

Nanotechnologies et nanomatériaux, vers un béton intelligent

GHERIS Abderrahim

Maitre de conférences, département de génie civil, faculté des sciences et de technologie,
Université de Souk Ahras, Souk Ahras 41000, Algérie
agheris@hotmail.fr

Résumé

Le monde de la construction a la réputation d'être traditionnel. L'objet de cette article, est de montrer qu'au-delà de ce cliché, c'est au contraire un monde qui, poussé par notre urbanisation croissante et l'impérieuse nécessité d'un impact minimal sur nos ressources et notre environnement, sera le lieu d'innovations que l'on peut à juste titre qualifier de nano technologiques. Ceci touchera autant l'habitat individuel que le tertiaire, le milieu urbain et nos grandes infrastructures, que celles-ci soient énergétiques, environnementales ou de mobilité. Ce travail aborde plus spécifiquement l'impact des nanotechnologies sur le matériau roi du génie civil – le béton – et sur nos grandes infrastructures – ouvrages d'art et réseau routier. On montrera que les nanosciences offrent de belles marges de progrès aux bétons grâce à l'usage de nouveaux matériaux et dispositifs dont beaucoup relèveront des nanotechnologies et des nanomatériaux (« NT & NM »), la route elle même sera dotée de fonctionnalités nouvelles qui la rendront adaptable, résiliente et automatisée ; enfin, que l'incorporation de capteurs massivement distribués et communicants étendra l'internet des objets à l'ensemble de nos infrastructures et permettra d'en augmenter la durabilité, la sécurité et, globalement, l'efficacité.

Mots clé : bâtiment, béton, nanotechnologie, nanomatériaux, matériaux intelligents,

1.Introduction

Bien que les mots dépassent de loin la réalité, le concept de matériaux « intelligents » (smart materials) n'en traduit pas moins une évolution bien réelle du monde des matériaux artificiels vers des caractéristiques qui sont celles des matériaux du vivant. Grâce à leur innervation, ces derniers sont non seulement sensibles mais ils peuvent également, comme nos muscles, être stimulables. Lorsque leurs fonctions sont altérées, ils émettent généralement un signal d'alerte, douloureux. Enfin, si les dégâts ne sont pas trop graves, ils sont capables de « s'autoréparer ». La science et la technologie des matériaux qui possèdent peu ou prou ces (multi-)fonctionnalités est désormais un domaine bien établi, qui possède au moins deux vecteurs de communication dédiés : le Journal of Intelligent Material Systems and Structures et Smart Materials and Structures. Les matériaux composites et les alliages métalliques ont constitué dès l'origine des domaines privilégiés pour la mise en œuvre des concepts « d'intelligence », les premiers pour leur capacité à être dotés de fonctions d'actionneurs ou de sensibilité [3], les seconds pour leur capacité à posséder une mémoire de forme [4]. Le domaine s'est considérablement diversifié depuis, avec une difficulté croissante à distinguer la notion de matériau sensu stricto de celle de système. À long terme, il y a peu de doutes que ce seront les polymères ou, plus généralement, les matériaux moléculaires (auto-)organisés qui, par leur similitude intrinsèque avec la matière vivante, permettront de pousser le plus loin la notion de matériau « intelligent ». Les matériaux cimentaires sont restés pendant longtemps à l'écart de cette évolution, vraisemblablement à cause de la domination de leur usage comme matériaux de structure, au détriment de tout aspect fonctionnel. On peut bien noter l'introduction de fonctionnalités comme par exemple la conduction électrique pour le chauffage, par inclusion de conducteurs fibreux ou autres, ou encore la translucidité, par

introduction de fibres ou de lamelles transparentes orientées [5], mais ceci est relativement trivial. On peut aussi noter le caractère autoréparant des BUHP (bétons à ultra-hautes performances), qui est une conséquence naturelle du très faible rapport eau/ciment utilisé lors du gâchage de ces matériaux et, par conséquent, de leur très faible degré d'hydratation, même à long terme [1]. Les grains de ciment sont donc encore en grande partie anhydres dans un BUHP, ce qui leur confère une « réserve d'hydratation » importante. En cas de microfissuration, l'eau peut réagir avec les sections anhydres des parois de la fissure et, grâce à l'expansion du solide qui accompagne l'hydratation, cicatrifier le défaut (rappelons que l'hydratation d'un volume de C_3S produit 2,15 volumes de C-S-H). Bien évidemment, ceci ne fonctionne bien que pour des tailles de défauts du même ordre de grandeur que l'expansion d'un grain. Mais comme pour les deux premiers exemples, ceci ne relève ni des nanotechnologies ni de l'ingénierie moléculaire. Les choses sont cependant en train d'évoluer avec l'introduction de fonctionnalités qui requièrent, soit la manipulation de la matière à l'échelle moléculaire, soit l'introduction de nanomatériaux ou de dispositifs proprement nanotechnologiques. Les trois exemples qui suivent en sont l'illustration.

2. Un béton stimuable

Il est un rêve que tous les constructeurs ont eu un jour ou l'autre : c'est celui d'un béton fluide et homogène – pour une mise en place facile – et qui, par un coup de baguette magique, ferait prise instantanément au moment où on le souhaite. C'est ce que les anglo-saxons appellent la prise « à angle droit » (right-angle set) et, qui plus est, sur commande. De manière plus générale, contrôler à volonté la consistance d'un coulis cimentier ou d'un béton par un stimulus externe simple à appliquer – comme un champ électrique par exemple – serait utile dans de nombreuses circonstances (remplissage des coffrages, cimentation d'un puits, béton projeté, préfabrication...).

Les fluides électrorhéologiques (ER) et les fluides magnétorhéologiques (MR) sont des fluides complexes dont le comportement s'approche de cet objectif, sans pour autant qu'il y ait de prise véritable. Les premiers sont des dispersions de particules polarisables dans un liquide isolant électrique. Sous l'action d'un champ électrique relativement élevé, les particules se polarisent et, par interactions dipolaires, s'agrègent en formant des chaînes parallèles au champ, ce qui bouleverse les propriétés rhéologiques [6]. La viscosité et le seuil d'écoulement perpendiculairement au champ augmentent brutalement. Tout est réversible dès l'arrêt du champ. Dans les fluides MR, qui sont des suspensions de particules magnétisables, des modifications analogues se produisent sous l'action d'un champ magnétique. Dans le monde de la construction, ces fluides « intelligents » ont notamment été utilisés pour construire des amortisseurs sismiques (Museum of Emerging Science & Technology, Tokyo) et des stabilisateurs de câbles de ponts suspendus (lac Dong Ting en Chine).

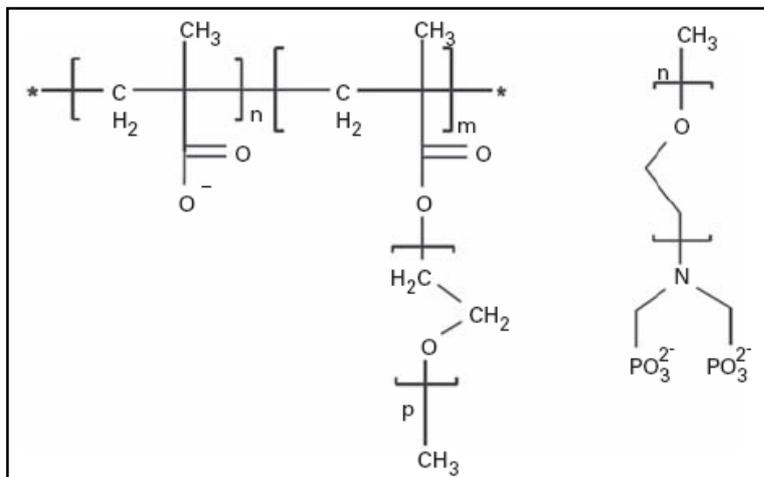
Il est difficilement concevable d'appliquer ces principes pour le contrôle rhéologique des fluides cimentaires, qui sont des milieux aqueux à force ionique élevée et, donc, conducteurs électriques. L'application d'un champ électrique élevé est donc exclue. Le caractère conducteur n'est pas gênant pour l'application d'un champ magnétique, mais c'est l'application même d'un tel champ et l'introduction en grande quantité de particules magnétiques qui pose problème.

Une piste alternative consiste à choisir un autre stimulus – la température – et à mettre à profit les phénomènes d'immiscibilité que présentent de nombreuses solutions aqueuses de polymères, au dessus ou en dessous d'une température critique [8].

C'est notamment le cas des solutions de poly(oxyéthylène) et des solutions de poly(oxypropylène), qui possèdent une « température critique de solubilité inférieure » (LCST, selon la terminologie anglaise consacrée). En dessous de cette température critique (entre 100 et 150°C, selon le poids moléculaire pour le POE ; environ – 55°C pour le POP),

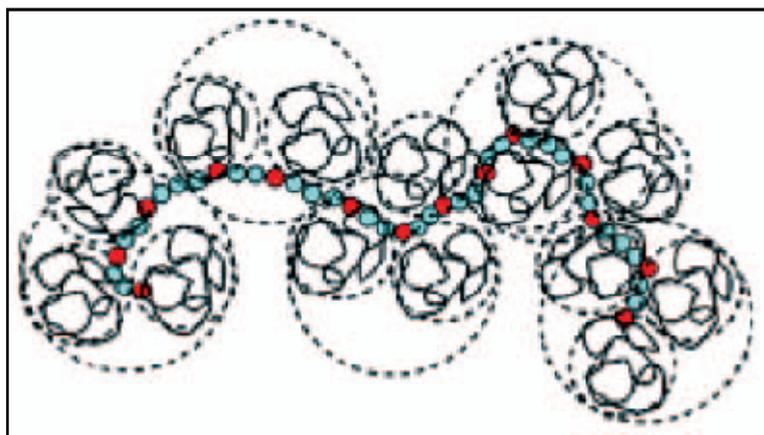
l'eau est un bon solvant pour ces polymères. En revanche, au dessus de la LCST, l'eau devient un solvant médiocre, ce qui conduit à un phénomène de microséparation de phase dans une très large gamme de concentration, avec formation d'associations macromoléculaires et une augmentation considérablement de la viscosité. Les polymères qui se comporte de la sorte sont appelés thermoassociatifs.

L'application récente de ces phénomènes aux fluides cimentiers a consisté à synthétiser un polymère en peigne du même type que les superplastifiants (SP) classiques (voir figure 1), avec une chaîne principale dotée de groupes carboxylate – pour l'accrochage sur les grains de ciment – et des chaînes latérales neutres possédant une LCST. En dessous de la LCST, lorsque les chaînes latérales sont en milieu bon solvant, ce type de molécule est bien un SP classique, agissant principalement par effet stérique. En revanche, à plus haute température, dès que la LCST est franchie, les chaînes latérales tendent à « éviter » les molécules d'eau en s'associant entre elles. Grâce aux associations regroupant des chaînes latérales de macromolécules différentes, sur des grains différents, il se forme vraisemblablement un micro-réseau, ce qui augmente non seulement la viscosité mais introduit également un seuil d'écoulement élevé.



a) schéma de la structure générique de deux familles récentes de superplastifiants

Toutes deux possèdent des groupes anioniques pour assurer la fonction d'accrochage sur la surface des grains de ciment et des chaînes de poly(oxyéthylène) neutres pour assurer la fonction répulsive de grains



b) schéma du modèle FBW ou Flexible Backbone Worm

Ce schéma est utilisé pour décrire la conformation du polymère en solution. Le polymère adopte une conformation en chapelet flexible de « blobs ». Chaque « blob » contient une chaîne latérale et plusieurs unités monomériques de la chaîne principale (d'après [2]).

Figure 1 – Schéma de superplastifiants et du modèle FBW

Pour que cet effet soit utile, encore faut-il qu'il se produise à une température facile à franchir, dans le domaine d'application. Ce travail d'ajustement de la LCST des chaînes latérales est facile à faire par synthèse d'un copolymère de segments OE et de segments OP. On obtient de la sorte une chaîne dont la LCST est située entre celle du POE (100 °C ≤ LCST ≤ 150 °C) et celle du POE (≈ 55 °C), selon le rapport du nombre de segments OE et OP. La figure 2 illustre le comportement rhéologique d'un coulis de ciment dans lequel un polymère

de ce type avec une LCST de ≈ 25 °C a été introduit. En dessous de sa LCST, le polymère se comporte comme un SP « normal », avec une forte action de défloculation, tandis qu'au dessus de la LCST, il devient au contraire un agent viscosifiant et rigidifiant.

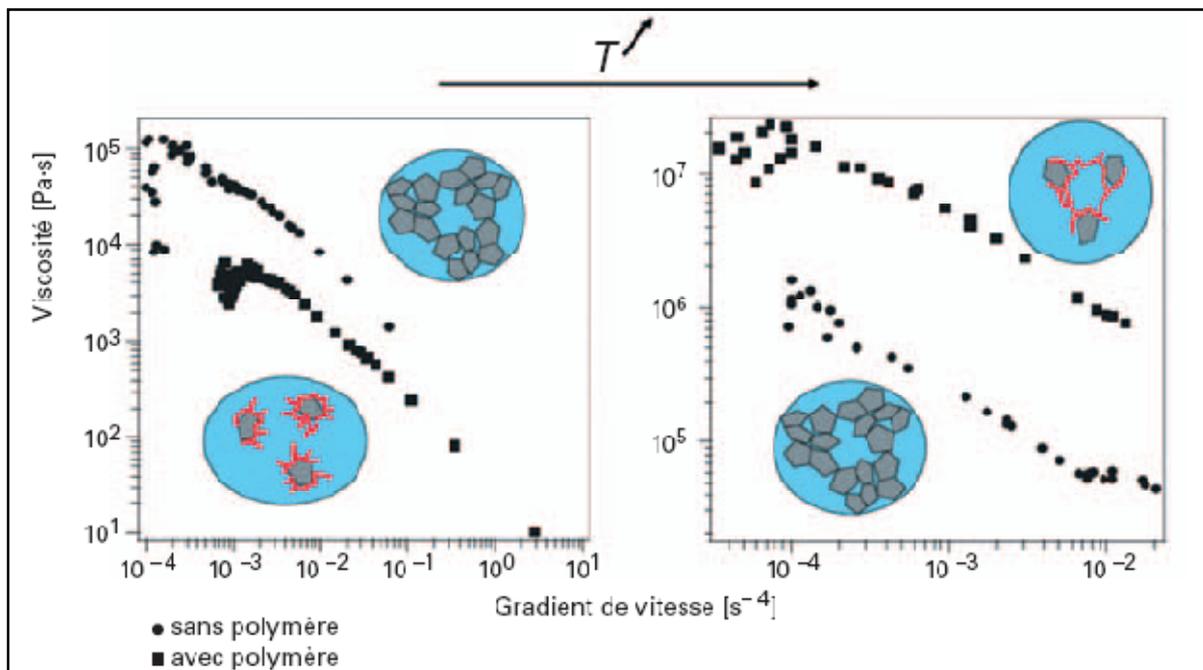


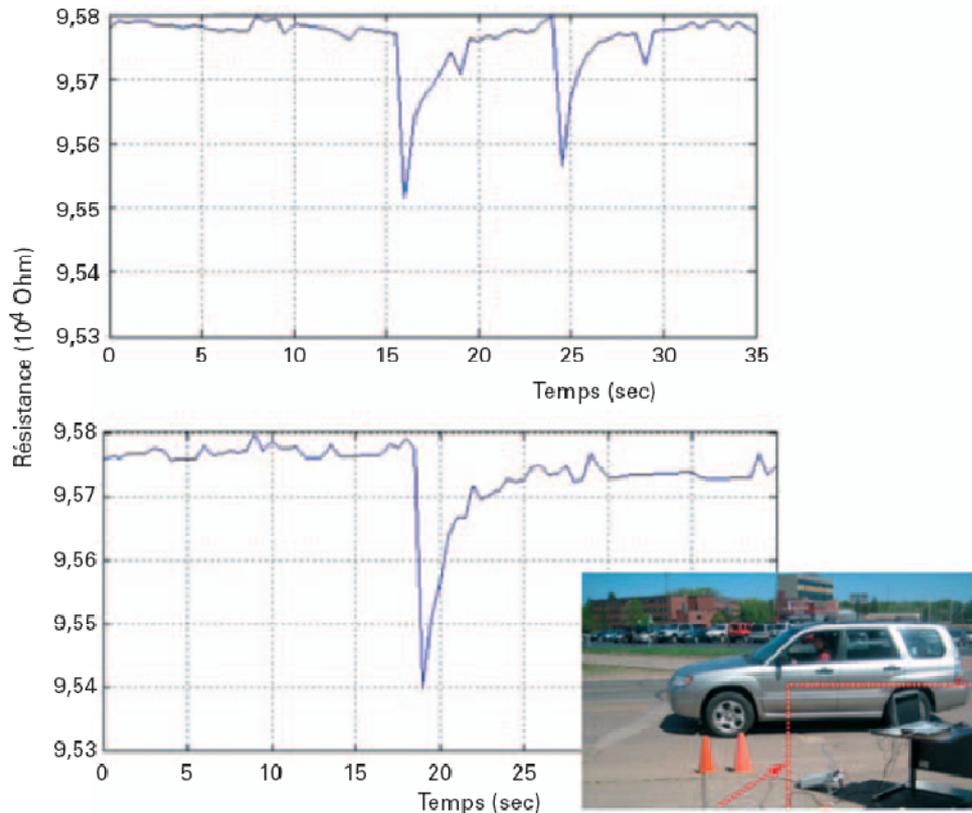
Figure 2 – Courbes de viscosité d'un coulis de ciment en fonction du gradient de vitesse pour $T < LCST$ et pour $T > LCST$ (d'après [7]) La synthèse d'un polymère en peigne possédant une chaîne principale acrylique et des chaînes latérales flexibles et neutres mais possédant une température critique inférieure de solubilité (LCST) permet d'obtenir une macromolécules qui, en dessous de la LCST, se comporte comme un superplastifiant défloculant classique et qui, au dessus de cette température, se comporte au contraire comme un agent viscosifiant et rigidifiant. Les courbes de viscosité d'un coulis de ciment en fonction du gradient de vitesse (au taux de cisaillement) pour $T < LCST$ (à gauche, 20 °C) et pour $T > LCST$ (à droite, 60 °C) illustrent ces effets.

Cette première réalisation d'un coulis cimentier thermostimulable peut trouver des applications dans des situations où la température est un paramètre facile à maîtriser le long d'une chaîne de production, comme en préfabrication par exemple, ou encore dans des situations où l'évolution de la température est prévisible, comme en ingénierie pétrolière. La richesse des diagrammes de phases des solutions de polymères permet d'en imaginer de nombreuses variantes. La libération thermocontrôlée d'agents régulateurs de prise pourrait être une de ces variantes, inspirée de ce qui se pratique en pharmacologie [8]. Le passage à un stimulus électrique plutôt que thermique devrait permettre de faciliter la mise en oeuvre. Les gels de polymères électrostimulables sont déjà l'une des principales variantes explorées pour la réalisation de muscles artificiels [9].

3. Un béton sensible

Il est relativement facile de rendre une surface de béton sensible au passage d'un véhicule en y incorporant par exemple une boucle d'induction magnétique. Il est plus difficile de doubler ce dispositif de comptage d'une fonction de pesage. En pratique, le pesage des poids lourds se fait sur des bascules, sur des aires dédiées. Le véhicule doit quitter la route principale et la mesure se fait à l'arrêt. Un dispositif permettant le pesage en marche représenterait un progrès notable. Les recherches dans ce sens se concentrent pour l'instant sur l'utilisation de la (faible) déformation des ponts lors du passage des véhicules. Une alternative intéressante serait de rendre le matériau de chaussée lui-même sensible à la pression lors du passage de chaque essieu. La faisabilité de ceci est désormais démontrée. Le matériau utilisé est un béton

chargé en nanotubes de carbone multiparois (MWNT), à 0,1 % en poids par rapport au ciment [10]. La mesure est une mesure de résistance électrique, à l'aide d'électrodes noyées dans le béton. Grâce aux propriétés piézorésistives des MWNT, le béton nanocomposite devient lui-même sensible à la contrainte qui lui est appliquée (figure 3). La sensibilité piézorésistive est de l'ordre de 0,05 kΩ/MPa et varie un peu en fonction de la teneur en eau du béton. Cette sensibilité à l'eau a été reliée à la variation de la conductivité de la matrice cimentaire et à la variation de l'émission électronique de champ en pointe de nanotube [11].



L'incorporation de nanotubes de carbone dans une matrice cimentaire conduit à un béton nanocomposite piézorésistif qui, utilisé en chaussée, permet la mesure de la contrainte au passage des véhicules. La réponse au passage de deux véhicules de taille moyenne (en haut) se distingue nettement de celle provoquée par un SUV (en bas) (d'après [10]).

Figure 3 – Réponse d'un béton nanocomposite piézorésistif au passage de deux véhicules

4. Vers un béton capable de s'auto-ausculter

On ne construit généralement pas pour six mois. La durée de vie moyenne d'un ouvrage d'art (hors centrale nucléaire) dépasse le siècle. Pendant sa durée de vie, une construction est soumise à des agressions diverses qui peuvent venir, soit de l'extérieur sous forme de facteur climatique ou environnemental, soit de l'intérieur sous forme de pathologie liée à une composition ou une mise en œuvre inadéquate. Dans le cas du béton, les cycles de gel-dégel, l'épandage de sels de déverglaçage, les embruns marins, le ruissellement des eaux de pluie, la colonisation par des micro-organismes ou encore la carbonatation sont des exemples d'agressions extérieures. La réaction alcali-granulats ou l'attaque sulfatique interne des bétons sont des exemples de la seconde catégorie.

À l'exception de l'action du gel, toutes ces agressions résultent de la perturbation de l'équilibre entre les phases minérales du matériau et la solution « interstitielle » qui remplit les pores. Dans le béton, cette dernière est essentiellement une solution saturée de chaux, à un pH voisin de 13,5. Les hydrates de ciment en conditions « normales » sont en équilibre avec cette solution. Toute perturbation conduit soit à la dissolution de certaines phases, soit à leur transformation en de nouvelles phases.

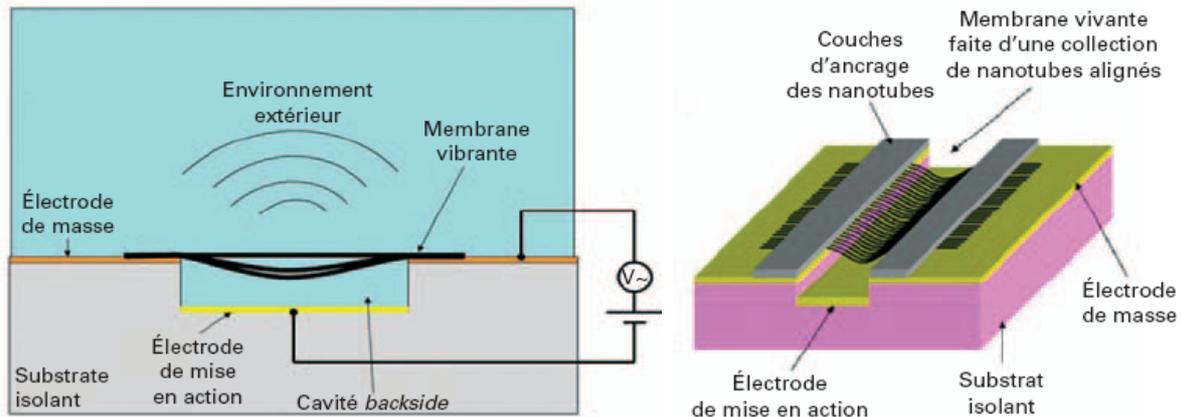
Le ruissellement d'une eau pure ou presque provoque une dissolution généralisée appelée lixiviation et augmentent donc la porosité du matériau. Les autres agressions, principalement liées à l'introduction d'ions chlorure Cl^- , d'ions sulfate SO_4^{2-} , ou d'ions carbonate CO_3^{2-} , provoquent au contraire une expansion macroscopique par croissance cristalline de nouvelles phases.

Les cristaux de chaux (la portlandite) et les hydrates d'aluminate de calcium sont les principales phases qui se transforment. Les ions carbonate, générés par le CO_2 atmosphérique ou pénétrant directement sous forme dissoute dans de l'eau de mer par exemple, transforment la portlandite en aragonite ou en calcite. Les ions chlorure provoquent la formation de chloroaluminate de calcium qui lui-même se transforme, en présence d'ions sulfate et carbonate, en ettringite et thaumasite avec expansion de volume. Ces phénomènes d'expansion conduisent eux-mêmes à de l'écaillage, à de la fissuration et, ultimement, à du morcellement.

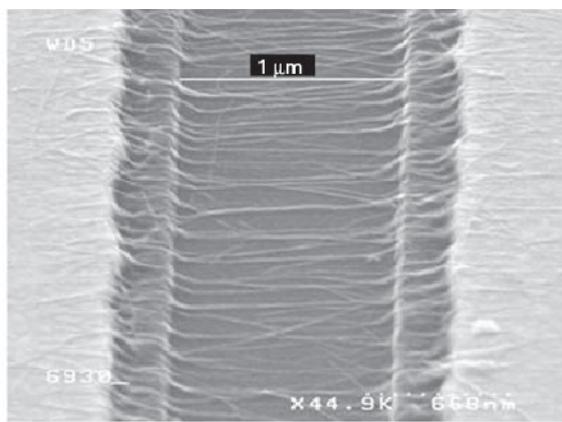
La carbonatation de la portlandite est particulièrement néfaste dans le cas du béton armé car elle s'accompagne d'une baisse de pH dangereuse pour les armatures. Ces dernières qui sont, sauf cas exceptionnel, en fer, sont passivées au pH normal de l'eau interstitielle du béton, voisin de 13,5. À ce pH, déterminé par l'équilibre de dissolution de la chaux, le fer est à l'abri des réactions d'oxydation qui conduisent à la rouille. La carbonatation détruit cet équilibre et met le fer dans des conditions où il peut s'oxyder. La rouille qui se forme à l'interface avec la matrice cimentaire détruit alors l'excellente adhésion fer-ciment et conduit à la ruine des couches superficielles de l'ouvrage puis, de proche en proche, à l'ouvrage entier. Les ouvrages marins sont particulièrement exposés à cette agression.

Détecter et prévoir aussi quantitativement que possible ces phénomènes de dégradation est donc essentiel pour la maîtrise de la durabilité des ouvrages et des risques et coûts associés [12]. L'approche actuelle en la matière est qualifiée de performantielle. L'étude statistique d'un grand nombre de cas a révélé qu'un petit nombre d'indicateurs permet d'évaluer correctement la durée de vie structurale d'un ouvrage [23]. Les plus importants parmi ces indicateurs sont la porosité, la perméabilité à l'eau et aux gaz, ainsi que les coefficients de diffusion des ions nocifs. Ces paramètres peuvent être mesurés ex situ sur des carottages [13], avec tous les inconvénients de ces derniers (faible nombre et, donc, faible représentativité ; affaiblissement de l'ouvrage), mais il est évidemment préférable de pouvoir les mesurer in situ par des méthodes non destructives. Parmi ces dernières on peut citer l'installation en surface de capteurs de déformation [14], la détection de la corrosion des armatures par méthode impédancemétrique [15], ou encore l'évaluation de la perte de rigidité par la mesure des modes propres [14]. Si ces méthodes permettent effectivement de détecter les dégradations, elles ne permettent pas de prévoir leur évolution car les indicateurs de durabilité eux-mêmes ne sont pas mesurés [16].

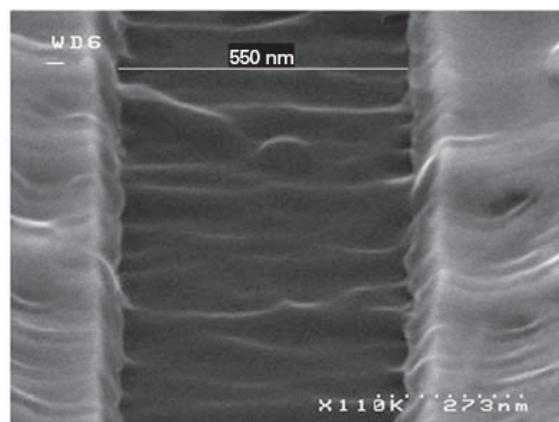
L'immersion massive de capteurs communicants dans la masse de l'ouvrage est l'une des solutions envisageables pour mesurer ces indicateurs de durabilité [17] [18], non sans difficultés car il s'agit, outre le développement du capteur proprement dit, de l'alimenter et d'assurer son intégrité dans un environnement particulièrement agressif en termes de contraintes chimiques, thermiques et mécaniques. À titre d'exemple particulièrement prometteur, on peut citer le développement récent de microtransducteurs ultrasonores à base de nanotubes de carbone (figure 4), capables de mesurer la taille et la forme des pores individuels [19] [20]. Dans le béton, les pores qui contrôlent les phénomènes diffusifs sont les pores dits « capillaires », typiquement de taille micrométrique ou en dessous. Pour pouvoir distinguer individuellement de tels pores et suivre leur évolution, le dispositif se doit d'utiliser des ondes ultrasonores de longueur d'onde située dans le même domaine de longueur et générer un front d'onde lui aussi de la même taille.



a) schéma de fonctionnement d'un microtransducteur ultrasonore b) schéma d'une membrane de nanotubes de carbone alignés



c) clichés de microscopie électronique à balayage de nanotubes alignés par diélectrophorèse



d) clichés de microscopie électronique à balayage d'une membrane suspendue de nanotubes, ancrée de chaque côté par une couche de Pt de 50 nm

Figure 4 – Schemas de microtransducteurs ultrasonores et clichés MEB de membranes de nanotubes (d'après [22])

Ces deux contraintes sont extrêmement difficiles à satisfaire simultanément, en particulier dans un milieu liquide, ce qui est le cas dans les pores du béton, saturés par les solutions agressives. Les transducteurs piézoélectriques ultrasonores peuvent opérer aux fréquences souhaitées, mais leur taille est beaucoup trop grande. Les dispositifs nano-électromécaniques (NEMS) constitués par exemple de nanopoutres de silicium ou de nanotubes de carbone individuels permettent de concilier très haute fréquence et très faible taille, mais de tels dispositifs fondés sur des nano-objets individuels sont difficiles à utiliser comme actionneurs pour un milieu fluide.

La solution proposée consiste à utiliser des membranes de nanotubes de carbone « monoparoï » SWNT) alignés (figure 4). L'alignement est obtenu par la technique de diélectrophorèse, qui consiste à appliquer un champ électrique alternatif entre deux électrodes. Appliqué à des particules polarisables, ce champ crée une force d'attraction entre elles [21] et, avec des objets allongés comme des nanotubes, tend à les aligner le long des lignes de champ. On obtient une couche peignée de nanotubes. Ce faisant, on bénéficie des propriétés exceptionnelles des nanotubes, mais avec un dispositif qui se comporte comme une plaque (ultra-)mince capable de mobiliser un milieu fluide. La membrane est excitée électrostatiquement par application d'une tension variable à une contre-électrode. Les déplacements de la membrane sont mesurés par amplification CMOS. Les premiers résultats de calcul ont montré que la mesure de

l'amplitude de vibration permet, par résolution d'un problème inverse, d'identifier le fluide (air ou eau) occupant le pore et, dans le cas d'un pore saturé d'eau, la taille du pore.

Pour rendre le dispositif réellement opérationnel, deux étapes restent à franchir. La première est d'associer le capteur proprement dit à un microsystème autonome capable d'alimenter le capteur, de transmettre les données et, éventuellement, d'avoir des capacités de (pré-)traitement. Le packaging de ce dispositif, nettement plus volumineux que le capteur lui-même, doit être conçu pour ne pas écranter totalement le capteur de son environnement.

Une solution, adaptée au béton, a été proposée [19].

La seconde étape à franchir est la mise au point d'une méthode de traitement statistique de l'information qui sera transmise par un très grand nombre de capteurs, massivement distribués. L'exemple (unique en son genre pour l'instant à notre connaissance) qui vient d'être décrit n'est vraisemblablement que le premier développement d'une approche qui se généralisera à d'autres indicateurs. Le monitoring continu et distribué de capteurs de pénétration des chlorures ou de carbonatation présenteraient un intérêt certain. Les nanotubes – de carbone ou d'un autre matériau (semi)conducteur – et les nanofils sont extrêmement attractifs pour ces applications également, non par leurs propriétés mécaniques, mais par leur capacité à être fonctionnalisés en surface par des groupes organiques capables de détecter spécifiquement les espèces chimiques visées.

5. Conclusions

Les nanosciences, l'ingénierie moléculaire et les méthodes d'investigation – expérimentales ou numériques – associées aux nanotechnologies ont un impact décisif sur l'évolution des matériaux du génie civil. Ce sont elles qui conditionneront désormais l'amélioration de la cohésion des bétons, de leur ductilité, de leur résistance au fluage, de leur durabilité et, plus globalement, de leur bilan carbone. Ce sont elles qui permettront le contrôle fin – éventuellement grâce à un stimulus chimique, électrique ou thermique – de l'évolution temporelle des propriétés mécaniques, depuis l'état fluide et frais jusqu'à l'état durci. Ce sont elles aussi qui permettront – et permettent déjà – de faire évoluer la formulation des bitumes, ou leurs substituts d'origine végétale ou alguaire, pour en faire les liants économes, auto-réparants et résistants aux conditions climatiques extrêmes. Enfin, on peut compter sur elles aussi pour la mise au point des liants minéraux, organiques ou hybrides du futur, à bilan CO₂ voisin de zéro. La route n'échappe pas à cette évolution, qui deviendra de plus en plus communicante avec les véhicules et les gestionnaires, résiliente aux aléas climatiques et indépendante énergétiquement. Simples prothèses d'auscultation pour l'instant, ces capteurs feront bientôt partie intégrante de la matière de l'ouvrage et se transformeront à l'occasion en actionneurs. Seule l'utilisation des NT permettra de les doter, dans un volume réduit, des nombreuses fonctionnalités souhaitées et de les alimenter. Cette évolution permettra de mieux prévoir et, globalement, d'optimiser le fonctionnement de l'ossature matérielle de nos sociétés. Les villes, les infrastructures et les réseaux de transport qui résulteront de cette évolution seront qualifiés « d'intelligents ». On parle de « smart cities » ou d'« intelligent transport systems ». C'est sans compter avec le fait que l'essentiel restera du ressort d'une autre sphère, celle du choix de la manière dont nous voulons vivre ensemble.

6. Références

[1] VERNET (C.). – *Ultra-durable Concretes: Structure at the Micro- and Nanoscale*. Materials Research Bulletin, vol. 29 n°5, 324-327 (2004).

[2] GIRAUDEAU (C.), d'ESPINOSE (J.-B.), SOUGUIR (Z.), NONAT (A.) et FLATT (R.J.). – *Surface and intercalation chemistry of Polycarboxylate Copolymers in Cementitious Systems*. J. Amer. Ceramic Society, vol. 92, 2471-2488 (2009).

[3] GOBIN (P.-F.), GUENIN (G.), MORIN (M.), SALVIA (M.) et TATIBOUET (J.). – *Smart materials : a future for composites*. J. of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 7, pp. 353-358 (1996).

[4] GOBIN (P.-F.) et MORIN (M.). – *Les matériaux à mémoire de forme*. Annales de Chimie, Science des Matériaux, vol. 29, n°6, 23-32 (2004).

[5] C'est le LiTraCon[®], de Aron Losonczi ou le i- Light, de Italcementi.

[6] OUELLETTE (J.). – *Smart Fluids Move into the Marketplace*. The Industrial Physicist, American Institute of Physics, 14-17 ou un dossier des TECH ING ! (déc. 2003-jan 2004).

[7] NOEL (M.-H.), VAN DAMME (H.) et HEBRAUD (P.). – *Building of a thermoresponsive cement*. Cement & Concrete Research, vol. 41, n°9, 975-980 (2011).

[8] CHUNG (J.E.). – *Effect of molecular architecture of hydrophobically modified poly(N-isopropylacrylamide) on the formation of thermoresponsive core-shell micellar drug carriers*. J. of Controlled Release, vol. 53, 119-130 (1998).

[9] BAR-COHEN (Y.) et ZHANG (Q.). – *Electroactive Polymer Actuators and Sensors*. Materials Research Society Bulletin, vol. 33, n° de mars, 173-181 et autres articles de ce numéro (2008).

[10] HAN (B.), YU (X.) et KWON (E.). – *A self-sensing carbon nanotube/cement composite for traffic monitoring*. Nanotechnology, vol. 20, article n°445501 (5 p.) (2009).

[11] HAN (B.), YU (X.) et OU (J.). – *Effect of water content on the piezoresistivity of MWNT/cement composites*. J. of Materials Science, vol. 45, 3714-3719 (2010).

[12] OLLIVIER (J.-P.) et VICHOT (A.). – *La Durabilité des Bétons*. Presses de l'ENPC, Paris (2008).

[13] LUKSCHOVA (S.). – *Petrographic identification of alkali-silica reactive aggregates in concrete from 20th century bridges*. Construction and Building Materials, 734-741 (2003).

[14] WENZEL (H.). – *Monitoring and Assessment of bridges and structures*. Technical report, EC Research Project SAMCO (2003).

[15] FUHR (P.) et HUSTON (D.R.). – *Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors*. Smart Materials and Structures, vol. 7, 217-228 (1998).

[16] BRANCO (F.A.). – *Sensors needed for civil engineering infrastructures*. NSF-ESF Workshop : Smart Structures and Advanced Sensors Technologies (2005).

[17] KELLY (R.G.). – *Embeddable corrosion monitoring instrument for steel reinforced structures*. US Patent 6, 690, 182 B2 (2004).

- [18] YAMASHITA (S.). – *Quality monitoring system for building structure and semiconductor integrated circuit device*. US Patent 6, 950, 767 B2 (2005).
- [19] LEBENTAL (B.) et GHIS (A.). – *Procédé et dispositif d'analyse acoustique de microporosités dans un matériau tel que le béton à l'aide d'une pluralité de transducteurs CMUTS incorporés dans le matériau*. Patent EN 08 57927 (2008).
- [20] LEBENTAL (B.) et GHIS (A.). – *Cellule CMUT formée d'une membrane de nanotubes ou de nanofils ou de nanopoutres et dispositif d'imagerie acoustique ultra haute fréquence comprenant une pluralité de telles cellules*. Patent EN 08 57927 (2008).
- [21] DIMAKI (M.) et al. – *Dielectrophoresis of carbon nanotubes using microelectrodes ; A numerical study*. Nanotechnology, vol. 15, 1095-1102 (2004).
- [22] LEBENTAL (B.), GHIS (A.), DELEVOYE (E.), CAUSSIGNAC (J.-M.) et BOURQUIN (F.). – *Capacitive ultrasonic micro-transducer made of carbon nanotubes*. EJECE, 1-14 (2010).
- [23] BAROGHEL-BOUNY (V.), CUSSIGH (F.) et ROUGEAU (P.). – *L'approche performantielle de la durabilité des bétons*, in « *La Durabilité des Bétons* », édité par J.-P. Ollivier et A. Vichot, Presse des Ponts et Chaussées, ISBN 978-2-85978-434-8 (2008).