

IMAGERIE PAR RÉSONANCE MAGNÉTIQUE APPLIQUÉE AUX MATÉRIAUX DU GÉNIE CIVIL

Ph. COUSSOT

LMSGC¹

Un imageur par résonance magnétique dédié aux matériaux du génie civil et de la construction est actuellement en cours d'acquisition par le LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées). Il sera géré par le LMSGC à Champs-sur-Marne et installé dans les locaux de l'IFI (Institut francilien d'ingénierie). De nombreuses collaborations avec des laboratoires et des entreprises sont envisagées et certaines déjà mises en place. D'un point de vue général, les recherches concerneront les transferts et changements de phase dans les milieux granulaires et poreux. Une série de dispositifs de recherche complémentaire est à l'étude. Ceux-ci permettront de solliciter les échantillons (chauffage, refroidissement, écoulement, transfert, fissuration) tout en réalisant des images de la structure interne. Ceci nous permettra de mettre en relation les propriétés macroscopiques des matériaux et leurs évolutions au niveau mésoscopique.

MAGNETIC RESONANCE IMAGING APPLIED TO CIVIL ENGINEERING MATERIALS

A magnetic resonance imager for use with civil engineering and construction materials is being acquired by the LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées). It will be managed by the LMSGC at Champs-sur-Marne and will be installed on the premises of the IFI (Institut francilien d'ingénierie). Numerous joint projects between laboratories and industry are contemplated and some are already under way. The general outlook for these research projects is to study transfers and phase changes in granular porous media. A number of supplementary research devices are being studied. These devices will make it possible to submit samples to heating, cooling, flow, transfer and fissuring while recording images of their internal structure. This will allow us to discover the relationship between the macroscopic properties of materials and mesoscopic changes.

(1) Laboratoire des matériaux et des structures du génie civil,
Cité Descartes, 2, Allée Kepler
77420 Champs-sur-Marne - France

IMAGINERÍA POR RESONANCIA MAGNÉTICA APLICADA A LOS MATERIALES DE INGENIERÍA CIVIL

Un sistema de creación de imágenes por resonancia magnética dedicado a los materiales de ingeniería civil y de la construcción se encuentra en la fase de adquisición por el LCPC (Laboratoire central des Ponts et Chaussées). Su gestión estará a cargo del LMSGC, de Champs-sur-Marne y será instalado en los locales del IFI (Institut francilien d'ingénierie). Se han contemplado ya numerosas colaboraciones con diversos laboratorios y empresas y algunas de ellas han tomado ya cuerpo. Desde un punto de vista general, las investigaciones se habrán de circunscribir a las transferencias y modificaciones de fase en los medios granulares y porosos. Se encuentra en estudio una serie de dispositivos de investigación complementarios, que permitirán solicitar las muestras sometidas a estudio, al mismo tiempo que se obtienen imágenes de la estructura interna. Todo ello permitirá poner en relación las propiedades macroscópicas de los materiales y sus evoluciones a nivel mesoscópico.

1 CADRE GÉNÉRAL

Un imageur par résonance magnétique est en cours d'acquisition par le LCPC (signature du marché avec la société *Sadis Bruker Spectrospin* le 24 novembre 1997, délai contractuel : 8 mois). Il sera installé dans les locaux de l'IFI (université de Marne-la-Vallée) et géré par le LMSGC (UMR113LCPC/ CNRS) situé à proximité. Ce grand équipement est destiné à la réalisation de recherches sur les matériaux du génie civil et de la construction, et plus largement, sur les matériaux granulaires et poreux. Cet imageur est un prototype (proche des imageurs hospitaliers) unique au monde par ses caractéristiques (vertical, tunnel de 40 cm de diamètre, champ variable entre 0,5 et 2,4 teslas) et son champ d'application. Après une période de prise en main de l'appareil fin 1998, les premières recherches démarreront au début de l'année 1999. On notera qu'il ne s'agit pas d'une technique

standard dont on peut attendre qu'elle résolve directement des problèmes pratiques, mais d'un grand équipement de recherches qui permettra d'effectuer des études en amont des problèmes pratiques.

2 DESCRIPTION SOMMAIRE DE LA TECHNIQUE

Pour étudier les propriétés physiques et chimiques des matériaux dans le but de comprendre et prédire leur comportement ou concevoir de nouveaux matériaux, les techniques de mesure les plus couramment utilisées fournissent une information locale (teneur en atomes ou molécules d'une catégorie particulière dans un très petit volume extrait du matériau), surfacique (tension superficielle, déformations d'un milieu le long de son interface avec le milieu ambiant, etc.), moyenne sur un volume caractéristique du matériau ou dans une direction privilégiée (teneur en eau, perméabilité, viscosité, etc.). Certaines de ces techniques peuvent cependant apporter des informations plus complètes concernant la structure interne lorsque le matériau étudié a une structure cristalline donc périodique. Ce n'est pas le cas en général pour les matériaux du génie civil, et les techniques évoquées ci-dessus ne permettent pas de déterminer la distribution spatiale de propriétés physiques et chimiques à l'intérieur du matériau sans le détruire.

La technique du scanner aux rayons X, qui permet d'obtenir des images selon des plans de coupe à travers le matériau, répond en partie à ces exigences. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) répond aussi à ces contraintes mais cette seconde technique présente cependant des avantages notables sur la première :

- En utilisant un appareil conçu pour étudier la résonance des protons de l'hydrogène de l'eau, on peut obtenir spécifiquement une cartographie de la position de l'eau, au sein du matériau, plus ou moins indépendamment des propriétés de la matrice solide. Or, l'évolution (durabilité) des matériaux du génie civil est grandement affectée par les transferts ou les transformations de l'eau qu'ils contiennent.
- Lorsqu'elle est bien maîtrisée la technique d'IRM permet, en modifiant les méthodes d'acquisition des données, de faire varier le contraste des images en fonction de l'état de l'eau (gaz, liquide, solide) ou de ses propriétés locales au contact du solide. On peut ainsi avoir accès à différents types de cartographies de la structure interne. Il est aussi possible d'observer les mouvements de l'eau ou de particules contenant de l'eau.
- Les images de l'intérieur du matériau peuvent être obtenues selon des plans de direction arbitraire sans déplacer l'échantillon.

La technique de l'IRM repose sur le phénomène de résonance magnétique nucléaire. En RMN on enregistre le signal lié à la résonance des protons dans l'ensemble d'un échantillon. On déduit de son intensité la quantité de protons

de la molécule d'eau dans le volume et le temps de retour à l'équilibre des spins correspondants (qui est lié aux interactions des protons avec leur environnement). En IRM, on impose en outre des gradients de champ principal qui ont pour effet de faire varier spatialement la fréquence de résonance. Ainsi, seuls les spins contenus dans une fraction particulière du volume de matériau entrent en résonance. De cette manière, on peut faire correspondre le signal et une zone spécifique au sein de l'échantillon. Des « séquences », qui comprennent une succession de périodes de gradients de champ principal, de périodes de champ oscillant et de phases de repos, doivent être imposées à l'échantillon pour finalement, après un traitement des données adéquat, obtenir une « image » de l'eau dans le matériau durant une période donnée (de quelques minutes à quelques jours suivant la résolution recherchée). La résolution dépend de nombreux paramètres, tels que la valeur du gradient de champ, le temps de retour à l'équilibre (temps de relaxation), la durée de l'expérience, et des problèmes de diffusion ou d'anisotropie de susceptibilité magnétique.

Compte tenu des caractéristiques de l'imageur du LCPC, la résolution que nous pouvons espérer atteindre est de l'ordre du millimètre. Les principales études concerneront donc surtout des problèmes de transferts, transformations, changements de phase de l'eau dans les milieux poreux, ou de mouvements et d'évolutions de la structure interne de milieux granulaires, et non des explorations fines de la structure des matériaux. Dans ce cadre, un aspect essentiel de l'ensemble de ces recherches sera la mise en œuvre de couplages « sollicitations de l'échantillon-observations internes par IRM » pour l'étude des matériaux. Ainsi, six dispositifs de recherche complémentaires sont déjà prévus, qui sont destinés à chauffer, refroidir, cisailier, ou fissurer un échantillon, lui injecter un gaz ou un liquide, ou encore permettre des écoulements granulaires. Ces dispositifs doivent être adaptés à une utilisation dans l'IRM, c'est-à-dire dans un espace confiné et réduit et réalisés à l'aide de matériaux essentiellement amagnétiques.

En parallèle de ces recherches, à long terme, on explorera la possibilité de concevoir et de faire construire, sur la base des résultats obtenus avec les divers matériaux cités plus haut dans différentes conditions, un imageur par résonance magnétique transportable pour étudier *in situ* les matériaux du génie civil ou de la construction.

3 EXEMPLES D'UTILISATION DE L'IRM DU LCPC

Dans le domaine du génie civil, il est envisagé d'utiliser l'IRM pour étudier entre autres :

- le comportement mécanique des sols naturels (gonflement, rupture, compression, etc.) ;
- les propriétés des bétons et ciments (fissuration, perméabilité, rhéologie, prise, etc.) ;

- les propriétés thermiques des matériaux de construction ;
- les transferts de polluants dans les sols ;
- les phénomènes capillaires dans les matériaux poreux ;
- les propriétés des chaussées (comportement mécanique, colmatage, etc.) ;
- le comportement du bois (comportement mécanique, séchage, vieillissement, transferts d'eau, etc.) ;
- le gel des roches et des sols ;
- le séchage et la propagation de front de vapeur dans les matériaux poreux.

Compte tenu de la carence d'un appareil similaire pour les matériaux de l'industrie proches de ceux du génie civil (boues de forage, produits colmatants, charbon liquide, boues résiduaires, poudres, pâtes, etc.) il est raisonnable de penser que cet appareil pourra aussi ultérieurement trouver de nombreuses applications dans ce domaine.

4 COLLABORATIONS

Les premiers thèmes de recherches envisagés en collaboration avec des laboratoires de la région parisienne sont pour l'essentiel à l'origine du projet d'IRM dédié aux matériaux du génie civil, et ont fait l'objet d'un programme de recherche commun et fédérateur soutenu par la région Île-de-France (procédure SESAME). Ces thèmes de recherche concernent :

- le *LCPC* : au travers des différents thèmes cités plus haut ;
- le *CSTB* : état de liaison et transformations de l'eau au sein des matériaux poreux du bâtiment (isolants hygroscopiques, béton cellulaire, plâtre, matériaux à base de bois, matériaux polymères) ;

- le *LRMH* (Laboratoire de recherches sur les monuments historiques) : transferts d'eau dans les pierres des monuments historiques et notamment accumulation des sels transportés par l'eau et le changement de phase eau-vapeur (déterminants vis-à-vis de l'altération de ces pierres).

De nombreuses autres recherches et/ou collaborations sont dès à présent envisagées, notamment avec la société *Bouygues* en vue d'étudier les différentes natures d'eau (libre, liée, adsorbée) présente dans les bétons, et de suivre la déshydratation et la réhydratation des bétons ; le *Centre de recherches sur la matière divisée* d'Orléans, l'équipe *Physique des milieux granulaires* de la section *PMGP* du *LMSGC* en vue d'étudier les écoulements granulaires et l'équipe de *Physique des milieux poreux* en vue d'étudier les circulations d'eau dans des matériaux poreux modèles ; le *Laboratoire de mécanique et de génie civil* (Montpellier) pour étudier, d'une part, les transferts de matière aux voisinages des racines, en liaison avec l'*INRA*, et d'autre part, la distribution d'humidité et de bois de réaction dans les pièces de bois d'œuvre, dans le but d'améliorer les techniques de première transformation du bois.

D'autres collaborations, sur des thèmes à définir, peuvent être envisagées avec diverses entreprises et laboratoires qui s'intéressent à la structure interne des matériaux ou aux évolutions des phases liquides au sein des milieux poreux. Enfin, des collaborations avec plusieurs laboratoires étrangers et notamment un projet européen sur le thème de l'exploration des milieux poreux pourront être mis en place.

Manuscrit définitif reçu en mai 1998