

de l'eau. L'hydratation (les réactions chimiques avec l'eau) entraîne la formation d'un matériau qui durcit, même dans un environnement humide.

Le béton a connu de fréquentes améliorations. En 1867, Joseph Monier, en France, l'a renforcé avec des barres d'acier: c'est le principe du béton armé. Sa résistance à la compression a été augmentée. D'autres innovations ont amélioré sa qualité et la rapidité de sa mise en place, tout en diminuant le besoin de main-d'œuvre: ainsi, le béton dit autoplaçant, créé dans les années 1990, ne nécessite pas de phase de compactage et d'évacuation des poches d'air après la pose. Depuis peu, on incorpore souvent aux bétons certains sous-produits industriels, tels des cendres issues de centrales à charbon ou des résidus minéraux de la production d'acier.

Pourtant, le béton a encore d'importantes limitations. C'est un matériau cassant,

qui résiste bien à la compression, mais mal à la traction. Bien que les structures en béton ne soient habituellement pas prévues pour être étirées, elles subissent tout de même des forces de traction lorsqu'elles sont fléchies, cisailées (c'est-à-dire soumises à une force parallèle à leur surface), ou légèrement déformées (par exemple quand elles se contractent en séchant). Soumis à ces forces, le matériau devient brusquement moins résistant – voire se brise – dès qu'une fissure se propage.

Certaines techniques permettent de surmonter ces limitations, telle l'addition de renforts en acier. Malgré tout, les structures en béton restent fragiles et connaissent parfois des ruptures catastrophiques, notamment lors de tremblements de terre. Celui qui a frappé la province chinoise du Sichuan, en 2008, a provoqué l'effondrement de nombreuses structures en béton et la mort de 69 000 personnes. En 2011, suite au tremblement de terre et

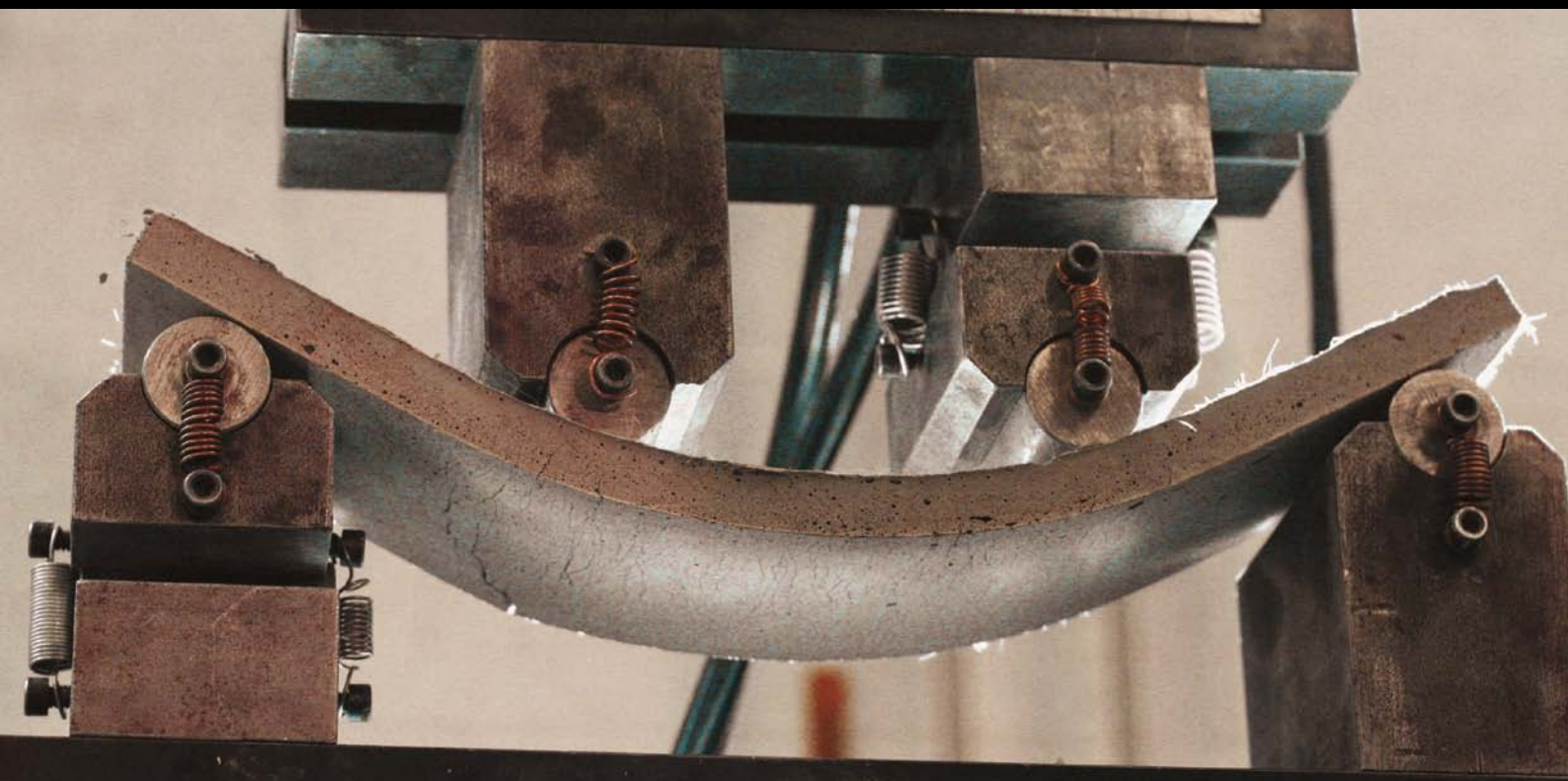
au tsunami qui ont touché le Japon, une fissure longue de 20 centimètres a percé une structure en béton de la centrale nucléaire de Fukushima, entraînant une fuite d'eau radioactive dans l'océan Pacifique.

Outre des ruptures catastrophiques, les infrastructures en béton subissent aussi des détériorations sous des conditions normales, avec des conséquences économiques, sociales et environnementales. La fragilité du matériau contraint à combler sans cesse les fractures, une pratique peu écologique. Aux États-Unis, on estime à près de 1 700 milliards d'euros les investissements nécessaires à la

1. LE BÉTON EST UN MATÉRIAU CASSANT, et c'est pourquoi les tremblements de terre ont des effets dévastateurs sur les infrastructures (page ci-contre). On cherche à le rendre plus flexible, pour qu'il plie sans se rompre lors de sollicitations extrêmes (ci-dessous, un test sur un béton flexible nommé ECC).

Victor Li

Les infrastructures en béton se détériorent vite et sont vulnérables aux tremblements de terre. Pour y remédier, les ingénieurs développent des bétons flexibles.



rénovation des infrastructures civiles, et à 4,2 milliards d'heures par an le temps perdu par les automobilistes dans les bouchons – souvent liés aux travaux de réfection des routes. À l'échelle de la planète, la fabrication du ciment nécessaire au béton est responsable de cinq pour cent des émissions humaines de dioxyde de carbone et contribue donc notablement au réchauffement climatique.

Aux origines de la fragilité

Ainsi, malgré les nombreux progrès, la fragilité du béton demeure problématique. Elle compromet la sécurité, la durabilité et la pérennité économique de son exploitation. La question suivante se pose alors : le béton peut-il être rendu ductile plutôt que fragile ? En d'autres termes, peut-

on élaborer un béton qui, soumis à une contrainte trop intense, se déformerait sans se rompre ?

Avant d'y répondre, examinons pourquoi le béton est cassant. Lorsqu'une force s'applique sur la structure, les fissures se développent à partir de défauts préexistants. Les défauts du béton sont variés. Certains sont des irrégularités à l'interface des granulats et du ciment, zone plus poreuse et plus riche en cristaux d'hydroxyde de calcium fragiles que le cœur du ciment lui-même. Les défauts peuvent aussi être des bulles d'air ou de petites fissures préexistantes (liées par exemple au vieillissement des grains, qui rétrécissent et provoquent un réarrangement du réseau).

Comme il n'existe dans le béton aucun mécanisme de dissipation de l'énergie différent de la propagation de fissures, ces dernières deviennent instables, se

transforment en fractures béantes et dégradent les propriétés mécaniques du matériau. L'acier, en revanche, présente un mécanisme alternatif de dissipation : des dislocations (d'infimes irrégularités du réseau cristallin) se propagent grâce à un réarrangement des liaisons atomiques et entraînent une déformation du matériau. En conséquence, la résistance de l'acier est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle du béton. Même quand une fissure se crée à partir d'un défaut dans l'acier, les mouvements des dislocations alentour l'empêchent souvent de se propager. C'est l'absence d'un mécanisme de ce type dans le béton qui le rend cassant, un peu comme du verre.

Au cours des dernières décennies, de nombreux travaux visant à rendre le béton plus résistant ont consisté à réduire les défauts préexistants. En diminuant la

ÉTIRER LE MATÉRIAU POUR DÉTERMINER SES PROPRIÉTÉS

Pour caractériser les propriétés mécaniques d'un matériau, on étire un échantillon jusqu'à la rupture grâce à une machine. On trace ensuite la courbe de traction (*ci-dessous*, à gauche), qui représente la contrainte supportée (la force par unité de surface) et l'allongement correspondant (en pour cent de la longueur totale). Cette courbe est indépendante des dimensions de l'échantillon.

Celle de l'ECC, le béton flexible élaboré par l'équipe de l'auteur, présente trois régimes principaux : la déformation élastique (DE), le régime de transition (TR) et la déformation plastique (DP). Durant

le premier, le matériau retrouve sa forme quand on supprime la force de traction. Ainsi, l'ECC peut se déformer de 0,01 pour cent sans conséquence à long terme. Dans le régime de transition, la rigidité (égale à la pente de la courbe de traction, et qui caractérise donc le supplément de force à appliquer pour augmenter la déformation) diminue progressivement. Dans le régime de déformation plastique, le matériau s'allonge de façon inélastique, c'est-à-dire permanente ; la rigidité, faible, reste constante et la dureté augmente.

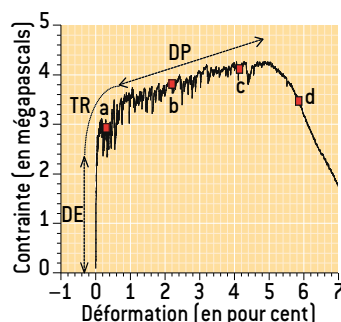
Dans ces deux derniers régimes, la courbe présente de multiples

soubresauts, dus à l'ouverture de microfissures. Celles-ci permettent au matériau de dissiper l'énergie de traction.

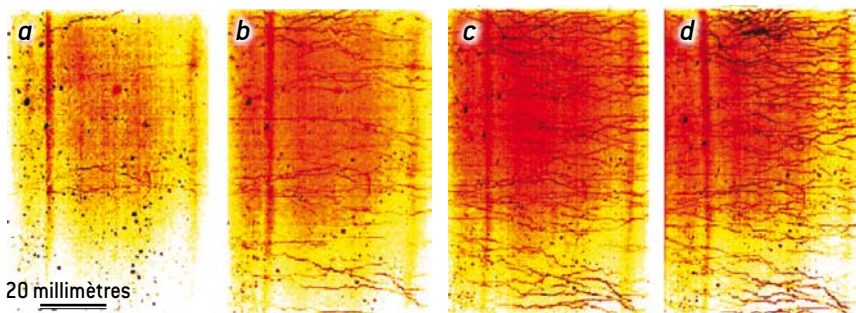
Quand la force et l'allongement dépassent les limites du régime de déformation plastique (environ deux à cinq pour cent de déformation selon la version de l'ECC), une ou plusieurs fractures importantes s'ouvrent, d'où une perte de capacité de charge : une force qui s'applique sur le matériau, même plus faible qu'auparavant, le déforme beaucoup, voire le brise. La première fissure n'est pas nécessairement celle qui cause la rupture finale. Les photographies en

fausses couleurs de l'échantillon d'ECC (*ci-dessous*) montrent la fissuration pour les différents régimes (les points correspondants sont représentés sur la courbe de traction).

Un béton ordinaire, même renforcé par des fibres, ne présente qu'un seul régime, celui de déformation élastique. Au-delà, il casse directement. Cela se produit à environ 0,01 pour cent de déformation. L'ECC, qui peut s'allonger jusqu'à deux à cinq pour cent sans se briser grâce au régime de déformation plastique, a donc une capacité de déformation supérieure de deux ordres de grandeur. C'est l'origine de sa résistance.



LA COURBE DE TRACTION D'UN MATÉRIAU relie la force qui lui est appliquée à la déformation engendrée. Celle de l'ECC (*à gauche*) présente trois régimes : la déformation élastique (DE), le régime de transition (TR) et la déformation plastique (DP). À mesure que la force et la déformation augmentent, des microfis-



sures s'ouvrent dans le matériau (*à droite*, pour différents points de la courbe). Au-delà du régime de déformation plastique, certaines fissures finissent par s'élargir au point que le matériau devient incapable de supporter des forces intenses sans se déformer notablement, voire se briser.