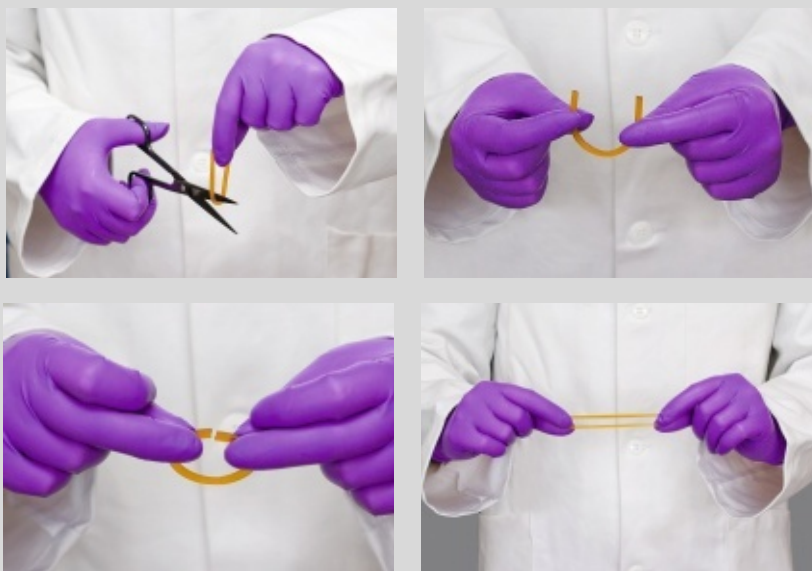




pratiquement équivalente à celle de l'endommagement par le projectile.

Idéalement, un matériau autocicatrisant devrait se réparer aussi vite que se produisent les dégâts. La plupart des matériaux autocicatrisants n'en sont pas encore là. L'efficacité de la réparation peut être calculée en termes de rapport des propriétés du matériau cicatrisé sur les propriétés du matériau initial. On cherche à obtenir une efficacité de cicatrisation de 100 pour cent, et chaque approche peut se prévaloir d'au moins un exemple où cet objectif est atteint. Les efficacités rapportées pour différents matériaux vont de 21 pour cent à plus de 100 pour cent (cas où les zones réparées sont plus solides que le matériau initial).

Retrouver la qualité initiale du matériau

Pour tester la récupération des fractures dans des conditions contrôlées, des échantillons de matériaux sont soumis à toutes sortes d'impacts, de torsions, de tractions et de déchirures. En 2001, notre équipe a fait la démonstration de la première autocicatrisation réussie dans un époxyde avec un système à base de capsules, qui avait recouvré à 75 pour cent les propriétés d'origine du matériau. Nous avons également trouvé que des microcapsules pouvaient augmenter la résistance d'un époxyde non endommagé, parce que les billes absorbent

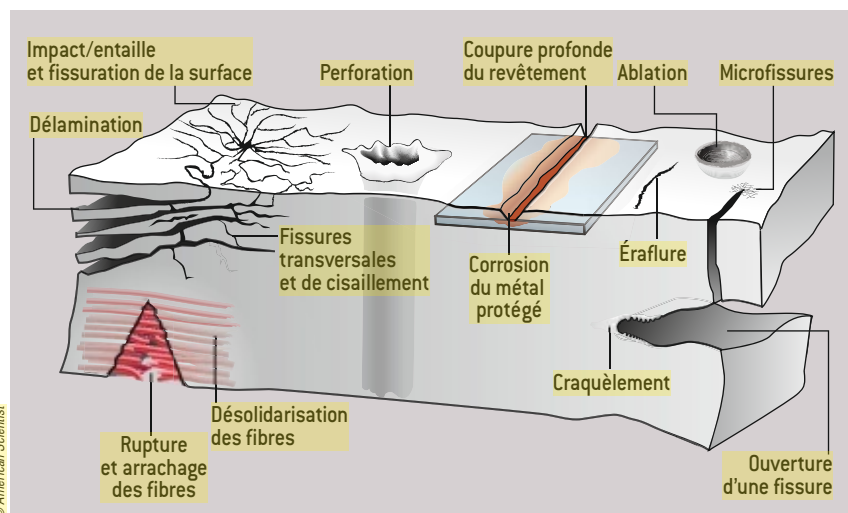
l'énergie des fissures en formation, ce qui limite leur développement.

Avec des composites renforcés par des fibres, nous avons constaté qu'en incorporant des microcapsules plus grosses que les fibres de renfort, on épaissit les régions où les couches du matériau sont laminées ensemble, ce qui diminue dans un premier temps la résistance à la fracture. Mais après 48 heures de cicatrisation à température ambiante, des échantillons préalablement fracturés présentaient une efficacité de réparation d'environ 40 pour cent, et cette valeur

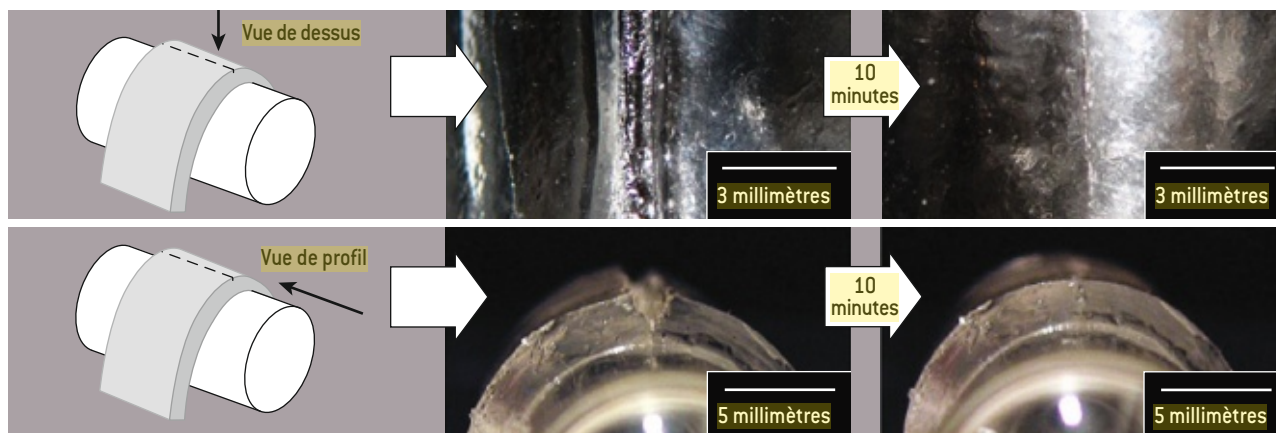
grimpeait à 80 pour cent quand les échantillons étaient traités à 80 °C. La récupération complète de la solidité de ces matériaux semble limitée dans les cas où peu de fibres traversent la zone endommagée et où les agents cicatrisants sont inégalement répartis dans le plan de la fracture.

Un autre test sur les fractures qui s'autoréparent consiste à couper physiquement la surface d'un échantillon du matériau, puis à évaluer optiquement à la fois les dégâts d'abrasion et la fermeture de la fissure. Dans plusieurs études, les chercheurs ont coupé des polymères à autocicatrisation intrinsèque avec une lame de rasoir et les ont réparés en accolant les deux morceaux durant une dizaine de minutes à température ambiante. Les échantillons réparés étaient tordus ou déformés pour s'assurer de la non-réouverture des fissures. Les échantillons étaient parfois déchirés plutôt que coupés, avec des résultats similaires.

La fatigue des matériaux, mode d'endommagement courant, a été peu étudiée sur les systèmes autocicatrisants. Notre équipe et d'autres ont examiné la relation entre la vitesse d'endommagement, la vitesse de cicatrisation et l'allongement de la durée de vie de ces systèmes. Quand la vitesse d'endommagement est supérieure à la vitesse de cicatrisation, les détériorations s'accumulent et le matériau finit par se rompre. Pour éviter cela, des réactions chimiques plus rapides ou des périodes de repos plus longues peuvent être nécessaires pour le matériau. Toutefois, quand la



5. DIFFÉRENTS TYPES DE DOMMAGES peuvent nécessiter des systèmes distincts, ou même une combinaison de systèmes, pour obtenir une cicatrisation optimale. Les entailles, les impacts, l'exposition à des environnements corrosifs, les perforations balistiques, les rayures et la fatigue mécanique peuvent conduire à ces divers modes d'endommagement.



Images tirées de M. Yamaguchi et al., *Materials Letters* 61:1396, avec la permission d'Elsevier.

6. ON TESTE UN POLYMÈRE À AUTOCICATRISATION INTRINSÈQUE en coupant sa surface et en l'étirant au-dessus d'un cylindre (à gauche) afin de visualiser les dommages (au milieu). Dix minutes plus tard, on

constate que grâce à la diffusion moléculaire et au réenchevêtrement des chaînes polymériques restées ballantes au niveau de la coupure, la surface s'est autoréparée (à droite).

vitesse d'endommagement et la vitesse de cicatrisation sont équilibrées, la durée de vie du matériau s'allonge notablement.

Les impacts d'objets ou de fragments matériels constituent une autre forme d'endommagement. Jusqu'à présent, les essais ont mis l'accent sur la mesure de la restauration de la résistance à la compression après un impact à faible vitesse. Nos collègues de l'Université de Bristol ont ainsi testé de l'époxyde renforcé par des fibres de carbone avec un réseau de fibres de verre creuses remplies d'un agent cicatrisant. Ce matériau a été soumis à des impacts de différentes énergies, allant jusqu'à trois joules. Les chercheurs ont montré que le système à fibres creuses absorbe une partie notable de l'énergie en se fracturant lors de l'impact, ce qui augmente de 13 pour cent la résistance à la compression. L'application de températures élevées permettait une réparation significative des dégâts, mais l'étude a aussi montré que cela dépend beaucoup de l'uniformité du réseau vasculaire.

Les études d'endommagement par impact sur la cicatrisation à base de capsules ont donné des résultats mitigés. Une équipe de l'Université de Zhongshan, en Chine, a testé des matériaux composites renforcés par des fibres de verre tissées avec des énergies d'impact allant de 1,5 à 3,5 joules; ils ont trouvé des efficacités de cicatrisation proches de 100 pour cent pour les impacts à 1,5 joule, mais de 20 pour cent seulement pour les impacts à 3,5 joules. Cependant, quand notre équipe a testé un matériau similaire à des énergies d'impact de 13 à 45 joules, et malgré une fissuration importante de l'échantillon, les

efficacités de cicatrisation avoisinaient les 100 pour cent pour les impacts allant jusqu'à 20 joules; au-delà, elles diminuaient.

Notre équipe a également testé la capacité d'autocicatrisation de membranes jouant le rôle de barrière vis-à-vis d'un fluide. Nous avons par exemple examiné des membranes dans lesquelles un système de cicatrisation à microcapsules était pris en sandwich entre deux couches de nylon recouvertes d'époxyde. Nous perforions les membranes avec des seringues et observions le résultat 24 heures après. L'efficacité avec laquelle les trous se refermaient allait de 40 à 100 pour cent, selon la taille et la concentration des microcapsules.

Longévité et sûreté accrues, coûts réduits

Les revêtements anticorrosion, destinés à protéger des pièces métalliques devant fonctionner dans des environnements humides ou salés, sont une autre application potentielle des systèmes autocicatrisants. Plusieurs équipes ont testé avec succès des revêtements à base de capsules contenant de l'huile. Les systèmes à cicatrisation intrinsèque sont particulièrement adaptés, car ils privilégient la réparation des petits défauts.

Malgré les grands progrès réalisés sur les matériaux autocicatrisants, plusieurs défis restent à relever. En particulier, comment ces matériaux se comporteront-ils en cas d'exposition durable à des environnements agressifs? La plupart des travaux se sont jusqu'ici bornés à étudier la réaction de ces matériaux à des fractures statiques, et n'ont pas étudié les aspects

dynamiques de l'autocicatrisation dans des conditions de fatigue.

Par ailleurs, pour que le concept d'autocicatrisation s'impose, il faudra aboutir à des applications commerciales. Cela commencera probablement par les revêtements, qui ne nécessitent que des performances mécaniques modestes, comparées à celles des éléments plus massifs.

L'autocicatrisation pourrait aussi concerner des propriétés autres que mécaniques. Par exemple, une restauration spontanée de la conductivité électrique serait intéressante dans les domaines de la microélectronique et du stockage de l'énergie. Plusieurs équipes, dont la nôtre, ont obtenu des résultats encourageants dans cette direction.

La restauration de propriétés optiques est une autre voie de recherche prometteuse. Dans un matériau transparent, les fissures diffusent la lumière et perturbent la transparence. Un système autocicatrisant qui réparerait la fissure en la comblant avec un polymère de même indice optique que le matériau permettrait d'atténuer cet effet indésirable.

Quels que soient les matériaux utilisés, la mise en œuvre du concept d'autocicatrisation devrait améliorer la sécurité des dispositifs technologiques, prolonger leur durée d'utilisation, diminuer les coûts d'entretien. Des piles et des circuits électroniques autoréparants et donc plus sûrs, des revêtements pour automobiles ne craignant pas les rayures, des pneus qui se referment en cas de fissuration ou de crevaisson, des tissus résistant à la décoloration, etc.: les perspectives qu'ouvre l'autocicatrisation sont innombrables. ■

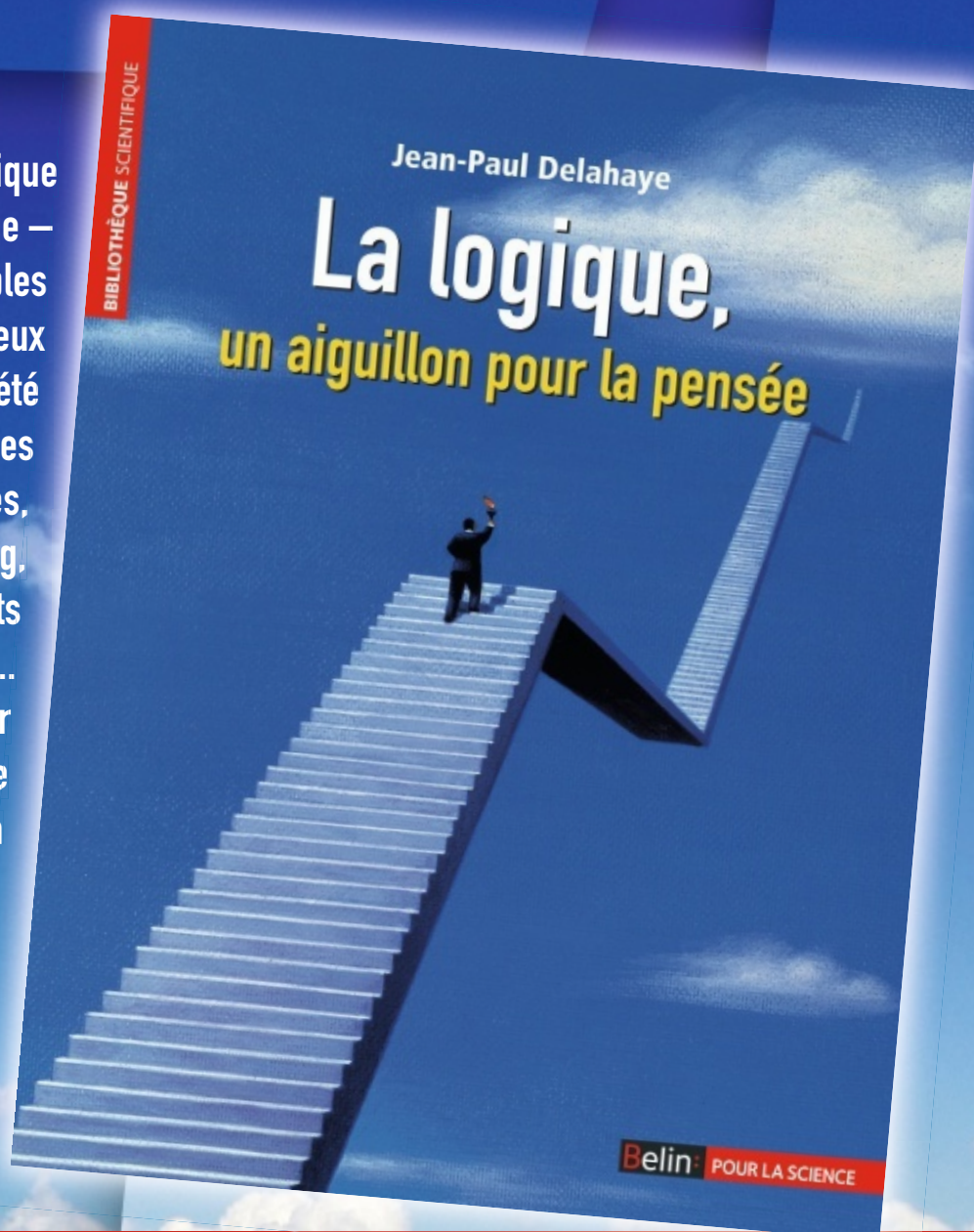
La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye

La logique
— prise au sens large —
a connu d'incroyables
progrès depuis deux
siècles : l'infinie variété
des infinis, les étranges
hyperensembles,
l'indécidabilité de Turing,
les déconcertants
paradoxes probabilistes...

Cet ouvrage sur
la logique moderne
des sciences intéressera
autant mathématiciens
que philosophes et curieux,
intrigués par le monde
abstrait des raisonnements !

Éditions Belin/Pour la Science 2012
200 pages — 27 euros — ISBN 978-2-8424-5115-8



Disponible en librairie et sur www.pourlascience.fr/librairie