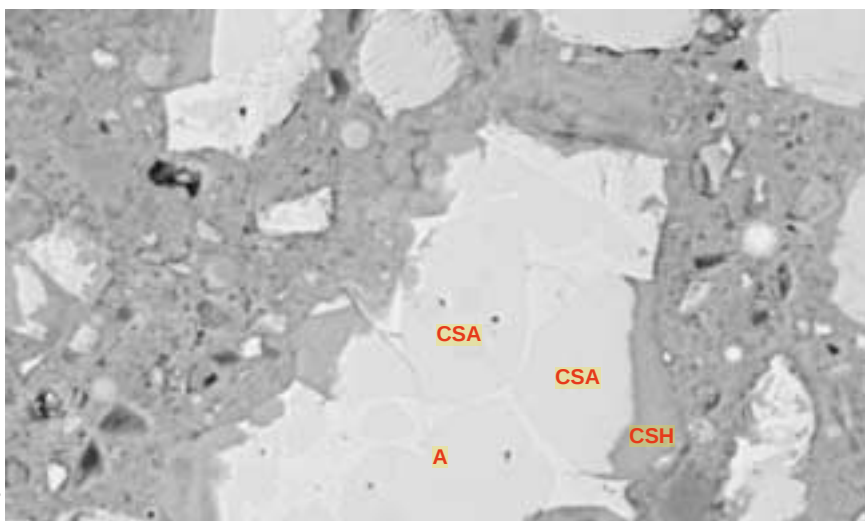
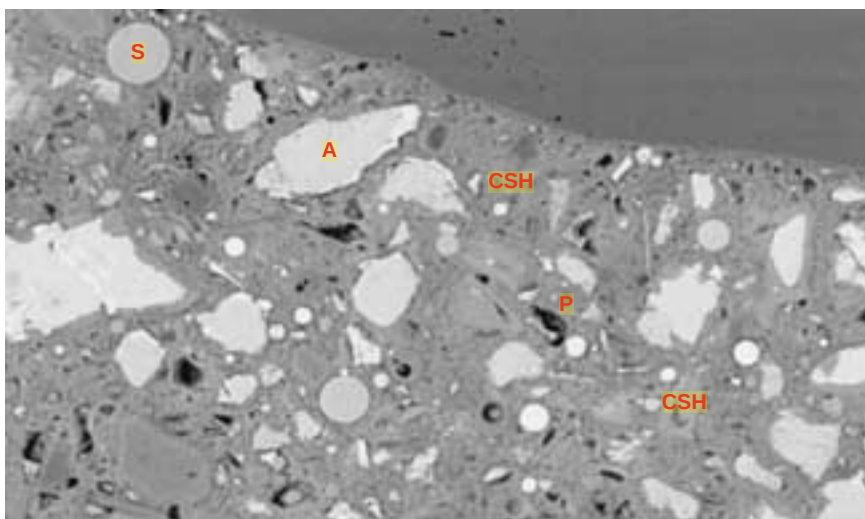
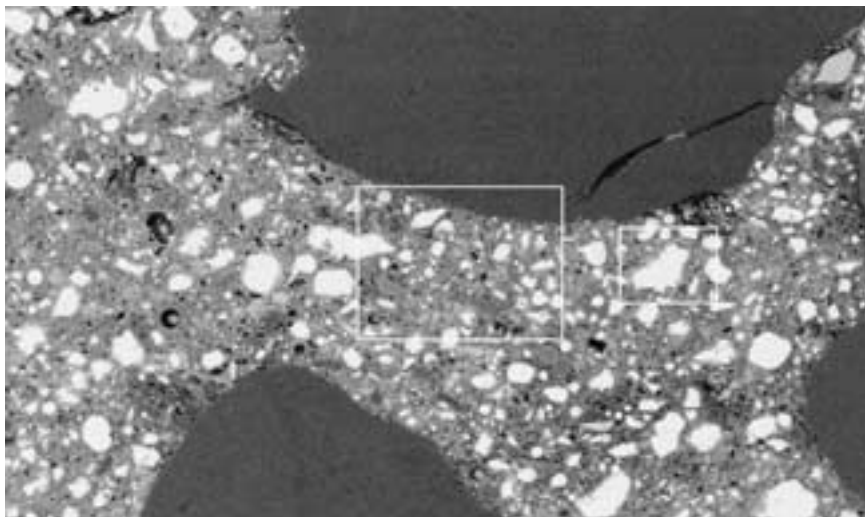




Lafarge

3. STRUCTURE MICROSCOPIQUE DU BÉTON : sur la micrographie supérieure (*grossissement : x100*), on voit les particules de sable (*formes noires*) dans la matrice de ciment. La zone dans le rectangle de gauche est grossie 500 fois dans l'image centrale : on voit alors l'interface d'un grain de sable et du ciment. Les particules blanches sont des grains de ciment anhydre (A). Les formes rondes sont des particules de silice ou des cendres volantes (S). Les zones grises sont composées de silicate de calcium hydraté (CSH). Enfin, quelques pores apparaissent (P). La troisième photographie (*en bas, grossissement x1 000*) montre l'hydratation en cours sur la zone du petit rectangle à droite de la photographie supérieure. Le gros grain blanc au centre est principalement composé de silicate de calcium anhydre (CSA). Le grain blanc en bas est du ciment non hydraté (A). Le silicate de calcium hydraté qui assure la cohésion du béton est en gris (CSH).

tation se poursuit, les forces de capillarité (les mêmes forces que celles qui créent le ménisque, près du bord, dans un verre d'eau) rapprochent encore les grains et engendrent ce que l'on nomme le retrait d'autodessiccation. Certains physico-chimistes font de ce phénomène la clé de la cohésion du matériau.

Enfin le phénomène d'hydratation ralentit, par manque d'eau et par restructuration de la masse d'hydrates : le silicate de calcium hydraté qui se forme initialement est constitué de couches composées de motifs $(\text{CaO}_6)_x$ et de trois ou quatre tétraèdres SiO_4^{4-} enchaînés ; mais, progressivement, les chaînes de tétraèdres SiO_4^{4-} s'allongent, en libérant des molécules d'eau qui hydratent d'autres silicates restés anhydres.

Le réseau poreux étant interconnecté, l'humidité de l'air ambiant s'équilibre avec celle de l'air présent dans le béton : lentement, quand l'humidité relative est de l'ordre de 70 pour cent, ou rapidement, quand l'humidité relative de l'air à l'extérieur du matériau n'est que de 50 pour cent, l'eau qui n'a pas réagi s'élimine par les pores, ce qui provoque un retrait supplémentaire de séchage et accroît la cohésion du matériau. Ce séchage est toutefois réversible.

Au total, le béton est comme un organisme biologique : il a une jeunesse (pendant les premiers jours), où il se développe et devient un matériau plus ou moins résistant ; puis il mûrit (pendant quelques mois) ; et enfin, selon l'hostilité de l'environnement, sa durée de vie se compte en dizaines d'années ou en siècles. Pendant toute sa vie, il échange de l'énergie thermique et de la matière (eau, dioxyde de carbone, agents agressifs tels que chlore et sels divers) avec l'extérieur. Il se souvient de sa jeunesse : sa qualité, fixée lors de cette période, détermine sa résistance aux maladies ou aux conditions pathologiques.

Un état mesuré

Comment savoir qu'un béton est pris ou qu'il est de bonne qualité ? Comme pour tout autre matériau de construction, le béton doit être caractérisé. Certaines mesures se font à partir du béton frais (avant la prise), et d'autres sur le béton durci.

La première caractéristique mesurable sur le béton plastique est... sa plasticité : en vérifiant sa consistance, on s'assure qu'il a une ouvrabilité et une maniabilité appropriées pour une mise

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.

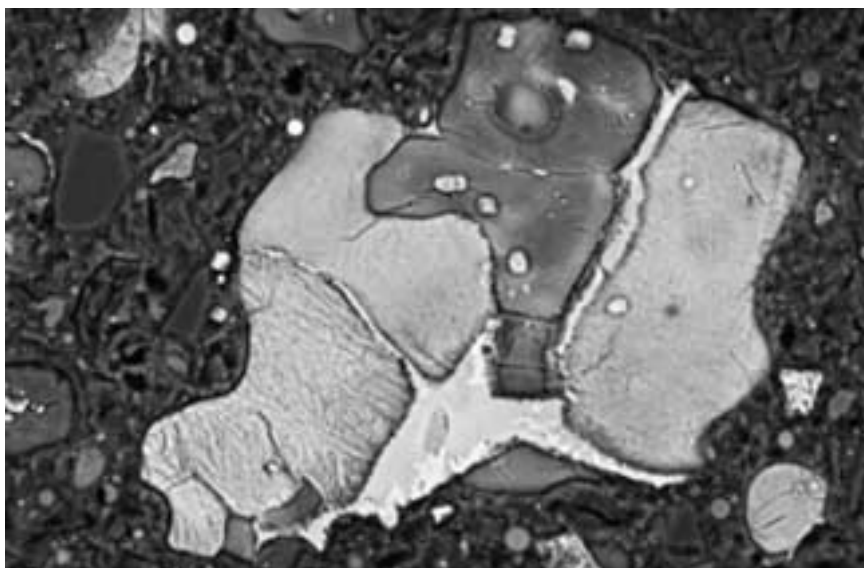
La méthode de mesure la plus couramment utilisée est l'essai d'affaissement : on remplit un cône tronqué, en tôle, avec le béton frais, puis on soulève ce cône pour laisser le béton s'affaisser sous son poids ; on mesure alors l'abaissement du sommet plat du tronc de cône.

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 déverglacage utilisés en hiver pénètrent dans le béton et favorisent l'activité de corrosion.