

en place aisée et réussie. Simultanément on vérifie ainsi que la quantité d'eau employée lors du gâchage est appropriée : la plasticité est un indicateur de la justesse du dosage en eau.

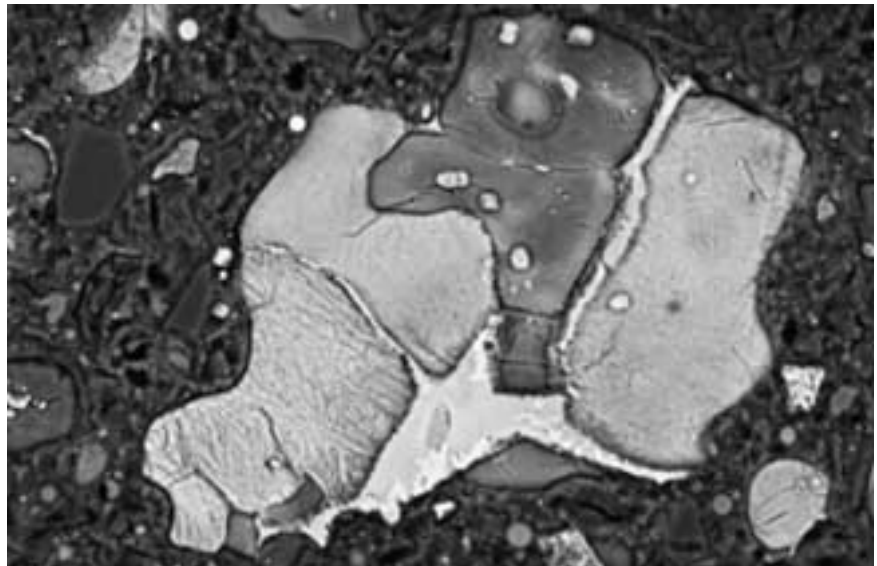
La méthode de mesure la plus couramment utilisée est l'essai d'affaissement : on remplit un cône tronqué, en tôle, avec le béton frais, puis on soulève ce cône pour laisser le béton s'affaisser sous son poids ; on mesure alors l'abaissement du sommet plat du tronc de cône.

Toutefois cette mesure ne caractérise pas entièrement la rhéologie du matériau : deux formules de béton présentant le même affaissement peuvent avoir des ouvrabilités différentes. Aussi les spécialistes ont-ils proposé des tests pour quantifier la plasticité du béton. En laboratoire, on mesure le seuil de cisaillement (la contrainte à partir de laquelle le béton s'écoule) et la viscosité plastique (qui caractérise la vitesse d'écoulement) à l'aide d'un rhéomètre à béton, une cuve de plusieurs litres de capacité, où l'on fait tourner un disque en mesurant la résistance à la rotation.

Sur le béton frais, on mesure également la teneur en air, qui détermine, nous l'avons vu, la tenue au gel : dans la méthode pressiométrique, on applique une pression d'air connue sur du béton frais, placé dans un récipient étanche de volume connu. Comme le béton contient de l'air, qui est compressible, la diminution de volume du béton comprimé révèle la quantité de cet air. Cette mesure ne donne toutefois qu'une évaluation indirecte de la résistance potentielle aux effets du gel, puisque celle-ci dépend surtout de l'espacement moyen entre les bulles d'air, et non seulement du volume total inclus dans le béton.

Enfin, lorsque des conditions de chantier imposent un contrôle plus strict du béton frais avant sa mise en place, on recourt à des essais de caractérisation spéciaux, telles la mesure de la résistance à la ségrégation (séparation des cailloux et de la pâte) ou la mesure de la teneur en granulats (par tamisage du mélange).

Les performances du matériau final doivent être vérifiées après mise en œuvre. Dans la pratique, la mesure de la résistance à la compression du béton est le seul test qui en indique la qualité. On utilise alors des éprouvettes normalisées sur lesquelles on exerce des forces connues : la valeur cherchée est le quotient de la force appliquée



4. LES FUMÉES DE SILICE, sous-produit de l'industrie du fer et du silicium, sont des ajouts cimentaires utiles : ces petites particules (*petites formes rondes, blanches ou grises*) augmentent la compacité du matériau, et sa résistance, en s'insérant entre les grains de ciment. De plus, la silice réagit avec la chaux formée lors de l'hydratation du ciment, ce qui engendre une proportion supérieure d'hydrosilicate, lequel donne sa résistance au béton.

pour atteindre la rupture par la surface de la section de l'éprouvette. Comme la résistance à la compression du béton augmente progressivement, à mesure que le ciment s'hydrate, sa mesure est indissociable du protocole de confection, de conservation et de mise à l'épreuve des éprouvettes.

Selon les pays, les éprouvettes standard sont des cylindres ou des parallélépipèdes. Les dimensions des éprouvettes varient selon les normes, mais la majorité des pays mesurent la résistance après 28 jours de conservation dans l'eau (ou en atmosphère saturée) à température normalisée (généralement 20°C). Pour des applications spéciales, on peut spécifier des résistances mécaniques à atteindre au très jeune âge (48 heures après le contact entre l'eau et le ciment, par exemple) ou à long terme (91 jours après la mise en œuvre, par exemple).

La résistance à la compression du béton à 28 jours de cure humide varie beaucoup : moins de un mégapascal pour une grave ciment (l'équivalent de dix atmosphères), 20 mégapascals pour un plancher en béton ordinaire, 35 mégapascals pour des poutres classiques, ou plus de 100 mégapascals pour un béton à très haute résistance.

Bien que la qualité des granulats joue un rôle important, c'est surtout la proportion d'eau et de ciment qui détermine la porosité, et donc la résistance ; c'est ce que décrit la loi de L. Fer-

ret, proposée dès 1892 : plus le ciment est « dilué » dans l'eau, plus la matrice cimentaire est poreuse et moins le béton est résistant. Cette observation confirme l'intérêt des superplastifiants, qui réduisent la quantité d'eau à utiliser pour le gâchage.

Les maladies à combattre

Comme les roches naturelles, le béton se dégrade lentement. Normalement les ouvrages en béton ont une durée de vie utile de 20, 50, voire 100 ans, selon leur composition, mais le béton est parfois malade : il se détériore alors plus vite que prévu.

La cause la plus importante de dégradation des ouvrages en béton armé est la corrosion des armatures : l'acier de l'armature s'oxyde sous l'action combinée de l'oxygène et de l'humidité. Normalement, le pH élevé à l'intérieur du béton (supérieur à 13) protège les aciers de la corrosion (celle-ci n'a lieu que si le pH est inférieur à 9), mais cette protection naturelle peut être supprimée par le dioxyde de carbone atmosphérique, qui pénètre lentement (environ un millimètre par an) dans le béton : il réduit le pH, parce qu'il forme du carbonate de calcium en réagissant avec la chaux déposée lors de l'hydratation. En outre, les ions chlorure contenus dans l'eau de mer et dans les sels de déverglaçage utilisés en hiver pénètrent dans le béton et favorisent l'activité de corrosion.

Quand le béton est trop perméable, quand les barres d'armature sont trop proches de la surface, ou quand les conditions d'exposition ont été sous-estimées, la corrosion se produit avant que la structure ait atteint la fin de sa vie utile prévue. Elle provoque alors le gonflement du métal, ce qui fait éclater la couche de béton qui recouvre les armatures.

Comment lutter contre ces maladies? L'industrie du béton a longuement analysé les causes possibles de maladies, et mis au point, dans de nombreuses circonstances, des traitements préventifs ou curatifs. Une meilleure évaluation de la gravité des conditions auxquelles sont

exposés les ouvrages conduit, quand c'est nécessaire, à augmenter l'épaisseur du recouvrement de béton pour mieux protéger les armatures.

Cependant les armatures ne sont pas les seuls éléments menacés dans les ouvrages en béton : parfois, des composés en contact avec le matériau pénètrent dans les pores du béton et réagissent avec le réseau de silicate de calcium hydraté ou avec les minéraux des granulats. Nous avons vu comment, dans les régions où le sol contient des sulfates, qui sont continuellement en contact avec les parties enfouies des structures en béton, l'humidité du sol transporte ces sulfates dans les pores

du béton, où les composés qui se forment désagrègent le béton. De même, des composés présents dans certains environnements réagissent avec des composés du béton.

La réaction alcali-granulat est une autre maladie que l'on étudie beaucoup aujourd'hui. Elle peut se produire lorsque au moins trois conditions sont réunies : lorsque les granulats contiennent une variété cristallographique de silice particulière qui passe facilement en solution ; lorsque le béton contient une forte proportion de composés basiques (essentiellement l'oxyde de sodium Na_2O ou de potassium K_2O) ; et lorsque le béton demeure longtemps en milieu très humide. L'expansion qui peut résulter de la formation lente d'un gel de silicates calco-alcalins fait éclater le béton. Quand un barrage est atteint par cette maladie, le gonflement du béton coince parfois les turbines et compromet la stabilité en induisant des contraintes et des fissures.

Cette réaction est très lente (elle dure des dizaines d'années), de sorte que l'on diagnostique aujourd'hui seulement la maladie de structures construites après la guerre. De nombreuses équipes de recherche ont identifié les granulats potentiellement réactifs et mis au point des traitements : la réaction cesse quand on assèche le béton, par exemple, ou quand on injecte des composés, tel des sels de lithium, qui ont une efficacité surprenante et encore mal comprise.

La détérioration du béton sous l'action du gel est également une sorte de maladie, car elle conduit à des dégradations prématurées. Ce type de problème est peu courant en France, mais grave dans des pays les plus exposés à des températures très basses. Le gel provoque deux types de détérioration : l'écaillage en présence de sels de déverglaçage, qui est une dégradation localisée à la surface du béton, et la microfissuration interne, qui affecte toute la masse du béton.

Le mécanisme précis de la microfissuration interne est encore débattu, mais l'eau qui gèle dans le matériau semble déplacer l'eau restée liquide dans le réseau capillaire ; quand les capillaires sont trop longs, les pressions créées sont excessives et font éclater le matériau (on a longtemps cru que la dilatation de l'eau, lors de sa solidification, créait les dommages, mais l'hypothèse est fausse).

Le moyen le plus simple et le moins coûteux d'améliorer la résistance au gel consiste, nous l'avons vu, à ajou-



Lafarge

5. CETTE PASSERELLE CONSTRUITE À SHERBROOKE, au Canada, est le premier ouvrage réalisé à partir de «béton de poudres réactives». Dans ce béton, les granulats les plus gros sont des grains de sable. En outre, la porosité est réduite (l'empilement granulaire est optimisé). Après le gâchage et le moulage, on traite le béton thermiquement afin d'activer la réaction pouzzolanique, qui réduit la concentration en chaux et augmente la proportion de silicate de calcium hydraté. De surcroît, des fibres métalliques noyées dans le matériau donnent à celui-ci de une ductilité utile pour la résistance au vent.

ter un adjuvant entraîneur d'air, lors du gâchage, afin de stabiliser, dans la pâte de ciment, une myriade de petites bulles qui accueillent l'eau mise en mouvement par le gel.

Le béton de demain

Ces phénomènes, et bien d'autres sont explorés par les centres de recherche, qui continuent inlassablement leur quête de nouveaux bétons plus performants ou mieux adaptés aux circonstances de construction, ou de matériaux qui feront oublier la grisaille de l'après guerre.

Après cette période où la fureur de construire l'a emporté sur la recherche de l'agréable, l'architecture et le génie civil s'efforcent ainsi de faire du beau, en utilisant les possibilités des bétons modernes. Le coffrage devient moule, le matériau devient réplique ; le mot «aspect de parement» est dans toutes les bouches, de l'architecte au concepteur, au producteur ou au constructeur. Là, on utilise du ciment blanc ; là on colore le béton. Les bétons se font jolis, et l'on doit regarder de près pour distinguer l'origine des parements.

Simultanément une mutation technique profonde, fruit d'un siècle de recherche, rend le béton dix fois plus performant qu'avant. Il devient perméable ou imperméable aux agents agressifs les plus courants, il possède des résistances mécaniques inégales, permet de créer des ponts «dentelle», tel le pont de Normandie, ou des arches à portée jamais atteinte comme celle de la Défense.

Bernard CLAVAUD, François SAUCIER et Laurent BARCELO travaillent au Service béton du Laboratoire central de recherche du Groupe Lafarge.

Michel VENUAT, *La pratique des ciments*, éditions du Moniteur, Paris, 1989.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *Les bétons, bases et données pour leur formulation*, éditions Eyrolles, 1996.

Véronique BAROGHEL-BOUNY, *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons*, LCPC, Paris, 1994.

Adam NEVILLE, *Properties of Concrete*, Longman Scientific and Technical USA.

Kumar MEHTA, *Concrete, Structure, Properties and Materials*, Prentice Hall, 1986.

Jacques BARON et Jean-Pierre OLLIVIER, *La durabilité des bétons*, Presses de l'ENPC, Paris, 1992.



**UN EDEITEUR SCIENTIFIQUE
FRANCOPHONE
QUI SURFE...**

NOUVEAUTÉ 1998
LE CATALOGUE DES EDITIONS INRA EN LIGNE
www.inra.fr/Editions/index.html

VIENT DE PARAITRE



1997, Réf. 01337, 295 F

L'EAU DANS L'ESPACE RURAL

Production végétale et qualité de l'eau

C. Riou, R. Bonhomme, P. Chassin,

A. Neveu, F. Papy, éd.

L'agriculture de demain devra prendre en compte une double préoccupation : valoriser au mieux la ressource en eau et en maintenir la qualité. Cet ouvrage présente les connaissances fondamentales sur les relations eau-plante, la régulation de ces échanges, le fonctionnement du système racinaire, les méthodes génétiques visant à améliorer la tolérance à la sécheresse, les processus physico-chimiques de la diffusion des produits qui peuvent affecter la ressource en eau et le rôle de l'eau dans la chimie de l'atmosphère. Il propose de nouvelles pratiques d'agriculture et d'élevage qui mettent en application l'économie de l'eau et la maîtrise de la pollution.

ASSIMILATION DE L'AZOTE CHEZ LES PLANTES

Aspects physiologique, biochimique et moléculaire

J.F. Morot-Gaudry, éd.

Pour la première fois en langue française, cet ouvrage rassemble les principales connaissances acquises ces vingt dernières années sur l'assimilation de l'azote nitrique, ammoniacal et moléculaire et sur la synthèse des acides aminés et des protéines chez les plantes d'intérêt agronomique. Il signale les conséquences d'un apport excessif d'azote sur le rendement et la qualité des récoltes ainsi que sur la préservation de l'environnement et permet d'envisager de nouvelles stratégies d'amélioration des espèces et de nouveaux itinéraires techniques de culture.



1997, Réf. 01338, 290 F

POUR COMMANDER

Contactez votre libraire habituel

ou **INRA Editions** - Route de St-Cyr 78026 Versailles Cedex - FRANCE

Tél : (33) 01.30.83.34.06 - Fax : (33) 01.30.83.34.49

web : www.inra.fr/Editions/index.html

FRAIS DE PORT

• **France-CEE** : 30 F pour 1 ou 2 exemplaires et ajouter 8 F par exemplaire supplémentaire. Commande inférieure à 60 F : 20 F Franco de port pour plus de 10 ex.

• **Autres pays** : le tarif prioritaire sera systématiquement appliqué (nous consulter : dessauva@versailles.inra.fr).

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE - **INRA Editions** Rte de St-Cyr - 78026 Versailles Cedex
Minitel : 3614 INRA - Fax : 01 30 83 34 49 - web : www.inra.fr/Editions/index.html

