

La téléportation quantique

Copie d'une particule à distance.

Albert Einstein, fondateur de la relativité, n'admettait pas l'idée d'une action instantanée à distance. Or la mécanique quantique prévoit des actions de ce type. De nombreuses expériences confirment aujourd'hui que, dans une paire de photons dont les états quantiques sont corrélés, la mesure de l'état d'un photon entraîne instantanément une modification de l'état de l'autre photon, quel que soit leur éloignement.

Une paire de photons corrélés peut être représentée par une paire de cartes, l'une noire, l'autre rouge. Donnons ces cartes retournées à deux voyageurs qui s'éloignent. Le premier voyageur décide de retourner sa carte et trouve une carte rouge. Nécessairement, l'autre carte est noire. On comprend que si le premier voyageur ne prévient pas le second de la couleur de sa carte, ce dernier ne peut pas savoir qu'il la verra noire s'il la retourne. Comme le résultat de la mesure du premier voyageur est imprévisible (il aurait pu avoir une carte noire) et que le premier voyageur ne communique pas avec le second à une vitesse infinie, le second ne peut recevoir instantanément l'information.

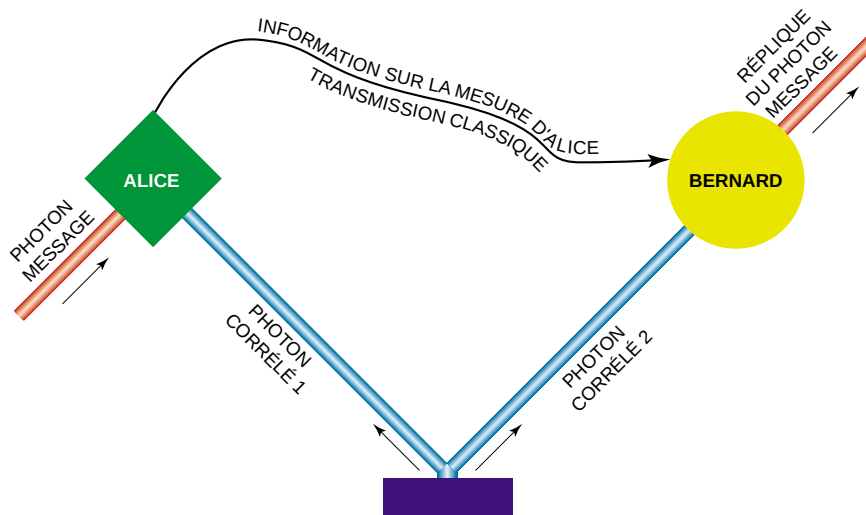
Le corrélation quantique diffère cependant de cette analogie classique :

la couleur de la carte est n'importe quel mélange de rouge et de noir et cette couleur n'est pas fixée tant que la carte n'est pas retournée ; puis, lorsque la carte est retournée, elle affiche une couleur, qui détermine la couleur opposée de l'autre carte (par exemple, rouge + noir pour la première carte devient, pour la seconde carte, rouge – noir).

Le résultat d'une mesure quantique étant fondamentalement impossible à prédire, cette action à distance, non locale, ne peut être utilisée pour propager une information déterminée plus vite que la lumière. Il est néanmoins possible d'utiliser les corrélations pour «téléporter» un photon à quelques centimètres de distance, comme viennent de le faire Anton Zeilinger et ses collègues de l'Université d'Innsbruck.

Imaginons qu'Alice veuille envoyer un message à son ami Bernard, à l'aide d'un canal de téléportation constitué d'une paire de photons corrélés émis par une source extérieure ; Alice et Bernard reçoivent chacun un élément de la paire. Lorsque le photon que détient Alice est modifié, le photon que détient Bernard est modifié instantanément. Ce lien invisible entre Alice et Bernard est fragile : pour maintenir la corrélation, les photons doivent être isolés de leur environnement.

Une tierce personne donne à Alice un photon dont l'état constitue le message. Selon les lois de la mécanique quantique, Alice ne peut connaître le message car toute mesure modifie l'état quantique du système mesuré. Dans ces conditions, comment Alice peut-elle transmettre le message à Bernard ?



Pour téléporter un photon message entre Alice et Bernard, on utilise une paire de photons corrélés. Alice reçoit le photon message et le premier photon corrélé de la paire. Lorsque ces photons arrivent en même temps, elle peut mesurer l'état quantique de la combinaison des deux particules. Cette mesure perturbe le photon corrélé 1. Comme le photon 2 est corrélé au photon 1, son état est instantanément modifié. Alice transmet alors classiquement à Bernard l'information sur la mesure effectuée. À l'aide de cette information, Bernard modifie son photon corrélé de sorte qu'il devienne une réplique exacte du photon message.

Alice mélange de manière indiscernable le photon message et le photon de la paire qu'elle détient. Ce système peut être dans quatre états quantiques possibles. Dans l'expérience réalisée à Innsbruck, Alice ne peut connaître l'état du système que lorsque celui-ci est dans l'un des quatre états. Quand elle fait la mesure et que le système est effectivement dans cet état favorable, elle connaît l'état du système. Au cours de sa mesure, le système est perturbé et le message est irrémédiablement détruit. Cependant, en raison de la corrélation de la paire de photons, la photon de Bernard est instantanément modifié, conformément à la mesure d'Alice.

Bernard ignore toutefois que son photon a été modifié et ne sait encore rien du message. Alice lui transmet alors, par un moyen de télécommunication classique, le résultat de sa mesure (qui à lui seul est insuffisant pour reconstruire le message). Grâce à l'information sur cette dernière, Bernard peut effectuer une expérience pour transformer le photon corrélé qu'il a reçu en un photon identique au photon message. Comme les photons sont indiscernables, sauf par leur état, le photon message que détenait Alice a été «téléporté» à Bernard. Notons cependant que, pour reproduire le message, Bernard a eu recours au résultat de la mesure d'Alice, transmis via un moyen de communication classique, de sorte que la copie de la particule peut se faire au mieux à la vitesse de la lumière.

L'expérience ne fonctionne que lorsqu'Alice reçoit simultanément sur son détecteur le photon message et le photon corrélé, émis indépendamment, ce qui se produit seulement pour une faible fraction des paires reçues. De surcroît, nous avons vu que l'information acquise par Alice, dans la mesure du système composé des deux photons, n'est suffisante pour reconstituer le message que dans un cas sur quatre. C'est un peu comme si, dans *Star Trek*, lors de la téléportation de Monsieur Spock, seuls un quart de ses atomes, pris au hasard, étaient téléportés.

Si cette expérience confirme une nouvelle fois la non-localité de la mécanique quantique, son intérêt pratique est limité. D'une part, un moyen de communication classique est nécessaire, ce qui empêche la simultanéité. D'autre part, seuls des photons ont été ainsi téléportés. Toutefois, on entrevoit maintenant la téléportation d'atomes, ce qui serait plus intéressant, et ces résultats pourraient être utilisés dans le domaine de la cryptographie quantique, une technique de transmission de messages dont la confidentialité est absolue.

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 CLAUD • 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.

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.

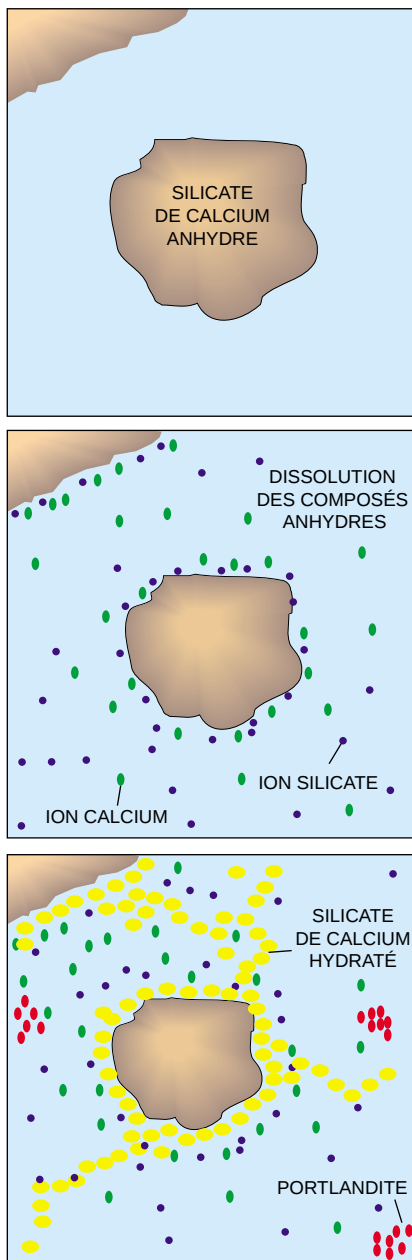
Les superplastifiants, qui ont eu un impact considérable sur le génie civil au cours des 20 dernières années, ont la même action, mais ils sont encore plus efficaces : ces polymères organiques de forte masse moléculaire, par exemple les naphthalène sulfonates ou des macromolécules fabriquées spécialement, 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*).

obtenir une texture spéciale, on applique un désactivant, ou retardateur de surface, à la surface, afin d'éviter le durcissement des premières millimètres. Une fois la masse prise, on nettoie la partie superficielle pour exposer les granulats, choisis pour leurs qualités esthétiques.

Enfin l'emploi de fongicides ou de bactéricides dispersés dans la masse ou dans les couches superficielles ralentit le développement des micro-organismes dans les pores du béton : on évite des contaminations dans les corps de ferme ou dans les usines de produits alimentaires ou pharmaceutiques.

Un matériau vivant

L'ajout de composés variés au béton a ainsi imposé des études qui ont montré à quel point le béton est un matériau «vivant». Sa structuration progressive, de l'état plastique à celui de roche artificielle, se caractérise par le développement d'une masse hydratée, en grande partie composée de silicate de calcium hydraté, mais cette formation n'est que la conclusion d'une série d'effets.

La prise s'effectue en plusieurs étapes. La première est la diminution de l'eau présente entre les particules

solides, consommée par l'hydratation, et par la «contraction Le Chatelier», qui rapproche les grains. Cette contraction, du nom du physicien français Henry Le Chatelier (*voir l'encadré ci-dessous*) correspond à la création de vides : au total, le volume final de ciment hydraté est inférieur d'environ 10 pour cent à la somme du volume d'eau et du volume de ciment anhydre.

Puis les particules solides et les hydrates naissants s'agrègent ; les cristaux hydratés qui croissent finissent pas se rencontrer et par se souder, de sorte qu'un réseau s'étend progressivement dans tout le matériau. Quand l'hydra-

Henry Le Chatelier et le ciment

Henry Le Chatelier fut le premier physico-chimiste à s'intéresser au béton. Né en 1850 à Paris, il effectua, comme son père, ses études supérieures à l'École polytechnique. Sorti deuxième de sa promotion, il passa ensuite trois années à l'École des mines de Paris. À partir de 1895, il fut le conseiller scientifique de la Société Lafarge. De son œuvre, on retient surtout son action en faveur de l'introduction de la science dans le milieu industriel, ses études du grisou, de la chaux, des plâtres et des ciments, de la mécanique chimique, de la chimie industrielle, de la pyrométrie.

Sa thèse, soutenue en 1887, portait sur les matériaux hydrauliques, tel le plâtre. Il découvrit que, quand on chauffe le gypse (du sulfate de calcium hydraté, de formule $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$) à une température de 150 °C, on ne forme pas le composé anhydre CaSO_4 (l'«anhydrite»), qui n'apparaît que vers 200 °C, mais un sulfate de calcium faiblement hydraté $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$, ou semi-hydrate. C'est le plâtre usuel.

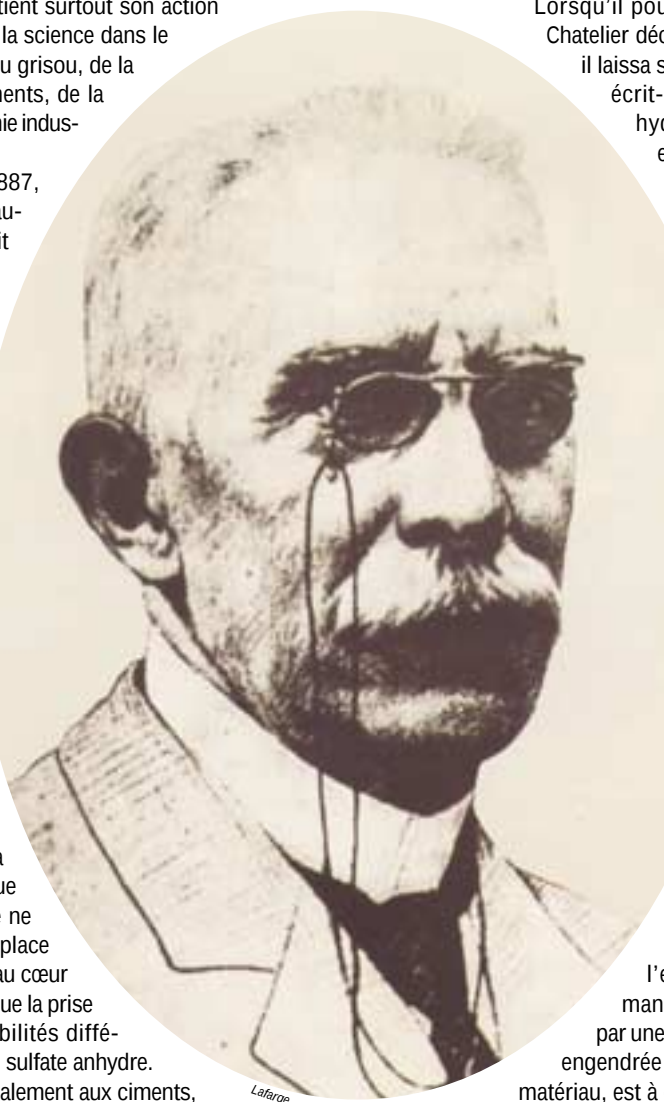
Suite à cette découverte, il s'intéressa à un fait curieux : l'hydratation du plâtre conduit à la formation d'une masse d'hydrates douée de caractéristiques mécaniques, tandis que l'hydratation de la chaux conduit à sa désagrégation. Il s'étonna que les amas d'hydrates de plâtre ne cristallisent pas en lieu et en place de l'anhydrite, mais plus loin, au cœur de la solution. Il montra alors que la prise du plâtre est due à des solubilités différentes du sulfate hydraté et du sulfate anhydre. Cette découverte s'applique également aux ciments,

qui prennent de la façon suivante : les minéraux anhydres se dissolvent dans l'eau ; comme leur solubilité est supérieure à celle du silicate de calcium hydraté, ce dernier précipite ; cette précipitation réduit les concentrations en éléments dissous et provoque une nouvelle dissolution qui engendre une nouvelle précipitation, etc.

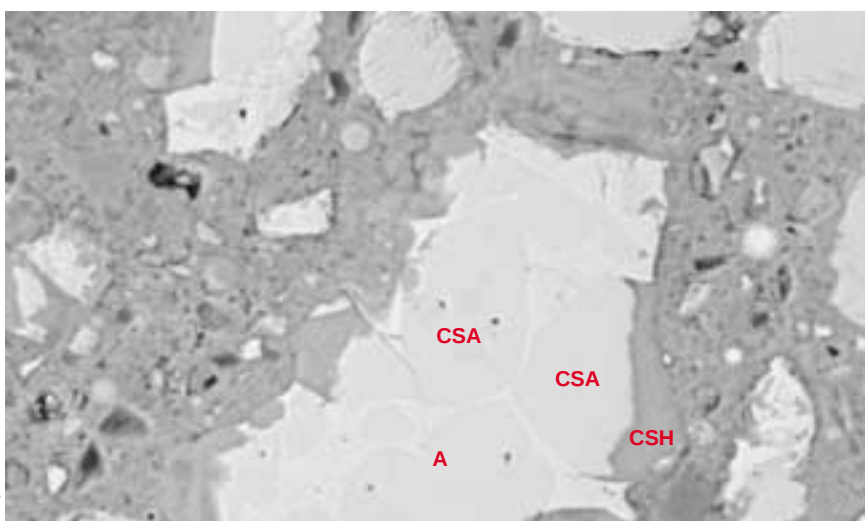
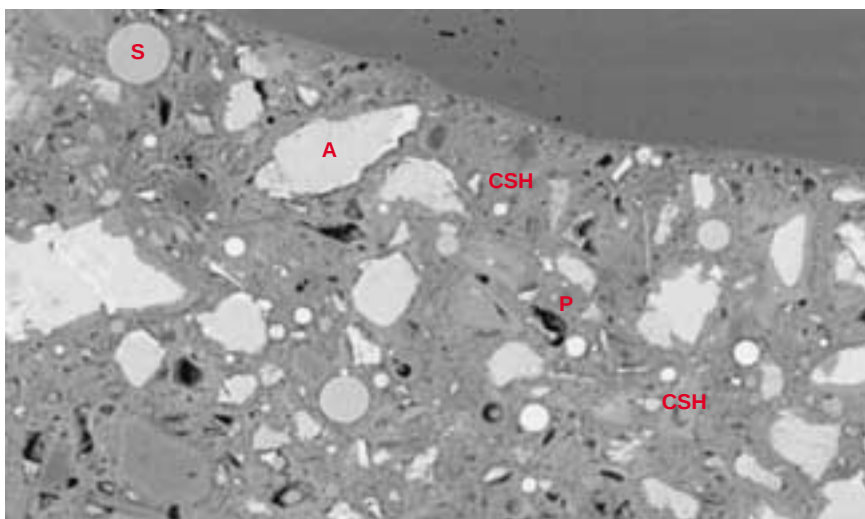
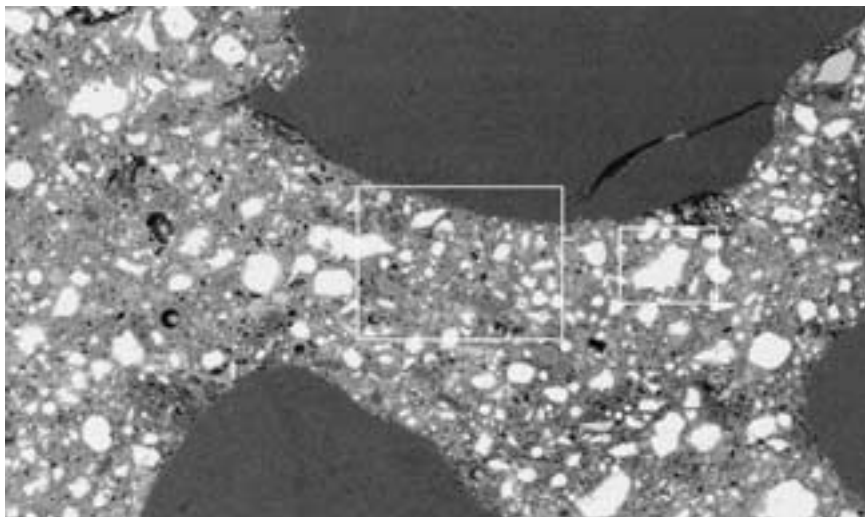
Lorsqu'il poursuivit ses études du ciment, Le Chatelier découvrit un autre phénomène auquel il laissa son nom : «C'est un fait bien connu, écrit-il, que le durcissement des liants hydrauliques [plâtre ou ciment, par exemple] est accompagné de changements de volume plus ou moins importants ; mais les résultats obtenus jusqu'ici paraissent à première vue assez contradictoires, parce que l'on néglige habituellement de faire une distinction indispensable entre le volume absolu et le volume apparent. On suppose *a priori* qu'ils doivent varier dans le même sens ; cela n'est nullement nécessaire, et même, en réalité, c'est le contraire qui se passe.»

Le Chatelier montra que l'hydratation du ciment s'accompagne d'une diminution notable du volume absolu, et que ce phénomène permet de suivre la cinétique d'hydratation du ciment anhydre.

Aujourd'hui cette contraction, qui est resté longtemps un fait ayant peu de conséquences pratiques, devient importante : avec l'essor des bétons hautes performances, qui sont souvent caractérisés par une quantité d'eau réduite, la fissuration engendrée par le retrait dû à l'hydratation du matériau, est à éviter absolument.



Lafarge



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.

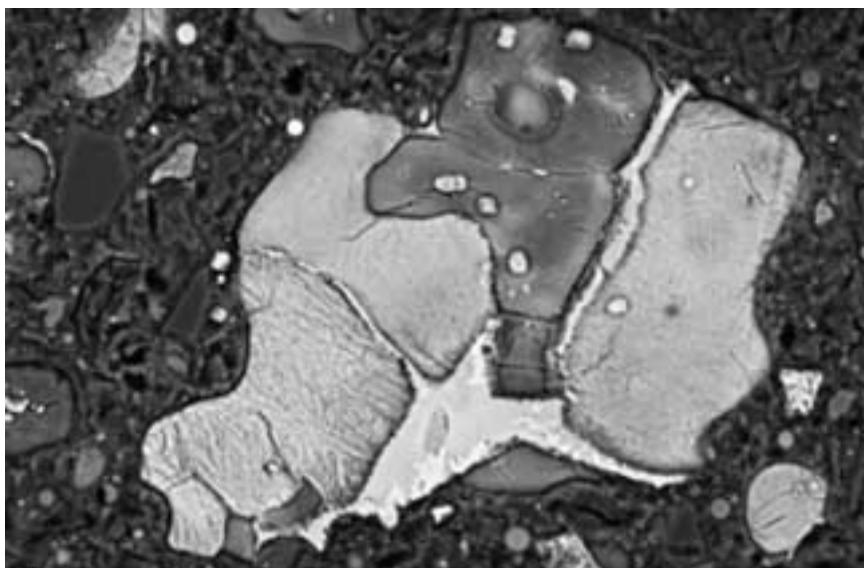
La méthode de mesure la plus couramment utilisée est l'essai d'affaissement : on remplit un cône tronqué, en tôle, avec le béton frais, puis on soulève ce cône pour laisser le béton s'affaisser sous son poids ; on mesure alors l'abaissement du sommet plat du tronc de cône.

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 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-



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 EDATEUR 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

