

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.

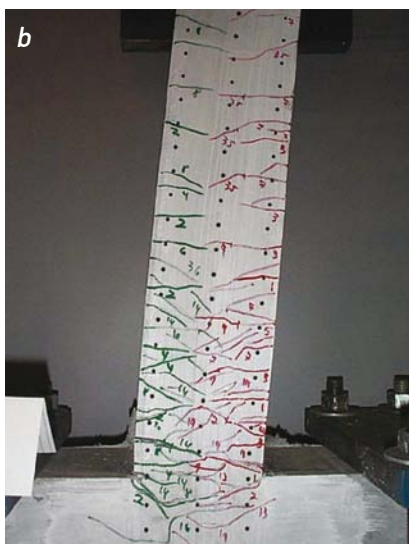
C'est pourtant ce que nous avons accompli durant les deux dernières décen-

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

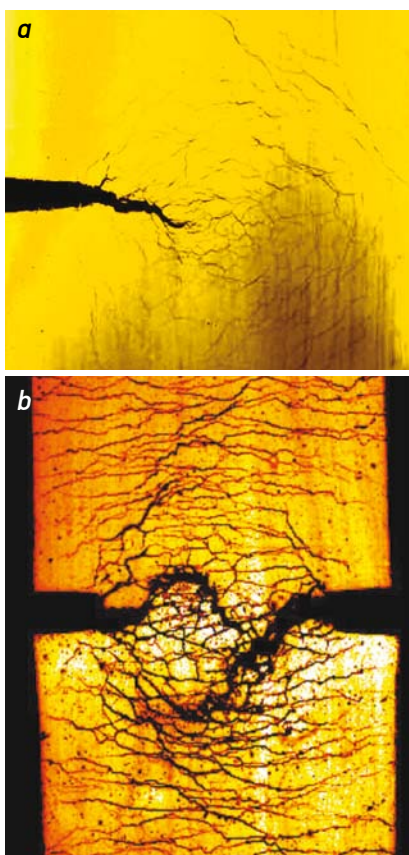
du béton ordinaire: c'est le béton le plus ductile en usage aujourd'hui.

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).

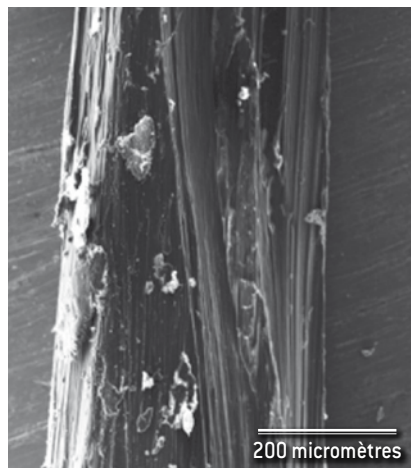
Un intervalle optimal pour la taille des défauts

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.



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 matériaux polymères qui permettent de réaliser des bétons autoréparants (ou autotraitants). 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.

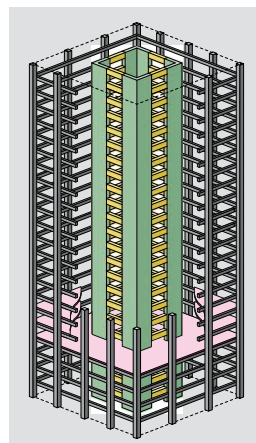
Ces défauts ne doivent être ni trop petits, ni trop grands. S'ils ont une taille excessive, les microfissures se forment trop vite, et la résistance à la traction et à la compression diminue. Il existe donc un intervalle optimal pour la taille des défauts.

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

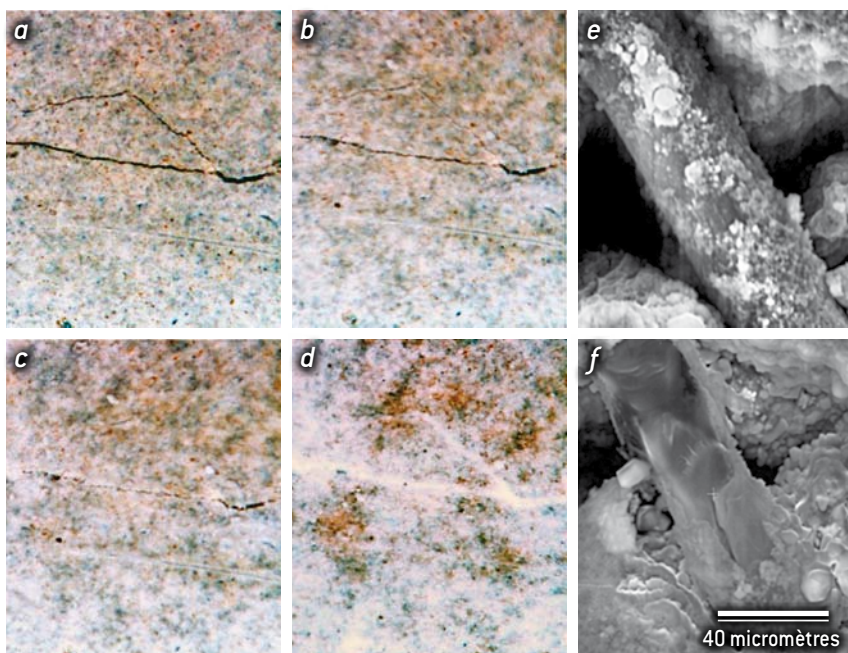
s'agrandissent démesurément. Lorsqu'une microfissure s'ouvre, les fibres forment une « couture » entre les deux bords et supportent une grande partie des forces exercées sur le matériau (voir la figure 4). Souvent polymérisées à partir d'alcool polyvinylique (APV), elles sont de faible diamètre (environ 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.



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 dégènera 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 détacher 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 polyvinylique, 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.

polyvinylique 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 mesurer 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

fissures se sont refermées toutes seules (voir la figure 6). L'analyse au microscope électronique à balayage a révélé que des composés solides se sont formés sur les bords de la fissure et sur la fibre qui la traverse. Ces composés sont constitués d'un mélange de silicate de calcium hydraté et de bicarbonate de calcium. Ils se sont formés lorsque l'eau et l'air (chargé en dioxyde de carbone) ont pénétré dans les fissures et ont réagi avec les ions calcium de l'ECC. Ils ont fini par sceller la microfissure. Comme ces composés se développent autour de la fibre, celle-ci renforce le matériau de réparation. Les mesures montrent que l'ECC récupère alors ses propriétés mécaniques, notamment sa résistance et sa ductilité.

Du béton intelligent

L'autodétection pourrait être réalisée au moyen de la tomographie par impédance électrique, une piste explorée par l'équipe de Jerome Lynch, à l'Université du Michigan. Cette technique consiste à faire circuler

de faibles courants dans le matériau (ils se propagent dans le béton grâce à des mouvements d'ions entre les pores du ciment), puis à mesurer les variations de résistivité. En perturbant le flux d'ions, une microfissure augmente localement la résistivité. On dresse alors des cartes où les microfissures apparaissent comme les lignes de plus grande résistivité. Cette technique doit encore être améliorée, mais elle pourrait fournir un moyen de contrôle bon marché : on pourrait surveiller en permanence, sans l'aide de dispositifs externes, l'état d'une structure dotée des électrodes et des capteurs adéquats.

Ces fonctions d'autodétection et d'autoréparation peuvent être combinées : tandis que les dommages s'autoréparent, leur profondeur, et donc le degré de récupération, est mesurée en continu. Ainsi, le béton du futur ne sera pas seulement ductile, mais aussi intelligent. Il aidera à réaliser des infrastructures plus sûres et plus durables, avec une empreinte carbone et énergétique plus faible. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

V. C. Li et E. Herbert, **Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure**, *Journal of Advanced Concrete Technology*, vol. 10, pp. 207-218, 2012.

V. C. Li, **Tayloring ECC for special attributes: A review**, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, vol. 6, pp. 135-144, 2012.

M. Sahmaran et V. C. Li, **Engineered cementitious composites: Can composites be accepted as crack-free concrete?**, *Transportation Research Record*, vol. 2164, pp. 1-8, 2010.

T. Hou et J. P. Lynch, **Electrical impedance tomographic methods [...]**, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 20, pp. 1363-1379, 2009.



Palais
DÉCOUVERTE



les conférences

au Palais de la découverte

entrée gratuite (réservation conseillée: conferences@universcience.fr)

mercredi 29 mai à 19h

Les Martiens à six membres de « John Carter » sont-ils plausibles ?

Pourquoi ne trouve-t-on pas d'animaux à trois pattes, alors que c'est la configuration la plus stable ? Et vous, comment imaginez-vous la forme d'un extraterrestre ?

Avec les auteurs de la rubrique « Science & Fiction » de la revue *Pour la science* : Roland Lehoucq et Sébastien Steyer.

programme complet sur
www.universcience.fr

Avec le soutien de






plus

La fusion des SENS

Lawrence Rosenblum

**Ce que nous entendons dépend notablement
de ce que nous voyons et ressentons. Pourtant,
l'intégration de toutes ces perceptions au sein du cerveau
livre une version cohérente du monde environnant.**

À la fin des années 1970, le FBI engagea Sue Thomas et huit autres personnes sourdes pour analyser des empreintes digitales. On les supposait plus aptes à se concentrer sur cette tâche méticuleuse. Cependant, S. Thomas trouva ce travail d'une monotonie insupportable. Les agents du FBI, qui avaient remarqué son habileté à lire sur leurs lèvres, lui confièrent une autre tâche : ils lui montrèrent une vidéo muette, où deux suspects discutaient, et lui demandèrent de reconstituer leur conversation. S. Thomas s'en acquitta facilement, révélant l'implication des suspects dans des cercles de jeux clandestins. Ainsi débuta sa carrière en tant que premier expert – sourd – de lecture sur les lèvres du FBI.

Chez S. Thomas, cette compétence était particulièrement développée, car elle lui était nécessaire pour communiquer, mais nous l'utilisons tous plus ou moins. De fait, nous associons les mots lus sur les lèvres à ceux entendus, et nous comprenons moins bien notre interlocuteur quand nous ne

L'ESSENTIEL

- On pensait auparavant que les aires cérébrales consacrées aux différents sens (la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût et le toucher) interagissaient peu.
- Au cours des 30 dernières années, on s'est aperçu que le cerveau mêle les informations issues de sens distincts.
- Ces recherches ont inspiré de nouveaux moyens d'aider les aveugles et les sourds, et ont contribué à améliorer les logiciels de reconnaissance vocale.

voyons pas ses lèvres, en particulier s'il a un accent inconnu ou si l'environnement est bruyant. Voir parler aide aussi à apprendre à parler. Ainsi, cet apprentissage est souvent plus long chez les enfants aveugles. Les recherches récentes ont éclairé la façon dont le cerveau organise les informations reçues des différents sens.

Autrefois, le cerveau était vu comme un couteau suisse, où chaque sens aurait une région dédiée. La plupart des neuroscientifiques et des psychologues pensent aujourd'hui que l'évolution a conduit à des échanges importants entre les sens – autrement dit, à des aires sensorielles « entrelacées » physiquement dans le cerveau. Ainsi, bien que le cortex visuel traite essentiellement la vue, il peut aussi être influencé par d'autres informations sensorielles, issues par exemple du toucher. Les chercheurs peuvent changer les résultats de tests de goût en modifiant ce que les sujets entendent. L'endroit où nous regardons et ce que nous voyons influent sur notre posture.