

LES BÉTONS

PAR PAUL ACKER

Ces dix dernières années, le béton est devenu, grâce à des progrès scientifiques qui ont mobilisé les principales disciplines de la science des matériaux, d'une extraordinaire diversité. S'il est toujours le matériau de construction le plus simple à fabriquer et à mettre en œuvre, avec des matières premières courantes et un matériel rudimentaire, il est aussi capable, aujourd'hui, grâce à une technologie de formulation sophistiquée, d'approcher les performances mécaniques de l'acier, de présenter une résistance exceptionnelle aux attaques physiques et chimiques, d'offrir aux architectes une qualité de surface et des possibilités architectoniques encore plus étendues. On présentera donc ici ce matériau selon deux axes : celui de son extraordinaire aptitude à répondre à des cahiers des charges de plus en plus exigeants et celui d'un merveilleux champ d'expérience pour la Science.

La production annuelle de béton est, en volume comme en poids, supérieure à celle de tout le reste, tous matériaux confondus. Ainsi, si l'on ne faisait pas de béton, il nous serait totalement impossible de réaliser ce qu'on réalise annuellement au niveau mondial en matière de construction. Si l'on considère les besoins en matière de logements, d'écoles, d'hôpitaux, de routes, on serait incapable aujourd'hui de les satisfaire sans le béton, pour une simple question de disponibilité des matières premières sur la planète.

Le béton, lui, est inépuisable, puisqu'il faut de l'eau, du sable, des cailloux et, pour faire du ciment, il faut du calcaire et de l'argile, un ensemble d'ingrédients qu'on trouve partout, même sur la lune. À part quelques îles des Antilles ou du Pacifique, il n'y a aucun pays qui ne puisse avoir sa propre cimenterie, alimentée avec les matières premières locales. En plus, le béton est parfaitement recyclable.

Le problème avec le béton ne se pose donc pas vraiment en termes de compétition avec les autres matériaux : il faut l'utiliser au mieux, en association notamment avec les autres matériaux. Son affinité pour l'acier est connue, on connaît le développement du béton *armé*. Son alliance avec les aciers les plus performants, dans les années 1950, a donné le béton *précontraint*, qui a permis les plus belles réalisations du génie civil des cinquante dernières années. Plus récemment (à la fin des années 1980), sont apparus les bétons dits *de hautes performances (BHP)*, qui ont des résistances mécaniques 2 à 3 fois plus élevées, mais qui se sont développés à cause surtout de leur meilleur comportement dans le temps, de leur résistance aux échanges d'eau, d'humidité, à l'action des agents qui sont à la source de dégradations observées. Sans les BHP, on n'aurait pas pu construire le tunnel sous la Manche, l'Arche de la Défense, le Pont de Normandie ; ou en tout cas, pas de la même façon.

Non pas qu'on n'ait jamais réalisé, auparavant, des bétons performants et durables. Il existe des ouvrages construits au XIX^e siècle qui sont en très bon état et le resteront (voir l'immeuble construit en 1900 par Hennebique à Paris, 1 rue Danton). Le Panthéon, à Rome, est un des ouvrages de l'Antiquité qui a le mieux résisté ; c'est un béton, il en a tous les ingrédients, en termes chimiques et granulaires. L'observation de ces performances a d'ailleurs servi d'appui et de guide à nos recherches.

Mais ces performances ne pouvaient pas être exploitées parce qu'on ne savait pas les reproduire, parce qu'on ne savait pas quelle serait leur maintien dans le temps, et que, même si on l'avait su, on n'aurait pas su dire pourquoi, ni comment. C'est pourquoi ces performances ne pouvaient pas être *prescrites* par le client, par le maître d'œuvre.

Pour le tunnel sous la Manche, par exemple, lorsque les experts du *Consortium*, en 1988, ont exigé qu'on leur démontre que le béton tiendrait cent vingt ans sans aucune altération, on a pu leur répondre, en établissant d'abord la liste des mécanismes de dégradation possibles, puis en

cherchant pour chaque mécanisme, à partir de grandeurs physiques mesurables, une *borne supérieure* à sa vitesse.

Autre exemple : les États-Unis et le Canada sont aujourd'hui confrontés à un problème de plus en plus difficile : les routes et les ponts en béton, qui là-bas n'ont pas été construits avec les mêmes niveaux d'exigence qu'en Europe, se dégradent très vite, et les budgets d'équipement sont presque entièrement consommés par le coût des réparations et des reconstructions du réseau existant. Le Ministère des transports du Québec a pris en 1998 une décision courageuse : depuis deux ans il impose systématiquement, dans les appels d'offre, des bétons de hautes performances pour les ponts et les ouvrages extérieurs, parce qu'on sait aujourd'hui que ces bétons résistent et durent beaucoup plus longtemps. Cela coûte un peu plus cher, et grève encore un peu plus les budgets, mais c'est l'unique façon de sortir de l'impasse.

Cela aurait été inconcevable il y a quinze ans. Aujourd'hui l'ingénieur dispose d'outils, de méthodes, de logiciels, construits sur des bases scientifiques, qui lui permettent de déterminer la composition optimale du matériau pour une application donnée, pour un *cahier des charges* défini par le maître d'ouvrage en termes de propriétés d'usage. Une véritable *ingénierie du matériau*, qui résulte de la convergence :

- d'une part, de la connaissance des conditions d'obtention d'un béton qui soit beau et résiste dans la durée, donc des paramètres-clés, tant au niveau de la formulation que de la mise en œuvre ;
- d'autre part, du développement de toute une génération de poudres minérales et, surtout, de produits organiques (notamment de polymères qu'on appelle les *superplastifiants*) qui élargissent considérablement la gamme des performances possibles.

Ces moyens sont opérationnels, ils sont utilisés sur des chantiers, ils ont prouvé leur efficacité technique et économique, mais ils sont encore assez peu utilisés.

Les derniers progrès, notamment, sont spectaculaires dans deux domaines :

- celui de la mise en œuvre, avec les bétons *autoplaçants*, qui se mettent en place sans vibration (un chantier de bâtiment, aujourd'hui, peut être totalement silencieux), avec souvent de très beaux parements ; si ces bétons se développent, cependant, c'est d'abord à cause d'une mise en œuvre simple et plus rapide et d'une réduction significative de la durée des chantiers ;
- celui des *ultra-hautes performances*, sur lesquelles nous reviendrons.

Il faut savoir aussi qu'*esthétique* et *durée de vie* sont profondément liées. Les architectes et les historiens expliquent que l'appréciation esthétique, le goût, est d'abord un résultat de l'histoire et de l'expérience des hommes : c'est parce que la pierre de taille a résisté au temps, qu'elle est, aujourd'hui, belle à nos yeux. Pour le béton, on voit bien que ce débat-là n'est pas encore tranché, puisqu'il y a, dans notre patrimoine bâti, beaucoup de beaux ouvrages en béton et beaucoup de vilains !

Les moyens existent donc aujourd'hui pour améliorer significativement notre environnement quotidien et ils sont peu coûteux. En fait, si l'on prend en compte les coûts de nettoyage, de réhabilitation, de démolition, de reconstruction, ils conduisent à une réduction considérable des coûts globaux, sans égale sur le plan économique.

Le seul obstacle au développement de ces moyens, c'est le code des marchés publics qui est basé sur la règle *du moins-disant*, qui pénalise systématiquement les solutions durables, malgré quelques mesures correctives. Il est donc urgent maintenant de normaliser des indicateurs *mesurables*, corrélés avec les coûts d'entretien et la durée de vie, afin de pouvoir les imposer dans les contrats. C'est par là qu'on a commencé pour les voitures et ça a marché. Il faudra bien y arriver aussi pour les bâtiments et les ouvrages d'art. L'enjeu est tout de même plus important !

Passons maintenant à la science. De quelle science, au juste, s'agit-il ?

Le béton, on l'a vu, a une propriété magique qui est que, quelques heures après avoir mélangé les matières premières, on voit le mélange durcir tout seul, le ciment *fait prise*. Derrière ce changement, il y a *un cortège* de réactions chimiques, dont on connaît assez bien les équations. C'est de la *Chimie*.

Il y a aussi cette propriété quasi miraculeuse qui est que la prise ne se fait pas instantanément, mais seulement au bout de 2 ou 3 heures, ce qui est particulièrement intéressant sur les chantiers ! C'est de la *Physique*, et de la *Chimie physique*, avec des processus de *dissolution* à la surface des grains de ciment et de *diffusion*.

D'un autre côté, l'ingénieur qui calcule la structure, qui détermine les dimensions des poutres, la section des poteaux, les détails du ferrailage, etc., fait essentiellement des calculs *mécaniques* et utilise la *Mécanique des solides* et la *Résistance des matériaux*.

Dans ses calculs, l'ingénieur est cependant obligé de prendre en compte deux particularités essentielles du béton : *le retrait* et *le fluage*, deux particularités qui sont tout à fait exceptionnelles pour un matériau minéral, et qui ont longtemps gêné l'ingénieur, qui n'arrivait pas à les prendre en compte correctement.

Le retrait, c'est une déformation lente, pas très importante, de l'ordre de 1 pour 1000. On ne la voit pas à l'œil, mais, comme les dilatations thermiques, cette déformation est parfois suffisante pour produire des fissures qui, elles, peuvent être très visibles et compromettre la durée de vie de l'ouvrage.

En fait, il y a toujours des fissures à la surface du béton, simplement on ne les voit pas toujours à l'œil nu. Ces fissures sont liées au séchage du matériau, car il y a toujours un départ d'eau de la surface vers l'extérieur. Il faut savoir aussi qu'une poutre ou une dalle en béton armé est toujours fissurée, parce que, si le béton ne fissure pas, l'armature ne travaille pas, elle ne sert à rien : *la fissure fait partie du comportement normal du béton armé*, elle est même indispensable au bon fonctionnement de l'ouvrage.

Par contre, il est essentiel que ces fissures restent fines, parce qu'alors l'eau liquide est fixée par les forces capillaires et ne peut déplacer les ions qui assurent un pH élevé, ce qui protège indéfiniment les aciers du risque de corrosion. Ce n'est que si leur ouverture dépasse 2 ou 3 dixièmes de millimètre, que le risque existe : au-dessus de cette valeur, en effet, les mouvements d'eau liquide sont possibles et peuvent déplacer les ions qui assurent un pH élevé. Toute la théorie du béton armé est basée là-dessus, et les règles de calcul ont été calibrées pour que les ouvertures des fissures restent en dessous de cette valeur critique. Et cela fonctionne très bien, puisque les premiers ouvrages construits sur cette base ont maintenant plus d'un siècle.

En revanche, lorsque le retrait est mal pris en compte, l'ouverture des fissures peut dépasser cette valeur, et les conséquences peuvent être très graves.

Le fluage est lui aussi une déformation lente, c'est la déformation qui s'ajoute à la précédente lorsque le béton est chargé. Le fluage, lui, est sans conséquence dans les bâtiments et les constructions en béton armé, mais pas dans les constructions en béton précontraint, dans lesquelles il conduit à une perte continue de la précontrainte, perte que l'ingénieur doit évaluer et prendre en compte dans ses calculs. On sait aujourd'hui que ces deux caractéristiques sont toutes deux liées à la présence d'eau non liée chimiquement au sein du matériau, dans les pores du matériau, et aux mouvements de cette eau dans les pores. Là, c'est le domaine de la *physique des milieux poreux*.

Les ingénieurs croient souvent, comme je l'ai moi-même longtemps cru, qu'il suffit de faire des essais, d'enregistrer des courbes et de les faire entrer dans les équations de la Mécanique. *Excel* par exemple, fait cela très bien : vous lui donnez des résultats chiffrés, il fait passer une courbe par ces points, et vous en donne une équation. Quand on fait cela, on n'a rien, parce que cela ne dit rien de la façon de faire dans un autre cas de figure.

Voici un exemple simple qui montre que cette démarche - faire entrer des processus physiques par voie de *paramétrage* dans les lois de la Mécanique - est impossible. Il s'agit là de la partie en béton du tablier du Pont de Normandie :

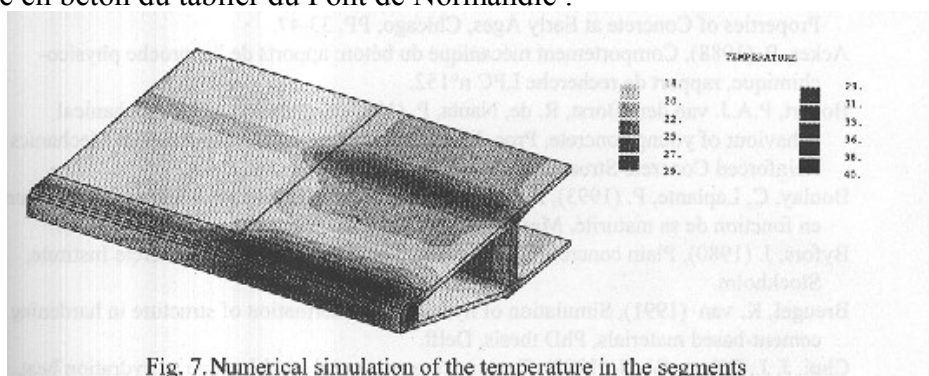


Fig. 7. Numerical simulation of the temperature in the segments

Pour des questions de résistance au vent, le tablier est dessiné comme une aile d'avion, et comprend des parties massives aux deux extrémités latérales, dans lesquelles la température peut s'élever, dans les jours qui suivent le coulage du béton, jusqu'à 60 ou 70°C, parce que la prise du ciment dégage une grande quantité de chaleur, dont les 3/4 en une dizaine d'heures. Dans le bâtiment, ce phénomène est ignoré ou négligé parce qu'on a rarement de telles épaisseurs et que les pièces peu épaisses refroidissent bien plus vite.

Les lois de la thermique montrent (par l'analyse dimensionnelle) que la durée de refroidissement d'un voile varie comme le carré de son épaisseur : ainsi, un voile de 1 m d'épaisseur, par exemple, refroidit en 10 jours, un voile de 20 cm, donc, 25 fois moins, un peu moins de 10 h. Dans le premier cas, toute la chaleur produite par la prise du ciment s'accumule au centre de la pièce, alors que sa peau a à peine commencé à refroidir. Dans l'autre cas, la chaleur diffuse vers l'extérieur et s'évacue plus vite qu'elle n'est produite.

Ainsi on voit sur la figure que les zones moins épaisses chauffent moins. On comprend donc que les zones fines vont être mises en traction avec un risque de fissuration. Ce calcul tient compte explicitement d'un *couplage thermo-chimique*, lié à l'effet accélérateur de la température sur la cinétique chimique, donc sur le flux de chaleur. Ce phénomène d'*auto-accelération* amplifie encore les gradients de température et l'effet d'échelle.

Ce type de logiciel est capable de prédire les températures dans les ouvrages en béton à quelques degrés près, et les contraintes qui en résultent peuvent dans certains cas être plus importantes ou plus critiques que les contraintes dues aux charges de service. On utilise ces logiciels, soit pour vérifier que les tractions d'origine thermique restent acceptables, soit, dans le cas contraire, pour comparer les différentes solutions techniques, leur efficacité et leur coût. L'ingénieur est donc obligé de passer par un calcul thermique, et ne peut faire entrer la thermique par quelque « paramètre caché » dans ses équations mécaniques.

Les effets de l'eau et de l'humidité sont beaucoup moins évidents, mais je voudrais simplement ici expliquer deux mécanismes élémentaires qui nous ont permis de comprendre tout le reste et de reconstruire le *puzzle* complet.

Pourquoi l'eau a-t-elle une telle importance dans le béton ?

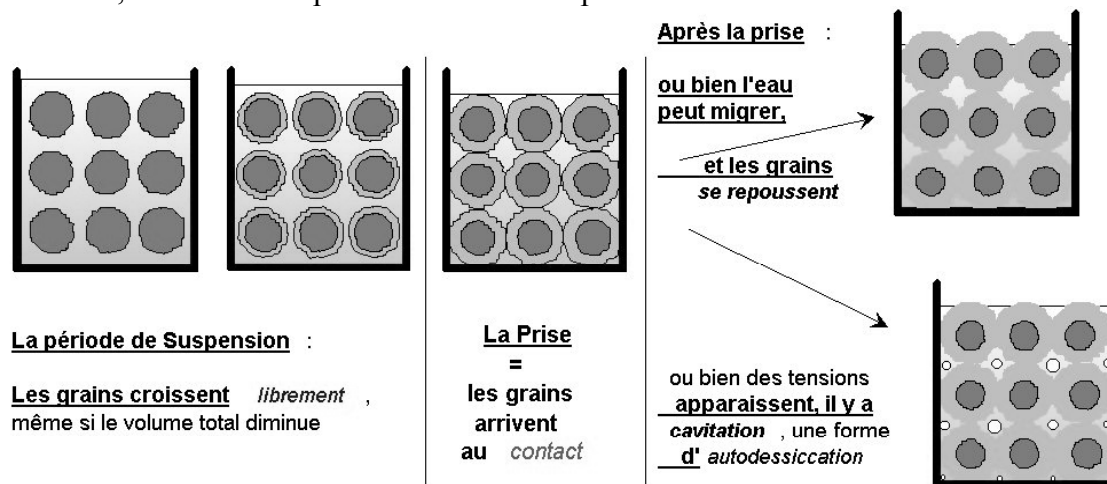
Pour comprendre le mécanisme de base du retrait, prenons une expérience très simple, celle du tube capillaire que l'on plonge dans un récipient d'eau. Si l'eau monte dans le tube, c'est parce que l'énergie de surface entre le liquide et le solide impose un *angle de mouillage* (qui ne dépend pratiquement que de la nature chimique des 2 corps, solide et liquide, et d'aucun autre paramètre), donc la courbure du ménisque. Plus ce ménisque est courbe, plus les molécules sont en déséquilibre et les forces moléculaires qui agissent ici entraînent un écart de pression entre les deux fluides, liquide et gaz, écart qui fait monter l'eau dans le tube d'une hauteur qui le compense exactement.

Ainsi, si le tube est très fin (si son diamètre est inférieur, typiquement, à 1 micron), la pression dans le liquide est négative, et le tube est alors soumis à une traction sur sa face intérieure. Quand on souffle dans un ballon, on augmente la pression qui pousse sur la paroi intérieure de la membrane, mais celle-ci, tout le monde le sait, est tendue. Dans le tube, c'est simplement l'inverse : l'eau tire sur la surface, ce qui met le tube en compression.

Il y a encore aujourd'hui une réticence à accepter que l'eau puisse exercer des tractions de plusieurs mégapascals. Si l'eau présente une résistance négligeable au cisaillement (déformation qui peut se faire à volume constant), elle résiste fortement aux variations de volume, en traction comme en compression. Le béton est un matériau poreux dont les pores (15 à 20 % du volume total, soit 30 à 50 % dans la pâte de ciment) ne peuvent se voir à l'œil nu, à cause de leur taille (qui s'étend de 2 nanomètres au micron, avec une distribution de type *fractale*, et un pic de distribution autour de 1.7 nm –les pores des hydrates).

Si on mesure la pression dans le ballon gonflé et son rayon, on calcule aisément la tension de la membrane. De même, on sait calculer les contraintes et les déformations qui résultent des tensions capillaires dans un béton. La géométrie des pores est plus complexe, mais on a aujourd'hui tous les outils numériques et conceptuels pour le faire.

Voyons maintenant comment se constitue le matériau, du moins la phase active qui est la pâte de ciment, comment elle passe de l'état de suspension à l'état de solide :



Retrait du matériau et croissance des hydrates ont longtemps été considérés comme contradictoires. En fait, on voit sur ce schéma que, au moins pendant une première phase, le volume total peut diminuer même si les grains solides croissent. Il y a cependant un moment où les grains vont entrer en contact, selon un processus de type *percolation*, et, après le seuil de percolation, il n'y a que deux solutions possibles :

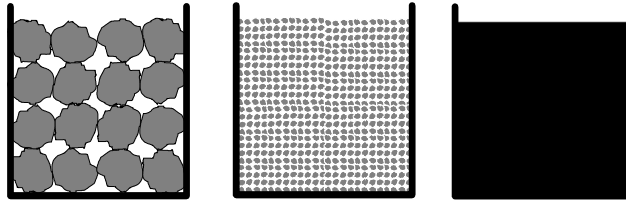
- soit l'eau pénètre à l'intérieur pour compenser le déficit volumique, encore faut-il que l'eau soit libre de se déplacer, ce qui n'est jamais totalement le cas ! on sait aujourd'hui que ce processus existe effectivement en surface, mais qu'il est limité à une épaisseur qui dépend directement de la compacité du béton : plusieurs centimètres dans les bétons courants, quelques millimètres dans les BHP ;
- soit des bulles de gaz apparaissent ou croissent au sein du matériau (en fait, il s'agit essentiellement d'une augmentation de la taille des bulles, de ce qu'on appelle l'*air occlus*, car il y a toujours, dans un béton qui sort du malaxeur, au minimum 1 % du volume sous forme de petites bulles d'air).

Il y a donc désaturation du matériau. Pendant un moment, les bulles croissent, mais elles ne peuvent rester sphériques, de par la taille et la géométrie des pores. Ces bulles croissent en se propageant dans les pores et finissent par se rejoindre (encore un processus de percolation), généralement au bout de quelques heures. Ce seuil de percolation apparaît nettement avec un capteur hygrométrique noyé dans le béton, il est parfaitement instantané, ce qui signifie que la phase gazeuse connectée se met très vite en équilibre avec la pression atmosphérique.

C'est là que le mécanisme du tube capillaire se met en marche : l'interface est courbe, cette courbure ne dépend que de la géométrie des pores, on est largement en dessous du micron, donc l'eau est en traction, donc le squelette minéral en compression, ce qui se traduit par une déformation qui est le retrait.

Une autre étape importante a été franchie dans les années 1980, quand on a commencé à construire une théorie des mélanges granulaires. Cette théorie est basée sur l'idée suivante :

Tous les empilements *monodisperses* ont des compacités voisines, de l'ordre de $C_0 = 0,60$:

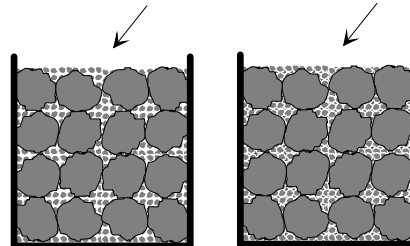


les mélanges ont des compacités bien plus basses :

$$0,60 + 0,40 \times 0,60 = 0,84$$

$$0,84 + 0,16 \times 0,60 = 0,936$$

etc.



soit :

$$1 - (1 - C_0)^n$$

où n est le nombre de classes granulaires.

Quand on n'a que des grains de même taille, on a toujours un volume de vides important, de l'ordre de 40 %. Ce taux est pratiquement *invariant*, car l'homothétie conserve les rapports volumiques. La propriété centrale des mélanges granulaires, est que, si l'on mélange deux classes de grains de tailles différentes, alors la compacité est significativement supérieure et tend, pour un mélange construit par exemple comme celui-ci, vers une formule simple qui se généralise aux mélanges de n classes et qui converge très vite vers 1, c'est-à-dire vers l'absence totale de vides. D'autres effets doivent ensuite être pris en compte, et cette idée a permis de construire des modèles mathématiques puissants.

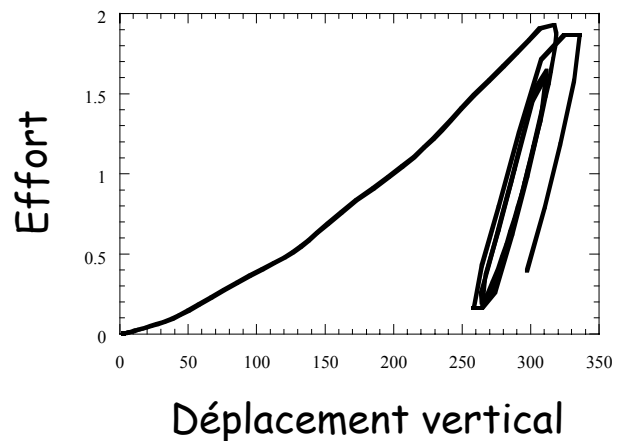
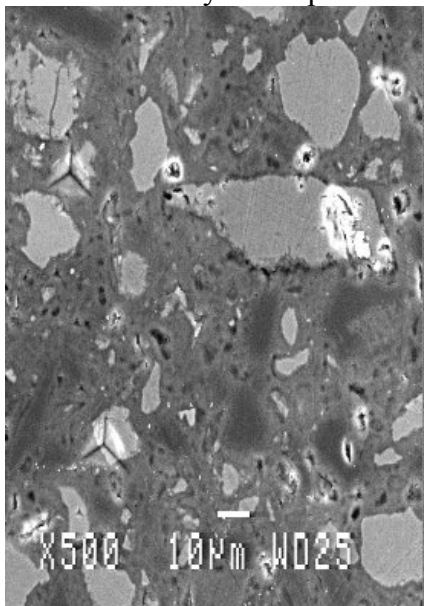
On peut dire qu'on a franchi une première frontière conceptuelle et technologique quand on a ajouté au béton un constituant granulaire de taille inférieure à celle des grains de ciment, et cela a produit la génération des bétons HP, et qu'on a franchi une deuxième frontière quand on a complété la gamme des tailles en continu jusqu'à celle de la molécule d'eau, ce qui a ouvert la voie à la génération des BFUP, les bétons fibrés ultra-performants.

Les premiers ne sont pas un véritable saut technologique, car ils restent fragiles et ne suppriment pas la nécessité du ferrailage. Ils sont cependant utilisés, aujourd'hui, soit lorsque l'on veut assurer une certaine durée de vie (cf. les exemples du Canada ou du Transmanche), soit lorsqu'on veut augmenter une performance mécanique (une réduction significative du fluage comme, par exemple, pour les pylônes du Pont de Normandie).

Les seconds, par contre, comme *Ductal*[®], qui ont, grâce à une matrice très performante (plus de 200 MPa en compression) et des fibres, un comportement non fragile, permettent de supprimer toutes les armatures passives, ce qui ouvre un champ tout neuf pour le génie civil et l'architecture, en termes de légèreté, de durabilité, de forme et d'esthétique : passerelle de Sherbrooke, au Canada (photo), structures internes des aéroréfrigérants EDF, etc.



Avec un matériau comme Ductal[®], par exemple, on a fait d'autres progrès significatifs dans la compréhension du matériau, dont le plus spectaculaire, sans doute, a été apporté par une méthode d'analyse très puissante issue de la micromécanique : la *nano-indentation* :



Cet essai consiste à enfoncer, sur une surface polie, une fine pointe tétraédrique de taille inférieure à celle des grains des différentes espèces chimiques qu'on trouve dans le ciment. On applique une force croissante et on mesure le déplacement vertical de l'aiguille. Avec quelques cycles de charge et de décharge, et des paliers sous charge, on peut accéder aux trois composantes qui caractérisent le comportement mécanique de chaque espèce qui entre dans la microstructure du matériau : une composante élastique, avec la pente au premier déchargement, une caractéristique plastique, avec la part non linéaire au premier chargement et une caractéristique visqueuse, avec la vitesse de déformation au cours d'un palier. L'examen au microscope permet ensuite d'associer une courbe enregistrée à chaque espèce minérale.

Cette méthode a permis de montrer que seuls les hydrates, les produits formés par la réaction chimique entre l'eau et les silicates du clinker fluent de manière significative, et que dans les matériaux de haute performance, et tout particulièrement dans un matériau comme Ductal[®], seule la périphérie des grains était hydratée, l'hydratation s'arrête par épuisement de l'eau des capillaires, et le cœur des grains de ciment reste intact, avec un module élastique élevé (supérieur à 100 MPa). Ils se comportent donc comme des inclusions élastiques, et non viscoélastiques. De ce fait, non seulement le volume des hydrates est plus faible, mais sa répartition spatiale en surface des grains fait qu'au cours d'un chargement, la redistribution de contrainte, caractéristique des matériaux composites, conduit à de rapides concentrations de

contraintes, de sorte que le champ de contrainte tend vers celui d'un empilement sec de granulats.

Ces résultats ont permis de comprendre l'origine du fluage de tous les bétons (dont celui, significativement plus faible, des BHP et celui, presque nul, de Ductal®), mais aussi un dernier aspect mal compris du retrait : le retrait se poursuit plus longtemps que l'hydratation, il s'agit en fait d'un fluage des hydrates sous une contrainte permanente, la tension capillaire. On a dès lors une description complète du comportement mécanique, description qui fonde une méthodologie de formulation qui fonctionne aujourd'hui dans tous les secteurs de la construction.

CONCLUSION : LE BETON, PARADIGME D'UNE SCIENCE DES COUPLAGES

La Science des matériaux constitue aujourd'hui une vraie démarche scientifique, spécifique à l'approche des matériaux complexes, en ceci qu'elle associe plusieurs sciences, avec des modes d'association et des concepts inédits.

Parmi ces disciplines il y en a une qui est nouvelle, originale, et qui joue un rôle particulier : la Micromécanique par exemple, la mécanique que l'on fait tourner à l'échelle de la microstructure, à une échelle où l'on peut identifier les différentes espèces chimiques, les échanges entre phases, et décrire complètement des mécanismes physiques. La microstructure est le lieu du dialogue entre les représentants des différentes disciplines scientifiques, l'endroit où l'on démonte les couplages. Cette notion de couplage donne une structure et un statut à la Science des matériaux.

S'il a longtemps été considéré comme un matériau sale, inabordable, rétif à toute approche scientifique, le béton apparaît aujourd'hui comme le paradigme de la Science des matériaux, parce qu'il est le seul, sans doute, à mobiliser toutes les disciplines qui la constituent, et parce qu'il a donné au concept de Micromécanique un rôle central et constitutif de cette Science.