

Un béton « à la carte » ?

Le béton flexible ECC appartient au groupe des matériaux composites dits organiques-inorganiques. Dans de tels matériaux, un composé organique (comprenant du carbone), ici le polymère, coexiste avec un composé inorganique (qui contient par exemple de la silice, du calcium, etc.). Les molécules de polymère peuvent être rassemblées en fibres, comme dans l'ECC, ou dispersées dans l'hydrate cimentaire. Les propriétés de ces matériaux composites (qualité de l'hydratation, fluidité lors de la phase liquide, résistance, etc.) sont directement liées aux propriétés chimiques de l'interface des deux composés et à la nature de leurs interactions.

Les bétons « autoplaçants », par exemple, sont très liquides et leur prise est relativement lente. La pose en est facilitée, car le béton se coule à l'emplacement souhaité et aucune phase d'homogénéisation ultérieure n'est nécessaire. Ces propriétés résultent de l'addition de molécules de polymères, qui enveloppent les grains de ciment et retardent leur hydratation, tout en facilitant leurs mouvements.

Ces sont aussi les polymères qui permettent de réaliser des bétons autoréparants (ou autotricatrisants). Cela n'est pas spécifique au béton ECC et est déjà opérationnel à l'échelle industrielle. Lors de la pose, l'eau est ajoutée au ciment en quantité insuffisante pour faire réagir tous les

grains de clinker (le principal composant), de sorte que certains restent protégés par leur film polymérique ; quand une fracture se produit, ils deviennent accessibles à l'eau (de pluie, par exemple), qui provoque une nouvelle formation d'hydrate cimentaire, et donc l'autoréparation.

Malgré leur importance, les interactions des composés organiques et inorganiques dans ces matériaux sont mal connues. Dans le cas du béton ECC, l'augmentation d'adhérence des fibres à mesure qu'on les retire de la matrice semble due aux copeaux abrasifs, qui restent attachés aux fibres et se prennent dans les porosités du ciment, mais d'autres mécanismes sont sans doute à l'œuvre : formation de

nouvelles liaisons chimiques, interactions électrostatiques, etc.

Une approche physico-chimique moderne, combinant des analyses à toutes les échelles (du nanoscopique au macroscopique) permettrait de préciser ces interactions, ainsi que les paramètres clefs. On pourrait alors envisager une ingénierie « à la carte » du béton, où l'on obtiendrait les propriétés souhaitées en faisant varier divers paramètres, telle la nature du polymère.

Roland Pellenq,
directeur de l'Unité mixte
internationale CNRS-MIT
Multi-scale material science
for energy and environment (MSE),
à Cambridge, aux États-Unis

l'ouverture de microfissures est trop difficile. La force nécessaire pour les ouvrir étant très élevée, elle déclencherait une rupture majeure. L'idée de défauts « pas trop petits » dans l'ECC contraste avec les principes des bétons de hautes performances, où l'on cherche à minimiser la taille des défauts, voire à les éliminer.

Ainsi, lorsque la distribution naturelle de tailles d'imperfections n'est pas optimale pour la microfissuration, l'introduction de défauts artificiels est bénéfique. Nous avons appliqué cette idée à une version d'ECC développée pour effectuer des réparations rapides (le matériau sèche vite) : de petites particules de polystyrène, d'un diamètre maximal d'environ quatre millimètres, ont été ajoutées au mélange. Ces défauts artificiels augmentent la ductilité du composite. Sans eux, le matériau se comporterait comme un béton doté d'un renfort fibré ordinaire. Dans l'ECC, le contrôle de la distribution statistique de la taille des défauts permet donc d'adapter le comportement mécanique.

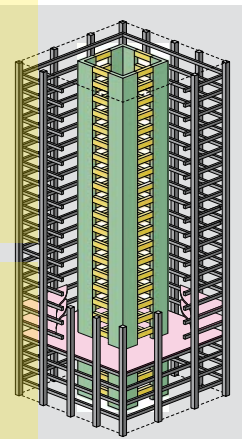
Ces défauts ne doivent être ni trop petits, ni trop grands. S'ils ont une taille excessive, les microfissures se forment trop vite, et la résistance à la traction et à la compression diminue. Il existe donc un intervalle optimal pour la taille des défauts.

Outre cette taille, les fibres de renfort sont le second élément clef de l'ECC, car elles évitent que les microfissures

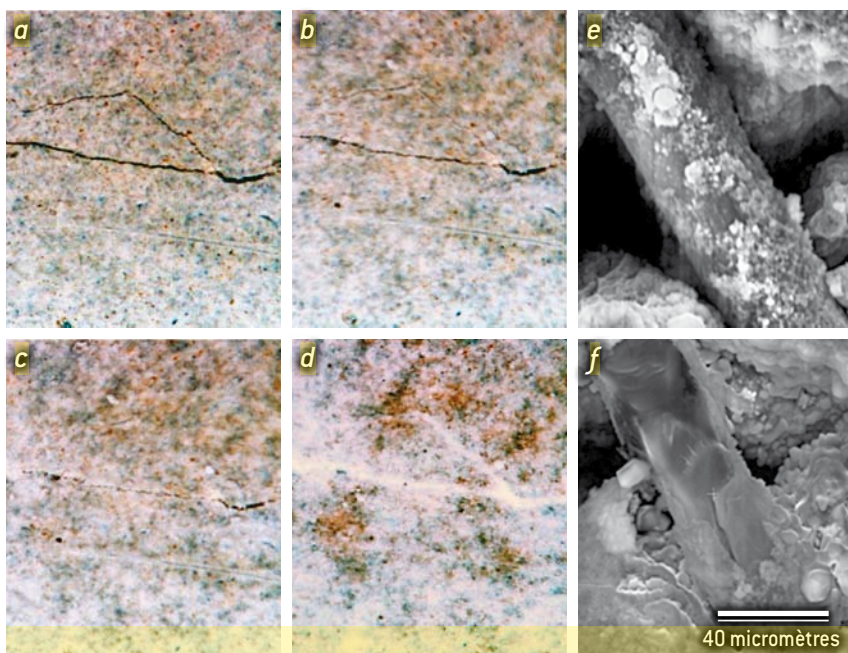
s'agrandissent de mesurement. Lorsqu'une microfissure s'ouvre, les fibres forment une « couture » entre les deux bords et supportent une grande partie des forces exercées sur le matériau (voir la figure 4). Souvent polymérisées à partir d'alcool polyvinylique (APV), elles sont de faible diamètre (environ 39 micromètres), afin qu'on puisse en mettre un grand nombre. Chaque centimètre carré d'ECC contient ainsi plus de 1000 fibres.

De l'importance des fibres

En conséquence, les microfissures se propagent sans s'élargir (seule la largeur de la petite zone où s'ouvre la fissure augmente brièvement). On parle de propagation plate, un mode distinct de la propagation dite de Griffith, plus commune, où l'ouverture maximale de la fissure augmente comme la racine carrée de sa longueur. Comme les fibres relient les bords d'une fissure qui vient de s'ouvrir, une force supplémentaire peut s'exercer sur le matériau sans le briser : au lieu d'élargir la fissure, elle déclenche l'ouverture de nouvelles microfissures à partir d'autres défauts. En d'autres termes, les fibres entraînent un type particulier d'ouverture des microfissures à l'échelle mésoscopique, ce qui joue un rôle majeur dans le comportement mécanique de l'ECC.



5. LA TOUR RÉSIDENTIELLE Nabeaura Yokohama, située à Tokyo et achevée en 2007, comporte 41 étages. À chaque étage, quatre poutres de liaison en ECC (en jaune sur le schéma) relient les murs de la structure interne (en vert). Capables de se déformer et d'absorber ainsi l'énergie reçue des tremblements de terre, elles stabilisent le bâtiment.



6. LE BÉTON FLEXIBLE ECC EST CAPABLE DE S'AUTORÉPARER, comme l'indiquent les photographies *a* à *d*, qui montrent l'évolution d'une fissure au cours du temps. Les photographies au microscope *(e, f)* présentent les bords de la fissure et la fibre juste après la fissuration *(e)* et après 36 heures d'immersion dans l'eau *(f)* : divers composés solides se sont formés et ont comblé la fissure.

La résistance et la densité des fibres déterminent la force maximale au-delà de laquelle une microfissure dégénérera en fracture du matériau. La dispersion des fibres dans le composite étant imparfaite, leur densité varie légèrement. Finalement, l'ECC se brise lorsque la force limite d'une des microfissures est dépassée.

Les interactions fibres-microfissures sont complexes, en particulier lorsque les fibres traversent les fissures selon un angle incliné – ce qui se produit la plupart du temps, car elles sont orientées aléatoirement dans la matrice de ciment hydraté. Pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées, chaque fibre doit se décoller de la matrice et y glisser lors de l'ouverture d'une fissure. Si les fibres ne glissent pas, elles se cassent au lieu de jeter un pont à travers la fissure. Inversement, si elles glissent trop, elles ne s'opposent plus à l'ouverture de la fissure, qui risque de se transformer en rupture macroscopique.

On étudie le décollement et le glissement des fibres en tirant sur l'une d'elles jusqu'à ce qu'elle sorte entièrement du composite. La force requise doit d'abord surmonter l'adhérence entre la fibre et la matrice pour que le glissement commence. La fibre d'alcool polyvinyle, fréquem-

ment utilisée, a une surface hydrophile (attirant l'eau), qui adhère à la matrice, en se liant à des hydroxydes métalliques (contrairement à la plupart des polymères, qui sont hydrophobes et glissent facilement dans la matrice). L'adhérence est même trop intense, de sorte que les fibres d'alcool

LE BÉTON FLEXIBLE ECC pourrait contribuer à des infrastructures « intelligentes », capables de s'autoréparer et de détecter leurs propres dégâts.

polyvinyle pur se rompent souvent lorsqu'on tire dessus. C'est pourquoi nous avons fabriqué un mince revêtement de matériau hydrophobe, que nous avons étalé sur les fibres. Épais de 10 à 100 nanomètres, il affaiblit l'adhérence de la fibre au ciment.

Le glissement enclenché, il ne doit pas durer indéfiniment. Dans l'ECC, il est de moins en moins facile à mesure qu'il progresse : les fibres sont conçues pour s'abriter en traversant le tunnel rugueux de la matrice (elles sont en quelque sorte pelées par le glissement), de sorte qu'elles tendent à « s'accrocher » à ce tunnel (voir la figure 4). Ainsi, la force nécessaire pour retirer la fibre augmente, ce qui explique

la stabilisation de la largeur de la fissure et le mode plat de propagation.

L'ECC a récemment été utilisé au sein de plusieurs infrastructures, tels des bâtiments, des ponts, des routes et des canaux d'irrigation. Au Japon, plusieurs grands immeubles contiennent des poutres de ce matériau, qui les rend plus résistants aux tremblements de terre grâce à sa bonne ductilité en traction. C'est le cas de la tour résidentielle *Nabeaura Yokohama* de 41 étages, achevée en 2007 et localisée à Tokyo, ville qui a bien résisté au tremblement de terre de 2011. À chaque étage, quatre poutres d'ECC relient les coins des murs intérieurs (voir la figure 5). Durant un tremblement de terre, elles sont soumises à une combinaison de forces longitudinales (de traction) et diagonales. Elles se déforment alors en développant des séries de microfissures, ce qui dissipe l'énergie communiquée au bâtiment par le séisme et limite les forces s'exerçant sur le reste de la structure.

Un matériau déjà en cours d'exploitation

L'ECC remplace aussi avantageusement le béton sur les ponts routiers, car la faible largeur des microfissures minimise les effets des variations de température, de la pénétration de chlorure (lors du salage des routes) et de la rouille formée sur les barres de renfort en acier, ainsi que les dégâts causés par l'usure. Quand la température varie, les poutres en acier se dilatent et se rétractent, mettant à rude épreuve le béton qui les surmonte.

Sur un pont du Michigan, au Nord-Est des États-Unis, on a ainsi installé une dalle en ECC pour jouer le rôle de joint de dilatation : elle s'étire quand le pont se dilate, puis se contracte en fermant les microfissures quand le pont reprend sa taille d'origine. Elle est bien plus efficace qu'une dalle en béton classique, qui se fissure plus profondément, laissant pénétrer l'eau salée, et se détériore plus vite, d'où la nécessité d'entretiens fréquents. Installée en 2005, la dalle d'ECC n'a pas nécessité de réparation jusqu'ici.

L'ECC pourrait contribuer à des infrastructures « intelligentes », capables notamment de s'autoréparer, ainsi que de détecter leurs propres dégâts et de les signaler à des stations à distance. Un échantillon d'ECC endommagé a été successivement mouillé et séché plusieurs fois en laboratoire : ses