

Autre surprise, la valeur de la constante de Hubble, qui indique la vitesse d'expansion de l'Univers, obtenue par l'équipe de *Planck* est plus basse, 67,8 kilomètres par seconde et par mégaparsec, mais néanmoins compatible avec celles déduites d'à peu près toutes les autres observations. Quand on combine les données de *Planck* à ces valeurs plus élevées de la constante de Hubble, on obtient des résultats étranges. Par exemple, les propriétés de l'énergie sombre suggèrent que sa densité augmente avec le temps, contrairement à l'analyse avec les données de *Planck* seul. Autrement dit, l'expansion de l'Univers accélérerait de plus en plus et précipiterait l'Univers vers une fin cataclysmique... La confiance à accorder à ce résultat reste à évaluer. En tout état de cause, la précision des données de *Planck* est précieuse: en poussant à l'extrême les

Si les données de *Planck* présentent des écarts avec certaines observations, d'autres tests confirment les résultats de *Planck*. Par exemple, la nucléosynthèse primordiale décrit la production d'hydrogène et d'hélium dans l'Univers primordial. L'étude du fond diffus permet de calculer les concentrations de ces éléments, avec des résultats compatibles avec les observations.

Par ailleurs, la distribution de matière dans l'Univers influe sur la carte des fluctuations. En effet, la lumière du fond diffus est déviée de sa trajectoire lorsqu'elle passe à proximité d'une grande densité de matière, à cause des effets de courbure de l'espace suivant les lois de la relativité générale. Il est possible de déduire de cette carte la

Un certain type de polarisation pourrait révéler que la naissance des fluctuations de densité que nous observons a été accompagnée de celle d'ondes gravitationnelles, sorte de rides de l'espace-temps se propageant au sein de celui-ci à la vitesse de la lumière. Ces ondes gravitationnelles, dont il n'est malheureusement pas possible de prédire l'amplitude, seraient un test pour l'inflation. La suite de l'analyse des données par l'équipe de *Planck* pourrait ainsi mettre un point final au modèle de l'inflation. ■

Cosmologie 51

Du béton FLEXIBLE

Le béton est le matériau de construction le plus utilisé des sociétés modernes. Au cours des XIX^e et XX^e siècles, son usage s'est répandu pour nombre d'infrastructures : bâtiments, routes, barrages... La quantité de béton produite en 2012 est estimée à 12 milliards de tonnes, soit deux tonnes par an et par être humain. La plus haute construction (828 mètres) et le plus long pont (165 kilomètres) du monde, respectivement la tour Burj Khalifa, à Dubaï, et le pont reliant Danyang et Kunshan, en Chine, sont en béton.

Constitué de granulats (sable, graviers) maintenus par un liant, l'usage du béton s'est répandu après l'invention du ciment dit de Portland (en raison de sa couleur similaire à la roche de Portland, qui a notamment servi à la construction du palais de

L'ESSENTIEL

- Un type de béton à la fois flexible et résistant a été élaboré.
- Ces propriétés sont obtenues en contrôlant la taille des imperfections dans le béton et en renforçant ce dernier par des fibres spéciales.
- Ce béton flexible a été utilisé pour diverses infrastructures, tels des bâtiments et des ponts.

Buckingham) par le maçon britannique Joseph Aspdin en 1824. Ce ciment est le liant le plus utilisé aujourd'hui. Sa fabrication, donc celle du béton, consomme beaucoup d'énergie. On confectionne le ciment en broyant du calcaire (qui contient du calcium) et de l'argile (renfermant de la silice), puis en chauffant la poudre résultante à une température comprise entre 1 400 °C et 1 600 °C. Les grains résultants, nommés clinker, sont ensuite broyés et mélangés avec d'autres éléments en plus faible proportion. Le ciment de Portland contient deux types de silicate de calcium, l'alite ($\text{CaO}_3(\text{SiO}_2)$) et le belite Ca_2SiO_4 , qui assurent respectivement la résistance du béton dès le début du durcissement et sa longévité.

Pour obtenir le béton, on mélange le ciment avec les granulats, puis on ajoute

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

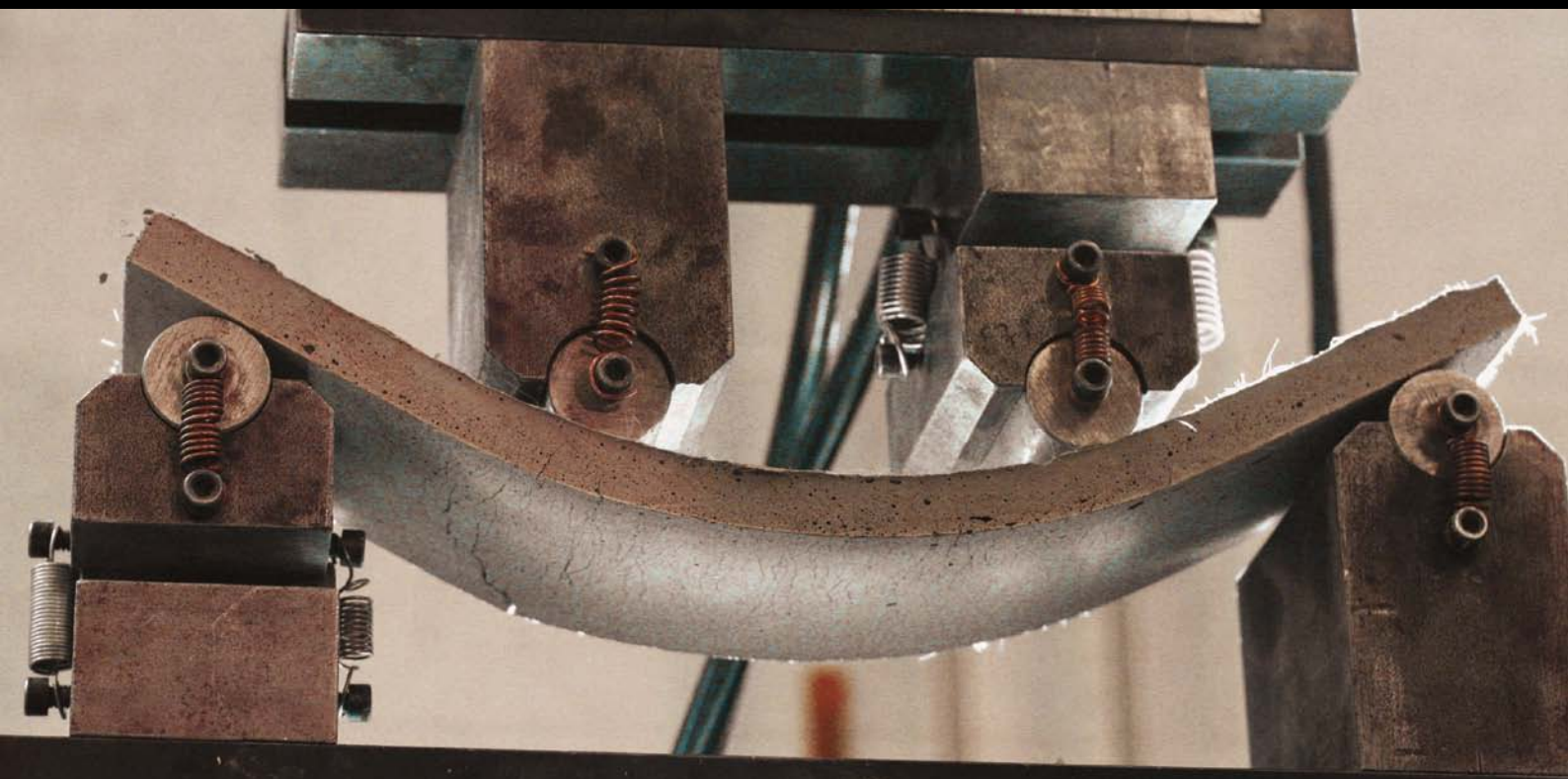
au tsunami qui ont touché le Japon, une fissure longue de 20 centimètres a percé une structure en béton de la centrale nucléaire de Fukushima, entraînant une fuite d'eau radioactive dans l'océan Pacifique.

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 en 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.

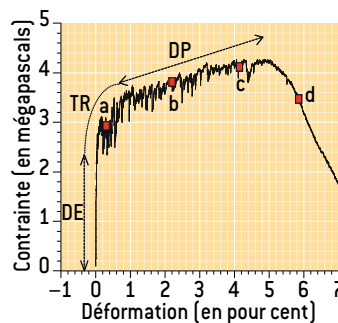
Dans ces deux derniers régimes, la courbe présente de multiples

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

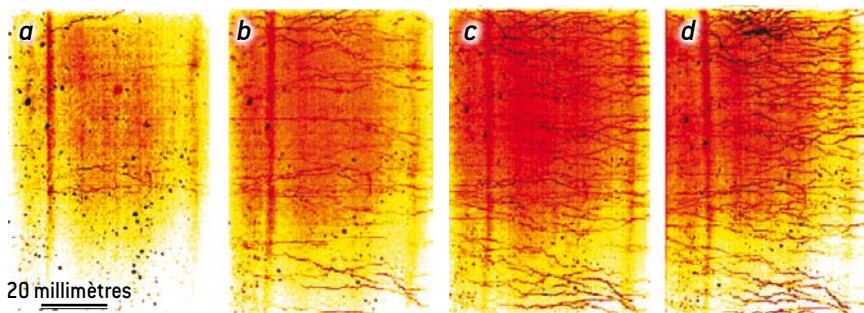
Quand la force et l'allongement dépassent les limites du régime de déformation plastique (environ deux à cinq pour cent de déformation selon la version de l'ECC), une ou plusieurs fractures importantes s'ouvrent, d'où une perte de capacité de charge : une force qui s'applique sur le matériau, même plus 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.

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.

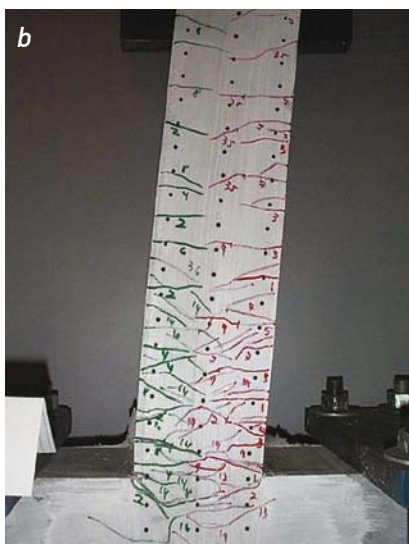
C'est pourtant ce que nous avons accompli durant les deux dernières décen-

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

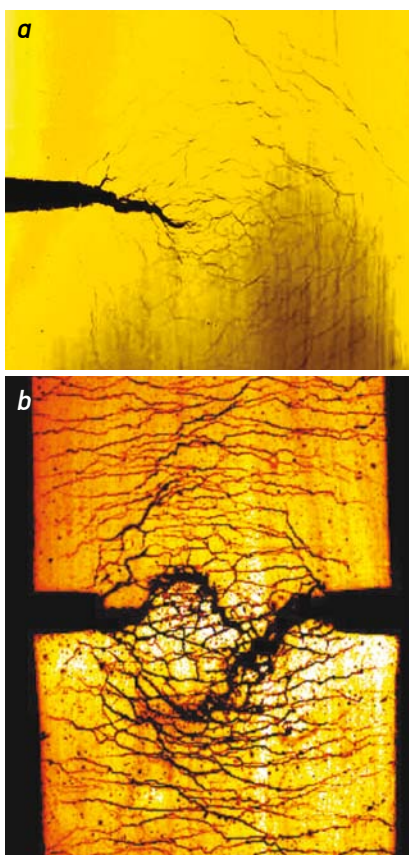
du béton ordinaire: c'est le béton le plus ductile en usage aujourd'hui.

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.

