

Matériaux pour le bâtiment et le génie civil

Philippe Boch et Bernard Halphen

Summary

Materials for building and civil engineering

The materials for building and civil engineering demonstrate that wide market, low cost, and high performances can go together. One example is the permanent improvement of the properties of concrete. The very fine microstructure of ultra-high strength concrete yields compressive strength higher than 300 MPa, that is about ten times the value for conventional concrete. Self-leveling concrete greatly facilitates placement. Besides cementitious materials, significant improvements can be noticed in characteristics of bituminous mixtures, wood products and glass. For all materials, efforts are made to increase reproducibility and durability, to improve esthetics, and to organize the final recycling.

Mots-clefs

Matériaux, bâtiment, génie civil, béton, enrobés bitumineux.

Key-words

Materials, building, civil engineering, concrete, bituminous mixtures.

Les matériaux pour le bâtiment et le génie civil constituent l'exemple extrême des « matériaux de grande diffusion » : tonnages énormes (exprimés en milliards de tonnes, à l'échelle mondiale) et prix moyens très bas (la tonne de ciment vaut moins que quelques grammes de semi-conducteur !) mais, et ce n'est pas le moindre paradoxe, performances remarquables et sans cesse améliorées...

Un matériau est un « solide utile », qui revendique cette utilité, et dont la conception, la réalisation, et la mise en œuvre, ne peuvent s'imaginer autrement que par référence à l'application escomptée. Or, l'application entrelace les exigences sur le matériau et celles sur le design (terme pris au sens le plus large), avec de permanents aller-retour : tantôt c'est l'amélioration du matériau qui permet une avancée sur le design, et tantôt c'est l'idée d'un nouveau design qui exige la mise au point d'un nouveau matériau. Parmi les ouvrages d'art, les ponts constituent sans doute l'illustration la plus spectaculaire de cette fructueuse coopération entre concepteurs et autres mécaniciens d'une part, technologues et autres physico-chimistes des matériaux d'autre part.

Matériaux inorganiques, matériaux organiques, volumes et surfaces

Ces quelques pages seraient insuffisantes pour seulement faire la liste de tous les matériaux qui interviennent ici. On pense bien sûr à la pierre, au ciment et au béton, mais les briques et les tuiles ne devraient pas être oubliées parmi les matériaux inorganiques non plus que, par exemple, les carrelages de nos sols ou les vitrages de nos fenêtres ; inorganiques toujours : les métaux, en rappelant que le bâtiment et le génie civil constituent, en tonnage, le premier marché de la sidérurgie. Il faut poursuivre par les matériaux organiques, le bois d'abord, puis les bitumes, les peintures et les innombrables revêtements – qui justifient que l'on considère des emplois « de surface » à côté des emplois « en volume » (les piles d'un pont). Et il est admirable de constater que chaque matériau est choisi pour un usage spécifique,

plus souvent en complémentarité qu'en concurrence d'un autre matériau, et avec des synergies bénéfiques dont le béton armé donne un exemple, où le métal, ductile et résistant à la traction, renforce le béton, qui privilégie lui les sollicitations de compression, avec le pH très basique du ciment qui assure la passivation de l'acier et le protège de la corrosion...

Les nouveaux bétons : l'organique à l'aide de l'inorganique

Parmi les quelques exemples que nous avons la place de citer, nous ne pouvons omettre les nouveaux bétons. Tous les maçons du dimanche qui ont gâché à l'intérieur d'une brouette deux sacs de sable avec un sac de ciment et un peu moins d'un seau d'eau savent que les performances du matériau consolidé (une fois le ciment « pris », puis « durci ») dépendent de la granularité du sable et aussi de la quantité d'eau de gâchage : l'excès d'eau facilite la mise en place, mais au détriment de la résistance mécanique. Le béton est à l'image d'un chocolat aux noisettes qui aurait des trous (comme le gruyère !) : sable et granulats sont les noisettes, le ciment consolidé est le chocolat, et les trous – dont les tailles peuvent aller du millimètre au nanomètre – dépendent des interstices dans l'empilement granulaire de départ et aussi de la porosité laissée par la fraction excédentaire d'eau, non consommée par réaction avec le ciment anhydre pour former le ciment hydraté – consolidé.

Accroître la résistance mécanique du béton conduit à : i) optimiser l'empilement (pour loger des particules moyennes dans les interstices entre les plus grosses, puis des fines entre les moyennes, et des ultra-fines entre les fines) ; ii) améliorer la qualité des phases cimentaires et enfin, iii) résorber la porosité, donc mettre un minimum d'eau (mais avec le risque d'une rhéologie médiocre du produit pâteux, d'où création de défauts macroscopiques rédhibitoires lors de la mise en œuvre). Or, de même façon que quelques gouttes de lessive modifient complètement les propriétés de mouillabilité de l'eau – et permettent un lavage efficace –,

il suffit (mais aussi il faut !) ajouter aux compositions cimentaires une faible quantité de « super-plastifiants » et autres ingrédients dont les propriétés de mouillabilité et de défloculation transforment le mélange de grumeaux en un moelleux yaourt... En sus de l'optimisation de la granularité, ce n'est que grâce à ces adjuvants (essentiellement de nature organique) que les bétons (très majoritairement minéraux) ont pu voir leur résistance mécanique en compression progresser sur plus d'un ordre de grandeur, passant d'une trentaine de mégapascals pour un béton ordinaire à mieux que 300 MPa pour les bétons à ultra-hautes performances (BUHP) – des matériaux qui offrent, de surcroît, les bénéfices d'une ténacité améliorée et d'une ductilité acceptable.

Les « bétons auto-plaçants » (BAP) sont une autre avancée qui conjugue un empilement granulaire optimal et des adjuvants qui bouleversent les caractéristiques rhéologiques. Pour faire simple, disons qu'il peut s'agir, par exemple quand on souhaite une surface plane (comme doit l'être le sol d'un bâtiment), de faire confiance à la gravité pour assurer la planéité d'un liquide (telle la surface d'une piscine calme). Mais, si la pâte de béton doit être assez liquide pour permettre cette mise en place, elle ne doit pas l'être trop, sauf à favoriser une sédimentation des particules les plus grosses ou à fuir par les joints des coffrages... Les travaux théoriques et les études expérimentales actuellement consacrées aux BAP montrent là-aussi les bénéfices apportés par les plastifiants et les surfactants polymères, organiques. Mais attention : cette sophistication des matériaux impose ses contraintes quant à la rigueur de leur mise en œuvre. La composition des constituants et leur dosage, les conditions de mélange et de malaxage, les paramètres de la mise en place et de la « cure » qui fait suite... doivent maintenant être pesés au trébuchet de la haute technologie – une mutation qui peut conduire à une nouvelle structure des entreprises et à de nouveaux partages des responsabilités.

Quand on ne voit que le minoritaire : les enrobés bitumineux

Sous-produit de valeur de l'industrie pétrolière, mélange d'hydrocarbures lourds, le bitume est présent dans 95 % des revêtements routiers français, à qui il donne leur couleur noire. L'emploi de ce matériau dans les couches de chaussées vient de ses deux qualités premières : son état solide à la température ordinaire et son adhérence qui permet de lier entre eux les granulats. McAdam, à qui on attribue une invention qu'il n'a pas faite, avait trouvé qu'il fallait concasser certains cailloux (nous dirions réaliser une courbe granulométrique assez régulière) pour obtenir une chaussée en pierre assez compacte. Ce n'est que plus tard qu'a été constaté tout l'intérêt de lier les granulats entre eux. Un enrobé bitumineux est ainsi un mélange de granulats et de quelques pour cent de liant à base de bitumes. Le liant est en effet constitué de bitume et d'additifs organiques lui donnant des propriétés particulières. C'est un savant mélange, secret gardé des entreprises, qui peut permettre de se prémunir contre les deux risques majeurs produits par le trafic : la ruine par fatigue et fissuration d'une part, et l'excès de déformation localisée produisant des ornières d'autre part. Bien que les enrobés bitumineux soient encore peu présents dans les laboratoires « universitaires », des recherches sont toujours menées pour donner une base scientifique plus solide aux choix de formulations permettant de combattre les deux risques mentionnés.

La rugosité et l'imperméabilité de la couche supérieure d'une chaussée n'empêchent pas l'eau d'y stagner par temps de pluie, avec les dangers qu'elle fait courir aux véhicules ; d'où l'invention récente des enrobés drainants qui laissent la route sèche. Leur plus grande porosité est obtenue en augmentant la teneur en bitume et surtout en introduisant une discontinuité dans la granulométrie par réduction de la « classe » 2 mm à 4 mm. La teneur en vides est ainsi plus que doublée. Si elle permet l'assèchement rapide de la chaussée, cette porosité a une autre propriété intéressante, celle de réduire notablement le bruit de contact pneu-chaussée. Mais qui dit nouveau matériau dit souvent nouvelles questions. Du fait des impuretés diverses présentes sur la chaussée, telles que résidus de pneumatiques, les pores des enrobés drainants se colmatent. Le décolmatage relève de technologies physiques et chimiques et on ne dispose pas encore de procédé permettant de retrouver totalement la perméabilité initiale. Par ailleurs, on a établi que leur porosité provoque un comportement particulier des enrobés drainants vis-à-vis du gel et des produits de déverglaçage ; un traitement hivernal adapté doit leur être appliqué.

Plus performants, plus reproductibles et plus durables

Plus performants : bien que les matériaux qui nous intéressent ici interviennent d'abord par leurs propriétés « de structure » (performances mécaniques au premier plan), les propriétés « de fonction » prennent actuellement une importance accrue. Comme on l'a dit pour les chaussées, ce sont alors souvent les propriétés des surfaces qui priment car ces surfaces sont en contact avec l'environnement : cela va des traitements de protection – par exemple pour protéger de l'humidité ou pour améliorer l'esthétique – aux couches minces déposées sur les vitrages pour contrôler la transmission infrarouge (éviter de « chauffer l'extérieur » en hiver et se protéger du soleil en été).

Plus reproductibles : l'accent est mis sur la « robustesse » des matériaux, ce qualificatif signifiant, dans son acception anglaise, que les propriétés d'emploi ne doivent dépendre qu'au second ordre de celles des fluctuations de composition ou de processus que l'on ne peut pas éviter : par exemple, la résistance à 28 jours d'un ciment hydraté d'un type donné doit respecter la valeur minimale imposée par la norme qui encadre sa catégorie, quand bien même sa minéralogie pourrait avoir été quelque peu affectée par des variations de matières premières ou de nature des combustibles du four à clinker.

Plus durables, enfin : une exigence majeure en bâtiment et, plus encore, en génie civil, est le maintien de l'intégrité des matériaux sur des durées très supérieures à ce qui est demandé pour la plupart des autres secteurs industriels. Il ne s'agit pas ici des brèves années des produits de l'électronique, mais de décennies, de siècles, voire de durées « géologiques » quant on considère le confinement des déchets nucléaires. Chimie et thermodynamique deviennent alors les outils indispensables pour prévoir le sens et l'extension des évolutions inéluctables et permettre au mécanicien de disposer des références qui nourrissent ses calculs : comprendre les causes de dégradation des ouvrages pour améliorer leur durabilité est une priorité qui bénéficie maintenant des méthodes de modélisation numérique, appuyées sur les bases de données des spécialistes de science de la terre, géochimistes en particulier.

Un nouveau devoir : le respect de l'environnement

Comme tous les secteurs industriels, le bâtiment et le génie civil sont interpellés par la récente demande sociale de respect de l'environnement. Depuis longtemps déjà les ingénieurs se sont préoccupés de la maîtrise de l'évacuation des eaux de ruissellement des chaussées. La profession routière a anticipé sur les exigences de recyclabilité des matériaux. Non seulement elle a mis au point les procédés de recyclage en place des enrobés bitumineux par chauffage et reconstitution d'un mélange, mais elle sait aussi réutiliser les granulats issus du concassage de bétons de démolition. Reste à améliorer le recyclage des bétons de bâtiment en trouvant le moyen de le séparer d'autres matériaux – en particulier du plâtre.

C'est la qualité de réservoir de gaz carbonique des forêts qui favorise un nouveau développement de la construction en bois en France. Mais ce développement ne pourrait se faire sans les connaissances récemment acquises sur le comportement du bois et des composants à base de bois – comme les poutres en lamellé-collé –, sur celui des structures et assemblages, mais aussi sans des méthodes de traitement permettant une durabilité satisfaisante du bois dans les conditions extérieures de cycles d'humidité et de température. Les premiers ennemis du bois sont biologiques (champignons et termites), les autres sont physiques et chimiques, tels que les cycles précédents et les polluants de l'atmosphère. Des recherches actuelles portent sur le traitement du bois à base de produits biologiques, pour éviter tout risque de nuisance ultérieure lors de la destruction de la construction.

Des matériaux de génie civil contribuent aussi à la protection de l'environnement. Par exemple, les géomembranes (tissus polymères éventuellement bitumineux) assurent l'étanchéité des décharges d'ordures ménagères. Et des formulations de bétons particulières sont recherchées pour confiner des déchets spécifiques, chimiques ou « nucléaires ».

Et demain...

Les matériaux composites à matrice polymère, bien développés dans la construction navale et en aéronautique, faisant quelques apparitions dans l'industrie automobile,

trouvent déjà des applications comme matériaux de structure dans des techniques de réparation ou renforcement de constructions, et pour la réalisation de quelques ponts (à l'étranger). Auront-ils un réel développement ? Car les matériaux *traditionnels* du génie civil n'ont ce qualificatif que dans la bouche du non initié : on a vu que les bétons actuels sont bien différents de ceux d'il y a cinquante ans, et que surtout l'ensemble des connaissances scientifiques et empiriques acquises est synthétisé désormais dans une véritable ingénierie du matériau béton, permettant d'adapter la formulation, donc le matériau, à l'usage de la structure à laquelle il est destiné. La situation des matériaux de chaussées n'est pas très différente. Quant à l'acier, dont nous avons peu parlé, il évolue constamment pour aussi mieux s'adapter à son usage. La construction d'ouvrages d'art a déjà utilisé des aciers « thermomécaniques » dont la principale qualité est la facilité de mise en œuvre du soudage dans les conditions du chantier.

Demain, plus encore qu'aujourd'hui, confirmera cette évidence : les matériaux de grande diffusion sont des matériaux hautement sophistiqués...



P. Boch

Philippe Boch

est professeur à l'université Pierre et Marie Curie et à l'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles*.



B. Halphen

Bernard Halphen

dirige le Laboratoire de mécanique des solides à l'École polytechnique**.

* ESPCI, Laboratoire céramiques et matériaux minéraux, UMR 7574, 10 rue Vauquelin, 75005 Paris.

Tél. : 01 40 79 44 42. Fax : 01 40 79 47 50.

E-mail : philippe.boch@espci.fr

** École polytechnique, Laboratoire de mécanique des solides, UMR 7649, 91128 Palaiseau Cedex. Tél. : 01 69 33 41 30. Fax : 01 69 33 43 25.

halphen@lms.polytechnique.fr