

taille des granulats, on diminue aussi celle des défauts qui naissent à l'interface avec le ciment. De façon alternative, on rend cette interface plus dense et plus résistante en ajoutant au béton des microparticules d'oxyde de silice, 100 fois plus petites que les grains du ciment Portland; ces particules influent aussi favorablement sur la chimie à l'œuvre à l'échelle nanométrique. Les défauts du ciment peuvent également être minimisés en compactant la poudre, en diminuant la quantité d'eau à laquelle on la mélange (afin de réduire la taille des pores qui se forment pendant le durcissement du matériau), ou en éliminant les bulles d'air piégées lors de l'application du béton, par exemple grâce à des additifs chimiques.

## Du béton cassant au béton ductile

Bien que de telles techniques augmentent la résistance aux forces de traction et de compression en retardant le déclenchement de fissures, le matériau demeure cassant, et le devient même souvent encore plus. En effet, quand une fissure finit par se propager, une quantité d'énergie supérieure a été accumulée par le matériau et se libère brutalement. Limiter les défauts au lieu d'introduire des mécanismes de dissipation de l'énergie conduit donc à un béton plus résistant (une force supérieure est nécessaire pour le détériorer), mais aussi plus cassant (les détériorations se traduisent plus vite par une rupture totale).

Incorporer au béton un réseau de fibres d'acier, de verre ou de polymère augmente notablement sa résistance. En effet, les fibres accroissent la dissipation d'énergie, notamment par la rupture de liaisons chimiques à leur surface et par le frottement créé lorsqu'elles glissent dans le matériau. Quand elle se produit, la rupture est plus progressive et qualifiée de quasi fragile: le béton peut encore supporter une certaine charge après l'ouverture d'une fissure, tandis qu'en l'absence de fibres, il se brise rapidement. Cependant, les mécanismes de dissipation n'agissent que sur une petite zone proche de l'extrémité de la fissure qui se propage, et le renfort fibré ne fait que réduire la fragilité du béton sans l'éliminer. Jusqu'à récemment, un béton ductile semblait impossible à réaliser.

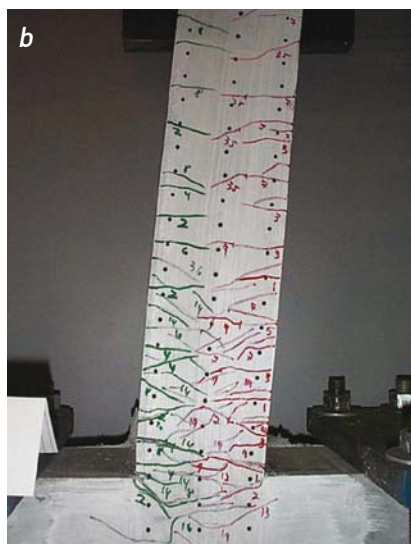
C'est pourtant ce que nous avons accompli durant les deux dernières décen-

### L'AUTEUR



**Victor Li** est professeur de génie civil et environnemental, ainsi que de science et génie des matériaux, à l'Université du Michigan, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de *American Scientist*.



**2. QUAND ON SECOUE** une colonne de béton armé classique pour simuler un tremblement de terre, elle se détériore notablement (a). En revanche, une colonne de béton flexible ECC se fissure davantage (b, lignes marquées en rouge et vert), mais résiste bien mieux.

nies à l'Université du Michigan. Le béton ductile que nous avons développé est nommé ECC (pour *Engineered Cementitious Composite*, c'est-à-dire composite cimentaire conçu par ingénierie). Il se fonde à la fois sur un renfort fibré et sur un contrôle de la taille des défauts. Nous décrirons d'abord ses caractéristiques macroscopiques, avant de détailler les mécanismes mésoscopiques et microscopiques sous-jacents.

Il ne s'agissait pas de rendre le béton aussi flexible que le caoutchouc – ce ne serait plus un bon matériau de construction. Un béton ductile doit être aussi rigide que du béton normal dans les conditions habituelles, mais fléchir et se déformer sans se casser lors de sollicitations extrêmes.

Tous les matériaux ont une limite dite élastique, au-delà de laquelle ils encourent des dommages irréversibles. Lorsque les forces appliquées excèdent cette limite, les matériaux ductiles subissent une déformation « inélastique » (qualifiée de plastique), c'est-à-dire permanente, mais ils ne se brisent pas. Ces matériaux sont donc très résistants. Lorsqu'une force localement très intense s'exerce sur un matériau ductile, elle est redistribuée dans le volume adjacent grâce à l'ouverture de multiples microfissures (voir la figure 3); la propagation d'une fissure majeure susceptible de fracturer le matériau est ainsi évitée.

En laboratoire, la ductilité est quantifiée en utilisant des barreaux, souvent plats, du matériau à caractériser. Des pinces hydrauliques maintiennent les extrémités du barreau, qui est étiré jusqu'à la rupture. On mesure alors son étirement maximal, grâce auquel on quantifie la ductilité du matériau. On trace également une courbe de traction, liant la déformation et la contrainte (la force de traction par unité de surface). Cette courbe caractérise le comportement mécanique du matériau.

## Une déformation plus de 100 fois supérieure à celle du béton ordinaire

Elle montre que le béton ECC s'étire de façon réversible jusqu'à 0,01 pour cent, puis de façon irréversible (mais sans se rompre) jusqu'à 2 à 5 pour cent (voir l'encadré page ci-contre). Le béton ordinaire, lui, se déforme jusqu'à 0,01 pour cent, puis se brise. La capacité de déformation de l'ECC est donc plus de 100 fois supérieure à celle

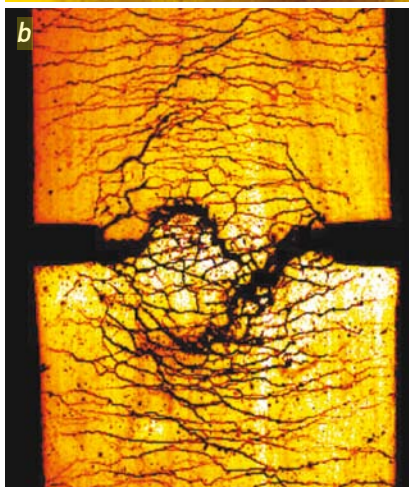
du béton ordinaire : c'est le béton le plus ductile en usage aujourd'hui.

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.

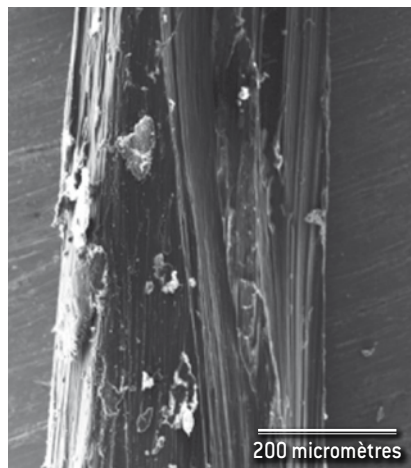
La capacité de l'ECC à dissiper l'énergie par l'ouverture de microfissures le rend particulièrement résistant aux entailles. C'est ce qu'illustrent des tests de traction effectués avec des barreaux préentaillés (voir la figure 3).

## 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.