

D'Auguste, empereur de Rome, aux nanotechnologies

ou la singulière histoire des progrès du béton

Professeur Yves Malier,
Académie des technologies, ancien directeur de l'ENS de Cachan

Avec près de 7 milliards de mètres cubes produits annuellement, le béton est le matériau le plus utilisé dans le monde...
Il est sans doute aussi le matériau dont l'histoire est la plus singulière.

MÉLANGE DE GRANULATS, de sables, de liants hydrauliques et d'eau, il fut inventé par les Romains, il y a plus de deux mille ans. Dans ce mélange, les Romains employaient comme liant hydraulique la chaux vive obtenue par cuisson de calcaire. Ils avaient constaté que le mélange de chaux vive et de sables d'origine volcanique (Santorin, Pouzzoles) donnait un produit capable de faire "prise" dans l'eau pour devenir très résistant.

Bien que la main-d'œuvre soit, en ces périodes, "abondante", les constructeurs romains avaient compris tout l'intérêt, pour obtenir des formes audacieuses et légères, de substituer parfois à l'habituelle et pénible taille de pierre le coulage dans un moule d'un mélange fluide qui ensuite, au repos, grâce aux réactions d'hydratation du liant hydraulique, prenait fermeté, cohésion, résistance et durabilité.

De remarquables architectes contemporains de Marcus Vitruvius (dit Vitruve) surent tirer le meilleur parti de ce matériau. Ainsi, dallages supports durables de mosaïques, fon-

dations en zones humides ou immergées et très grandes coques légères furent les premières applications. L'un des plus frappants témoignages de cette construction en béton est sans doute le Panthéon de Rome construit sous le règne d'Auguste, remarquablement conseillé par Agrippa, son "ministre des grands travaux", puis sous le règne d'Hadrien avec une coupole de 44 mètres réalisée en "béton léger" dans lequel les granulats étaient briques concassées, tuf et pierre ponce. Cette coupole résista parfaitement aux modifications multiples apportées peu après sa construction; aux sévères incendies dont fut victime le bâtiment et, chacun peut le constater, aux érosions naturelles du temps. Ainsi fut très tôt démontrée la durabilité du premier matériau composite de l'histoire des techniques industrielles.

Après Vitruve, un long sommeil...

Durant les bouleversements du Haut Moyen Âge et dès le III^e siècle, la technologie du béton se perdit com-



DR

plètement... Il est vrai aussi que, guerre après guerre, les métiers des armes avaient fait progresser la connaissance des matériaux métalliques et l'application de cette connaissance à la fabrication de nouveaux outils. Ainsi, l'intuition de l'écroûissage par martelage et la maîtrise de l'affûtage par abrasion furent, à mon avis, décisives car ces techniques permirent de nouvelles générations de scies. L'abondance de la forêt fit le reste. Sans jamais s'approcher du haut niveau technologique que les Chinois maîtrisaient déjà depuis plus d'un millénaire en ce domaine, la construction en bois se généralisa dans toute l'Europe jusqu'à l'époque de Charlemagne. Soucieuse de plus de pérennité, la deuxième moitié du Moyen Âge remit à l'honneur la taille et l'empilement des pierres en travaillant, comme dans

toutes les périodes suivantes jusqu'à la fin du XVIII^e siècle, bien plus sur les technologies de débitage de pierres, de liaisons entre blocs, de couplages pierre-bois, de lancements de cintres... que sur les technologies de substitution que, avec le béton, les Romains avaient mises à l'honneur. Aussi, dans toutes ces périodes successives, les ouvrages (châteaux forts, cathédrales, ouvrages maritimes, ponts, palais) furent en pierre. Les réactions d'hydratation de la chaux ne furent utilisées que dans le seul objectif de réaliser des étanchéités, des joints ou des revêtements minces et décoratifs de façades.

Plus surprenant encore, les redécouvertes de livres anciens, tels les extraordinaires *X livres d'architecture* de Vitruve¹, pourtant traduits en 1673 par l'architecte du roi Claude Perrault, n'eurent, des seuls points de vue du matériau béton, aucun effet sur l'architecture de toutes ces périodes de grandes constructions.

Soudain Vicat sonne le réveil !

Le premier virage fut en fait pris en 1756 par John Smeaton, qui découvrit que les chaux les plus hydrauliques, donc celles effectuant les meilleures "prises", sont obtenues à partir d'un mélange de calcaire et d'argile et non, comme on le croyait depuis toujours, de calcaire pur. Il fallut pourtant encore attendre près de quatre-vingts ans et toute la curiosité scientifique et la culture technologique de Louis Vicat. Ingénieur des Ponts et Chaussées en poste en Dordogne, las d'attendre ses crédits de travaux neufs, il étudiait les mortiers (mélanges de sables et de liant) en vue de la fondation en rivière de piles de ponts quand, de 1812 à 1818, il élaborait les premiers éléments de la théorie de l'hydraulicité. Dans cette théorie, il caractérisa le "pouvoir hydraulique" du liant artificiel obtenu par cuisson et son évolution en fonction des teneurs respectives en calcaire et en argile. L. Vicat² posa ainsi les bases scientifiques des ciments artificiels et traça les premières adaptations de leurs

propriétés en fonction du dosage de chacun des constituants. Quelque temps après, John Aspdin, en 1824, à Leeds, proposa une formule de ciment artificiel appelé Portland (pour sa ressemblance avec la roche grise extraite de la presqu'île de Portland). Les premières voies de recherches consacrées aux liants hydrauliques étaient ouvertes.

Il fallut alors moins de trois dizaines d'années pour que la mise au point industrielle soit rendue fiable par, notamment, Demarle, Léopold et Augustin Pavin de Lafarge, Piquety, L. Vicat..., et que les premiers ouvrages soient réalisés.

Par ailleurs, le principe de poutres composites comprenant des armatures métalliques pour équilibrer les efforts de traction avait déjà été utilisé par Jean-Baptiste Rondelet au XVIII^e siècle lors de la construction en pierres du Panthéon à Paris. Ce principe fut singulièrement repris et appliqué au béton par le modeste chantier naval de Joseph Lambot en 1848 pour réaliser une barque en béton armé, puis par le jardinier paysagiste Joseph Monier en 1849... pour des caisses à fleurs et à arbres avant que François Coignet en 1852 réalise les premières applications en bâtiment à Saint-Denis.

Après tant de siècles de rupture, la jonction avec Rome était enfin refaite !

À côté de François Coignet en France, en Allemagne et en Autriche, A. Wayss exploita les brevets de J. Monier et W. E. Ward en Angleterre et, surtout, en Amérique du Nord rechercha d'autres applications du béton armé notamment en privilégiant la protection contre l'incendie des nombreuses et grandes structures métalliques très en vogue à cette époque.

Après ces quelques années de conceptions empiriques, François Hennebique ouvrit la voie du calcul et de la conception modernes. De 1880 à 1900, les ouvrages en béton se multiplièrent. Charles Rabut³ créa,

en 1898, à l'école nationale des Ponts et Chaussées, le premier cours de béton armé. Si le lecteur m'autorise une note personnelle, je dirais que je suis très sensible à cette date puisque c'est exactement cent ans plus tard que j'arriverai au terme légal de mes quinze ans de titulaire de cette même chaire à l'école des Ponts et Chaussées. Rappelons aussi que l'administration française publia, le 20 octobre 1906, le premier règlement de calcul existant au monde.

Une autre singularité de l'histoire du béton tient aux types d'innovations que connut la construction en béton de 1875 à 1975-1980.

Si l'on excepte quelques cas particuliers, il est frappant de constater que durant ce siècle de très fort développement marqué par des réalisations exceptionnelles, le béton est longtemps resté, pour l'ingénieur concepteur-constructeur, une "boîte noire" aux propriétés assez figées, "boîte noire" caractérisée par ses seules propriétés mécaniques macroscopiques (résistance à la rupture, module d'élasticité, coefficient de fluage...). Ainsi, au plan de la recherche et de l'innovation, les efforts ont alors porté sur les économies d'énergie et de matières premières associées à la production des matériaux de base (ciments, granulats), sur les choix de formes de structures, sur l'amélioration des technologies de mise en œuvre, sur les associations macroscopiques acier-béton dans les grandes structures, sur le développement de la construction par composants et sur les *process* visant à donner une redistribution intelligente des sollicitations dans la matière (l'invention de la précontrainte par Eugène Freyssinet, en 1928, en est le meilleur exemple).

1. VITRUVÉ, *Les dix livres d'architecture*, I^{er} siècle av. J.-C. (traduction par C. PERRAULT, 1673), Paris, Balland, 1979, 350 p.

2. VICAT L., *Recherches expérimentales sur les chaux de construction, les bétons et les mortiers ordinaires*, 1818, Paris, Goujon, XII-103-XXV p.

3. RABUT C., *Cours de construction en béton armé - Notes prises par les élèves*, 1899, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Un saut technologique : du béton... aux bétons

Après de longues décennies laissant les propriétés du béton sensiblement à leur état d'origine, les années 1980 virent quelques ingénieurs et quelques chercheurs avides de pluridisciplinarité s'associer pour "ouvrir la boîte noire" afin de donner de nouvelles propriétés constructives à ce matériau désormais devenu universel. Ainsi naquit une nouvelle génération de bétons, bétons pour la première fois appelés par Roger Lacroix et moi-même, en 1981 et 1982, lors des Assises nationales de la Recherche, "bétons à hautes performances" ⁴ (BHP) et parfois nommés durant cette décennie par les responsables de l'American Concrete Institute, "the French Approach" ⁵. Dans ces années 80, les premières voies de recherche explorées en termes de propriétés constructives furent la maniabilité et la pompabilité du béton frais, la résistance au très jeune âge, la réduction de la porosité et la résistance finale du béton durci. Conçus par des ingénieurs innovants, dont Pierre Richard de l'entreprise Bouygues fut au plan mondial le pionnier, de nombreux ouvrages permirent de valoriser ces propriétés en termes de délais d'exécution, de facilité de mise en œuvre, d'allègement de formes, d'étanchéité aux gaz ou encore de gains sur le coût des fondations. Le pont de l'île de Ré, le viaduc de Sylans, l'Arche de la Défense, les 650 000 voussoirs du tunnel sous la Manche, l'arc de la Rance, la centrale nucléaire de Civaux et de très nombreux éléments préfabriqués en usine marquèrent en France plus qu'ailleurs les diversités d'emploi de ces nouveaux bétons. Au plan scientifique, l'obtention de ces BHP provenait aussi de l'adaptation aux problématiques de la construction de résultats de recherches développées, en fait, pour d'autres secteurs industriels à plus forte valeur ajoutée (telles les industries pharmaceutiques et agroalimentaires avec les mécanismes de défloculation de grains). L'obtention de ces BHP s'appuyait aussi sur les transferts de résultats de recherches relatives à l'optimisation des empilements

granulaires. Les travaux de Pierre-Gilles de Gennes et surtout d'Étienne Guyon ⁶ ont fortement contribué à nous aider à concevoir, en les appliquant à notre matériau, l'intérêt considérable de "bétons à quatre échelles de grains" (cailloux, sables, ciments et ultrafines). La concrétisation, notamment par François de Larrard ⁷ dans mon équipe du LCPC, de l'idée de cette quatrième échelle de grains par des ultrafines (0,1 micron), concrétisation indispensable au renforcement de la compacité du mélange granulaire, allait, par ricochet, révolutionner l'industrie de l'adjuvantation jusqu'à alors modestement développée. En effet, à ces dimensions microscopiques, les phénomènes de floculation doivent impérativement être maîtrisés par des plastifiants défloculants performants mais dont l'action chimique ne doit en rien perturber la qualité des réactions d'hydratation du ciment. Il y avait là un défi majeur pour l'industrie cimentière et l'industrie chimique qui ont accompli, ensemble, de gros efforts de recherche pour trouver de nouvelles générations de molécules à emplois aisés, à fiabilité de résultats sur la mise en œuvre robustes et donc à moindre sensibilité aux aléas de chantier.

Dans le même temps, des études multiéchelles ont abouti à des modélisations prédictives des effets couplés chimiques-mécaniques-thermiques (Paul Acker ⁸, Pierre-Claude Aïtcin ⁹) durant les phases de changement d'état du béton et durant les phases de durcissement et de vieillissement. De même, d'autres études multiéchelles ont montré tout l'intérêt de développer de nouvelles familles de fibres et de microfibrilles dont l'emploi modifie désormais radicalement les propriétés constructives du composite (Pierre Rossi ¹⁰).

Des avancées sociales et environnementales induites

L'intérêt de ces nouveaux bétons, qu'ils s'appellent BHP, BUHP (bétons à ultra-hautes performances), BAP (bétons autoplaçants) ou autres..., est

certes d'abord d'ordre mécanique tant il est vrai que l'on peut désormais considérablement varier la rhéologie et les capacités d'écoulement du béton à l'état frais d'une part, la résistance, l'élasticité, le fluage, la porosité ou encore la rugosité de surface du béton durci, d'autre part. Mais je tiens à affirmer qu'il est et qu'il sera surtout d'ordre social et environnemental. En effet, ces bétons modifient profondément les conditions de travail sur le chantier ou à l'usine de préfabrication : pompages systématiques, disparition de la si bruyante et si pénible vibration, acquisition rapide de la résistance, rhéologie adaptable à la nature et aux dimensions de l'ouvrage, etc., signifiant en fait réduction considérable de la pénibilité et donc de l'accidentabilité, réduction des matériels de chantiers, forte réduction des nuisances pour le voisinage, réduction des délais de fabrication et donc des durées de chantiers.

Le concepteur doit désormais s'appropriier tous ces potentiels d'amélioration. Il va aussi, sous réserve de cette appropriation en vue d'une approche systémique de son projet, concevoir un ouvrage plus économique.

Dès aujourd'hui, grâce à la très grande qualité de nos entreprises et de nos industriels du matériau, de nombreuses réalisations récentes effec-

4. MALIER Y., *Les bétons à hautes performances – Du matériau à l'ouvrage*, 1990, Paris, Presses de l'ENPC, 2^e éd., 550 p. (in English, Spon-Chapman and Hall – New York 1992).

5. MALIER Y., *The French Approach to using HPC*, July 1991, Concrete International, American Concrete Institute – Vol 13, n° 7, p. 28-33, New York (titre de G. LEIGH, président délégué de l'ACI).

6. GUYON É., HULIN J.-P., *Granites et fumées, un peu d'ordre dans les mélanges*, 1997, Préface de P.-G. DE GENNES, Odile Jacob Sciences, 283 p.

7. de LARRARD F., *Formulations et propriétés des bétons à hautes performances*, 1988, Paris, Rapport de recherche du LCPC, 335 p.

8. ACKER P., *Comportement mécanique du béton – Apport de l'approche physico-chimique*, 1988, Paris, Rapport de recherche du LCPC.

9. AÏTCIN P.-C., *Les bétons haute performance*, 2001, Paris, Eyrolles, 680 p.

10. ROSSI P., *Les bétons de fibres métalliques*, 1998, Paris, Presses des Ponts et Chaussées, 312 p.

tuées en France, un des pays pilotes dans ce domaine, montrent que ces bétons sont potentiellement livrables en tous points du territoire et sont adaptés, à condition qu'il y ait une réflexion initiale, à tous les types et toutes les dimensions de chantiers, des plus importants aux plus modestes... Ces réalisations, au bilan toujours positif, sont aussi l'occasion d'attiser les regrets que l'on a d'observer encore trop souvent, sur beaucoup d'autres projets, la frilosité de certains prescripteurs dont les formations initiale et continue semblent vraiment parfois, quel que soit leur âge, avoir été reçues bien avant le saut technologique des années 80! Je regrette que ces carences de formation desservent gravement les intérêts bien compris du maître d'ouvrage en matière de qualité, d'économie et de coûts de maintenance future. Elles desservent aussi les intérêts de notre société en matière d'amélioration des conditions de travail, de respect de l'environnement et de développement durable. Elles entravent enfin la valorisation des grandes capacités d'innovation de nos entreprises et de nos industriels.

Archimède et Démocrite complices du futur

Par ailleurs, aujourd'hui, nous sommes quelques-uns à dire que s'amorce déjà un autre saut technologique, celui qui va résulter de nouvelles approches de notre composite à l'échelle nanométrique.

À cette échelle, des travaux exploratoires majeurs laissent espérer, dans un délai raisonnable, une très grande maîtrise des phénomènes qui conditionnent à la fois les qualités de l'hydratation et la maîtrise de la rhéologie dans tous les régimes transitoires par lesquels passent la mise en œuvre, la prise, le durcissement et le vieillissement du béton. Nous ne citerons qu'un exemple. Les travaux très récents de Paul Jouanna¹¹ proposent une approche totalement nouvelle dite phéno-corpusculaire de notre "vieux" matériau en affrontant le fossé spatiotemporel macro-nano par imbrication

de l'expérimentation phéno-ménologique qui a été à la base du point de vue d'Archimède et de la modélisation corpusculaire qui, après son extraordinaire intuition de l'atome, était sans doute le rêve de Démocrite.

Cette approche est particulièrement riche d'espérances tant en matière de conception de nouveaux adjuvants et de formulations de bétons encore plus optimisées, ou que de procédures fiables de contrôle continu de la qualité du matériau au cours de son élaboration.

Bref, les développements scientifiques actuels sur ce matériau que tant croyaient si teinté d'archaïsme il y a quelques décennies sont en train de bouleverser et bouleverseront plus encore les résultats économiques, esthétiques, sociaux et environnementaux de l'acte de construire.

L'énorme marché mondial des seules constructions courantes consomme annuellement plus de 85 % du béton produit. Sur ce marché, l'appropriation par les constructeurs des possibilités qu'offrent toutes les nouvelles performances de ces bétons actuels et futurs commence à se traduire et va se traduire plus encore dès la prochaine décennie par la réalisation de constructions très porteuses de développement durable. Il ne fait pour moi aucun doute que les potentiels d'adaptation dans le temps du "bâti" aux évolutions des besoins de l'homme et de la société vont s'en trouver très considérablement renforcés.

S'agissant des constructions plus exceptionnelles, après Normandie, Millau, l'opéra de Pékin et bien d'autres remarquables ouvrages, Michel Virlogeux, Bernard Tardieu, Paul Andreu, Rudy Ricciotti et tous les concepteurs, ingénieurs ou architectes les plus innovants, en continuant d'orchestrer l'utilisation de ces nouveaux matériaux, ne manqueront pas d'occasions de nous faire encore rêver à d'autres grands projets que les entreprises et les industriels français sauront parfaitement réaliser à travers le monde.

J'espère avoir un peu contribué à montrer au lecteur que, depuis Rome, l'évolution de notre matériau n'a toujours été caractérisée que par des périodes "dormantes" entrecoupées de sauts technologiques. Depuis l'époque romaine, ces sauts technologiques ont tous été marqués, au plan scientifique, par la transversalité et la pluridisciplinarité, au plan technologique, par la prise de conscience d'un point de blocage au développement de la société et, au plan humain, par la rencontre d'un savant et d'un ingénieur... sauf quand parfois, n'est-ce pas Louis Vicat, le même homme était les deux.

Ainsi, il ne fait pour moi aucun doute que l'avenir de la recherche relative au béton ne pourra se faire que dans des "ateliers" pluridisciplinaires propices au dialogue entre physiciens, chimistes, mécaniciens, géologues, mathématiciens et biologistes.

Cette condition nécessaire étant assurée, elle ne deviendra condition suffisante de grande réussite que si ces "ateliers" sont aussi le lieu privilégié d'écoute des meilleurs architectes, des meilleurs urbanistes, des meilleurs ingénieurs de conception, des meilleurs ingénieurs de production et des meilleurs spécialistes d'environnement.

Enfin, nous ne devons pas oublier que, lors des sauts technologiques antérieurs, certaines des étincelles, qui ont déclenché le progrès des *process* relatifs à notre matériau, ont été apportées, comme on l'a vu, au XIX^e siècle par un constructeur de bateaux et par un fleuriste paysagiste puis, plus près de nous, pour la défloculation, par un pharmacien et par un chimiste minotier. Ces "ateliers" gagneront donc toujours à être aussi le lieu d'accueil régulier des meilleurs innovateurs des autres secteurs industriels, fussent-ils très éloignés du secteur de la construction. ■

11. JOUANNA P., *Approche phéno-corpusculaire de phases et nanophases. Voies ouvertes en sciences des géomatériaux*, 2005, Mémoire de recherche, Université de Montpellier-II, 240 p.