

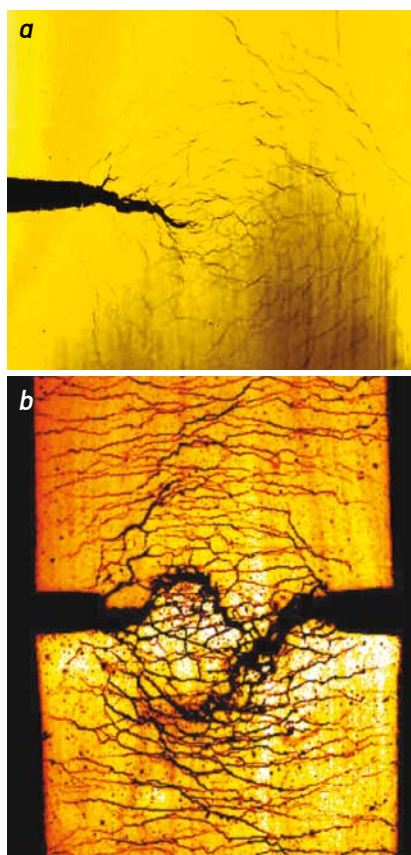
du béton ordinaire: c'est le béton le plus ductile en usage aujourd'hui.

La déformation irréversible de l'ECC est associée à l'ouverture de nombreuses microfissures presque parallèles entre elles, et perpendiculaires à la force de traction. Elles se développent à partir d'un ensemble de défauts préexistants dans le matériau. Leur ouverture contrôlée est la source de la ductilité en traction de l'ECC. Elles permettent au matériau de dissiper une quantité croissante d'énergie lorsque la force de traction augmente. Le même principe est appliqué à la carrosserie des voitures, qui se déforme lors d'un accident pour dissiper l'énergie du choc.

Un béton ultrarésistant grâce aux microfissures

Les microfissures naissent d'abord à partir des plus grands défauts préexistants, puis des plus petits. En conséquence, leur ouverture est de plus en plus difficile, et la force nécessaire pour déformer le matériau augmente à mesure que cette déformation progresse. Si les défauts du béton étaient de taille uniforme, la courbe de traction serait une succession de deux droites, la seconde étant horizontale: au-delà de la limite élastique, la déformation se poursuivrait même si l'on n'augmentait pas la contrainte appliquée.

À mesure que les microfissures se développent, la distance qui les sépare diminue, jusqu'à ce qu'un état de saturation soit atteint: leur espacement est



3. LES ENTAILLES FRAGILISENT un béton classique, car des fissures risquent de se propager depuis leur pointe et de conduire à la rupture. Dans le béton flexible ECC, l'énergie est mieux répartie dans le matériau et se dissipe par l'ouverture de microfissures sur une vaste zone (a, cas d'une entaille simple, et b, cas d'une entaille double). En conséquence, tandis qu'un béton classique entaillé devient brutalement plus fragile, la diminution de résistance est plus progressive pour le béton ECC.

alors d'environ un millimètre. La largeur de la microfissure augmente d'abord de façon quasi linéaire avec la contrainte, puis se stabilise, en général au-dessous de 100 micromètres – nous avons pu abaisser cette valeur, qui dépend de la composition de l'ECC, jusqu'à 20 micromètres. Une microfissure ne dégénère pas en fracture majeure avant que la limite de déformation du matériau ne soit atteinte.

Quand il finit par se rompre, un barreau d'ECC présente donc tout un réseau de microfissures – à l'inverse d'un matériau fragile ou quasi fragile, dont la rupture est nette et localisée. Les microfissures atteignent parfois le bord du barreau, même s'il est de grande taille (36 centimètres de longueur, 30 centimètres de largeur et 6 centimètres d'épaisseur). La traction maximale que peut subir le barreau est déterminée par les microfissures les moins résistantes – par exemple celles ayant la plus faible densité de fibres de renfort.

La capacité de l'ECC à dissiper l'énergie par l'ouverture de microfissures le rend particulièrement résistant aux entailles. C'est ce qu'illustrent des tests de traction effectués avec des barreaux préentaillés (voir la figure 3).

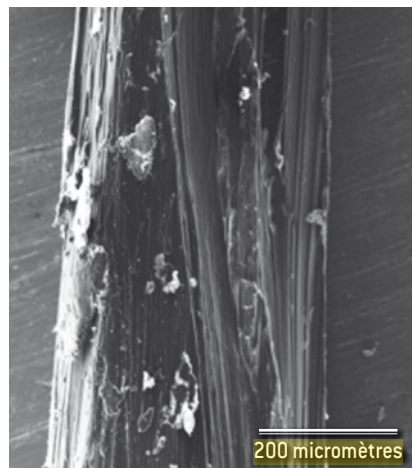
Un intervalle optimal pour la taille des défauts

Puisque les microfissures naissent de défauts préexistants dans le matériau, il est crucial de contrôler la taille de ces défauts. Ils ne doivent pas être trop petits, sinon



4. LE BÉTON FLEXIBLE ECC contient des fibres de polymère, qui établissent des ponts entre les bords des microfissures et empêchent ces dernières de trop s'élargir (à gauche; l'image couvre un champ de cinq millimètres). Les fibres, qui s'abrasent en glissant dans la matrice de ciment, sont de plus en plus liées à cette

matrice à mesure que la fissure s'ouvre, car leur adhérence augmente (à droite, une fibre après le glissement). Dès lors, à partir d'une certaine ouverture, les forces qui s'exercent sur le matériau entraînent plutôt l'ouverture de nouvelles microfissures que l'élargissement des fissures existantes.



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 « autoplacants », 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 matériaux polymères qui permettent de réaliser des bétons autoréparants (ou autotratants). 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.

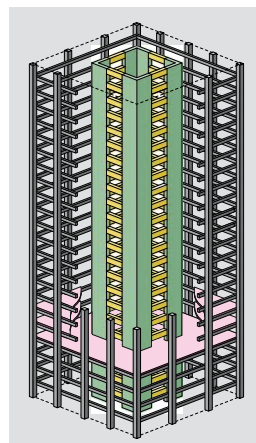
Ces défauts ne doivent être ni trop petits, ni trop grands. S'ils ont une taille excessive, les microfissures se forment trop vite, et la résistance à la traction et à la compression diminue. Il existe donc un intervalle optimal pour la taille des défauts.

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

s'agrandissent démesurément. 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.