluminosulfates de calcium hydratés se forment au sein du réseau, déjà établi, de silicates de calcium hydratés ; en provoquant l'expansion de ce réseau, ils disloquent le béton.

L'air, enfin, est un constituant trop négligé, alors que sa proportion atteint trois pour cent dans les bétons où on ne l'introduit pas intentionnellement. Cet air détermine la résistance au gel : dans les pays où l'hiver est rigoureux, on en insère volontairement un volume supérieur (4 à 8 pour cent), grâce à un adjuvant ajouté lors du gâchage. Nous verrons comment l'air permet le déplacement de l'eau dans le béton par temps très froid (ce qui évite la rupture), mais réduit la résistance mécanique.

Les additifs des performances

Aux ingrédients de base, l'industrie du béton ajoute des composés variés, pour réduire les coûts ou adapter les performances. Ainsi certains sous-produits industriels qui ont des propriétés liantes sont utilisés en remplacement ou en complément du ciment. Des laitiers de haut-fourneau (composés de silice, de chaux, d'alumine et d'un peu de fer) sont broyés et mélangés à du ciment Portland pour former le «ciment au laitier». Les cendres volantes (plus riches en silice que le ciment Portland, mais moins riches en calcium) récupérées dans les gaz de combustion des centrales au charbon ont également des propriétés liantes, quand on les utilise avec du ciment Portland ; certaines cendres volcaniques, tout comme les cendres d'écorce de riz, sont aussi de bons liants pouzzolaniques (ils s'hydratent en présence de chaux).

L'intérêt des ajouts cimentaires est économique et technique. D'une part, leur utilisation dans le béton permet de valoriser des sous-produits. D'autre part, ils réduisent la viscosité, la chaleur d'hydratation ou la sensibilité à diverses agressions chimiques.

Les fumées de silice, un coproduit de la fabrication du silicium et de ses alliages, sont des additifs particulièrement utiles, parce que leur diamètre est dix fois inférieur à celui des grains de ciment : leurs particules, qui s'insèrent entre les grains de ciment, augmentent la compacité du matériau et, donc, sa résistance. En outre, la fumée

de silice réagit avec la portlandite formée lors de l'hydratation pour engendrer une quantité supplémentaire de silicate de calcium hydraté, ce qui augmente à la fois la résistance mécanique, l'imperméabilité et la durabilité. Toutefois l'utilisation des fumées de silice

est limitée, en raison de leur coût : elles sont souvent plus coûteuses que le ciment Portland !

Les adjuvants, utilisés en petites quantités, modifient les propriétés du béton, frais ou à l'état durci. Une petite proportion d'un réducteur d'eau, tel les lignosulfonates (des sous-produits de l'industrie du papier), évite l'aggrégation des particules de ciment : le béton reste fluide avant la prise.

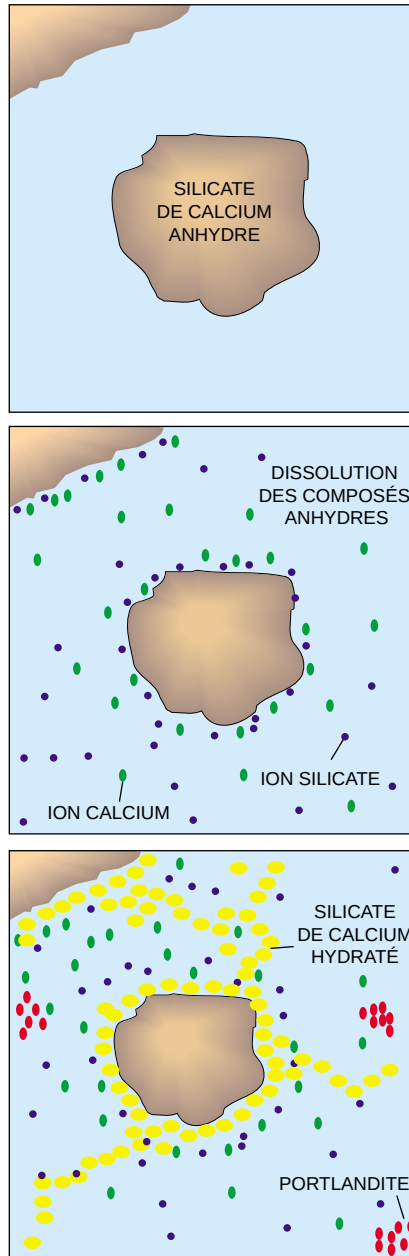
Les superplastifiants, qui ont eu un impact considérable sur le génie civil au cours des 20 dernières années, ont la même action, mais ils sont encore plus efficaces : ces polymères organiques de forte masse moléculaire, par exemple les naphthalène sulfonates ou des macromolécules fabriquées spécialement, augmentent la fluidité à quantité d'eau égale. On les utilise afin de réduire la quantité d'eau tout en conservant une bonne plasticité.

Lorsque le béton doit être transporté sur de longues distances, que sa mise en œuvre est difficile ou qu'elle s'effectue par temps chaud, on utilise un retardateur de prise : ces molécules, tels des sucres, de l'acide citrique ou des phosphates, ralentissent la formation du silicate de calcium hydraté en se liant au calcium.

À l'inverse, en hiver ou pour améliorer la cadence sur un chantier de préfabrication, on utilise des accélérateurs de prise : des chlorures ou des nitrates de calcium, par exemple, libèrent des ions calcium qui augmentent la vitesse de croissance du silicate de calcium hydraté.

Plusieurs laboratoires explorent aujourd'hui le mécanisme de cette accélération. Lorsque le silicate de calcium hydraté a précipité à la surface des grains, il bloque les molécules d'eau, qui ne diffusent alors que lentement vers l'intérieur des grains. Pour des raisons encore mal comprises, les ions chlorure et nitrate favorisent la diffusion de l'eau et une croissance du silicate de calcium hydraté en volume, plutôt qu'en surface.

D'autres adjuvants ont une action esthétique : les colorants ajoutés au béton frais teintent durablement toute la masse du matériau. Toutefois ces adjuvants, comme les précédents, modifient parfois les réactions de prise ; Par exemple, le noir de fumée (du carbone presque pur) adsorbe les autres adjuvants et annule leurs effets : on doit les surdoser ou réduire la quantité de noir de fumée. Pour



2. LA PRISE DU BÉTON résulte de la formation de silicate de calcium hydraté à la surface des grains de ciment. En présence d'eau, les grains de ciment anhydre, qui sont composés de silicate de calcium anhydre (*en haut*) et d'aluminate de calcium et de fer anhydre, se dissolvent, puis s'hydratent (*au centre*). Toutefois le silicate de calcium hydraté et la portlandite (de l'hydroxyde de calcium hydraté), peu solubles, précipitent, provoquant une dissolution supplémentaire des composés anhydres. Le silicate de calcium hydraté qui se dépose ainsi forme un réseau continu qui enserré les grains de sable et assure la cohésion du béton (*en bas*).