

Pourquoi les objets se cassent-ils?

MARK EBERHART

Depuis près d'un siècle, les physiciens utilisent la théorie des liaisons chimiques pour prévoir quand un solide se brise ou se déforme.

Aujourd'hui, on calcule même le type de dégradation qui se produira.

Un objet qui se brise ou qui se tord est une petite catastrophe. Pour moi, au contraire, c'est un plaisir : en regardant du verre brisé, je me surprends à assembler mentalement les morceaux, à la recherche de l'origine de la fracture ; devant un vieil arbre, j' imagine comment sa croissance a lentement déplacé la clôture en fer voisine. Je n'ai pas un goût pervers de la destruction, mais je cherche à savoir quand les matériaux sont fragiles et cassent facilement, comme le verre, ou sont ductiles et nécessitent plus d'énergie pour se bri-

ser, comme le fer. Les objets que nous utilisons ne sont-ils pas tous soumis à des contraintes ?

Nombre de techniques sont fondées sur l'utilisation de la dégradation des matériaux. C'est en manipulant des roches cassantes, comme le silex, que l'homme est entré dans la première période technique de l'humanité, l'âge de pierre, il y a environ 2,5 millions d'années. Plus récemment, il y a 5 000 ans, la découverte de substances peu fragiles, comme l'or et le cuivre, a mené l'humanité à l'âge du métal. Les anciens artisans ont utilisé ces métaux malléables pour fabriquer des bijoux et d'autres ornements, car ils

pouvaient être facilement étirés ou martelés. En revanche, bien que ces matériaux soient tenaces et capables d'absorber des quantités d'énergie considérables lors de leur déformation, ils ont une courte durée de vie quand on les utilise pour couper ou pour gratter.

Les matériaux des épées ou des gratte-ciel doivent être suffisamment durs pour conserver leur forme sous l'effort, suffisamment résistants

pour ne pas se briser. C'est pourquoi les métaux sont omniprésents dans notre civilisation. Les outils et les armes de pierre sont devenus obsolètes le jour où les métallurgistes ont appris qu'en mélangeant du cuivre et de l'étain, par exemple, ils obtenaient du bronze, plus résistant à la rupture.

Les alliages de carbone et de fer sont plus durs encore que le bronze ; ils sont apparus 1 000 ans avant notre ère, lorsque les métallurgistes inventèrent des fourneaux qui chauffaient suffisamment pour extraire le fer de son minerai. Bien qu'ils soient durs, les alliages de fer et de carbone sont fragiles : ils n'absorbent que peu d'énergie avant de se casser. Plus récemment, les métallurgistes ont appris qu'en soufflant de l'air dans ce mélange on réduit la quantité de carbone, d'où un produit plus ductile : l'acier ! Enfin, les métallurgistes ont appris à créer des matériaux plus ou moins ductiles ou cassants, à volonté.

Le défaut fatal

Bien que ce lien entre technique et comportement des matériaux soit très ancien, la science n'a élucidé les mécanismes de la rupture qu'au cours du XX^e siècle. Même aujourd'hui, de nombreux mécanismes élémentaires de la rupture restent mystérieux. On ne comprend pas, par exemple, pourquoi trois

1. LES BALLES ET LES BATTES ne se cassent pas lorsqu'elles se heurtent, parce qu'elles absorbent l'énergie de la collision. En revanche, une vitre éclate en morceaux quand elle est soumise à un choc. Le comportement des objets soumis à des contraintes dépend des liaisons chimiques entre leurs atomes.

atomes d'hydrogène par million d'atomes de fer suffisent à rendre l'acier dangereusement fragile. Afin de répondre aux questions de ce type, j'utilise la chimie moléculaire et je modélise la rupture des matériaux. J'espérais ini-

tialement concevoir des matériaux qui se briseraient exactement comme prévu : je devais d'abord comprendre la nature de la rupture des liaisons chimiques.

Au début du siècle, les chimistes ont compris que les solides sont des groupes

d'atomes reliés par des liaisons chimiques, et ils ont représenté les liaisons comme des tiges qui joignaient des paires d'atomes. Les solides semblaient être des empilements de polyèdres, tels des cubes ou des octaèdres, dont les



atomes occupaient les sommets et dont les arêtes étaient les liaisons chimiques. Lorsque de telles structures sont soumises à une contrainte, chacune des liaisons se déforme et supporte une partie de la contrainte. Au-delà d'une contrainte critique, les liaisons se rompent et, lorsque trop de liaisons sont rompues, le solide casse.

Rapidement, les physiciens se heurtèrent aux insuffisances de la théorie : les matériaux les plus solides sont endommagés par des contraintes dix fois inférieures à celles qui sont nécessaires pour rompre les liaisons chimiques. Au début des années 1920, A. Griffith montra que la résistance d'un matériau ne résulte pas directement de la solidité de ses liaisons, mais des faiblesses créées par des défauts dans sa structure. Ces défauts, ou fissures, peuvent être microscopiques ou visibles à l'œil nu, selon la manière dont le matériau a été élaboré. Griffith remarqua que, lorsqu'on applique une contrainte qui écarte les bords d'une fissure, les liaisons chimiques situées au fond de la fissure sont plus étirées que les autres. Lorsqu'une de ces liaisons de fond de fissure est étirée au-delà de son point de rupture, les forces se reportent sur les liaisons restantes,

qui se cassent à leur tour : la fissure s'ouvre comme une fermeture éclair, et le solide est brisé (voir la figure 2).

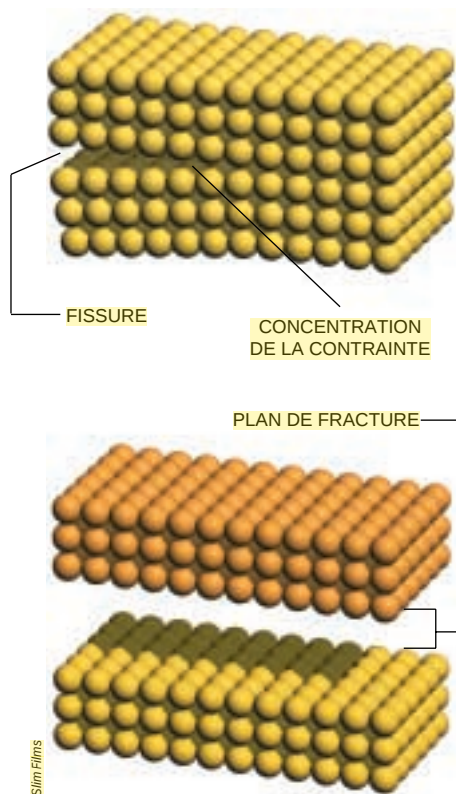
Les artistes et les ingénieurs exploitent cette propriété en dirigeant la formation de fissures aux endroits qui leur conviennent. Ainsi, la force nécessaire pour casser une vitre le long d'une rayure faite au diamant est bien inférieure à celle qu'il faudrait pour fendre une vitre sans défaut.

Au contraire, les matériaux ductiles, tel le cuivre, ne se cassent pas le long d'un défaut superficiel : en 1973, James Rice et Robert Thompson ont supposé que la contrainte qui ouvre une fissure dans un matériau cassant émousse la fissure dans un matériau ductile. Selon leur théorie, les liaisons cassent entre des plans inclinés par rapport au plan des fissures, mais le défaut ne s'aggrave pas, parce que les couches d'atomes glissent les unes par rapport aux autres, réduisant les contraintes. Autrement dit, de nouvelles liaisons se forment à mesure que des liaisons sont rompues (voir la figure 3). L'efficacité de ce mécanisme de glissement dépend de la facilité avec laquelle les liaisons se forment et se rompent le long du plan de glissement atomique.

Ainsi, les matériaux ont des comportements cassants ou ductiles selon la vitesse de rupture des liaisons comparée à celle d'établissement de nouvelles liaisons. Grâce à la microscopie électronique, les métallurgistes déterminent quels plans se sont ouverts et quels plans ont glissé, mais la compréhension fine des différences de comportement demeurait cachée, parce que les liaisons chimiques étaient bien plus complexes que les chimistes ne l'avaient imaginé initialement.

Si la représentation classique de la liaison chimique – une tige reliant des atomes voisins – décrit plusieurs comportements des molécules, elle n'explique pas comment les solides se rompent ou se déforment. Qu'est-ce qu'une liaison chimique ? En imaginant que nous puissions nous tenir debout sur un noyau atomique, nous ne pourrions pas rejoindre le noyau de l'atome voisin en traversant un pont : les liaisons chimiques ne sont pas matérielles, elles résultent de l'agencement des électrons entre les noyaux.

La charge électrique est maximale dans le noyau, car c'est là que les protons, chargés positivement, sont



2. LES MATÉRIAUX FRAGILES se brisent parce que les fissures microscopiques s'agrandissent. Lorsque deux couches d'atomes se séparent au voisinage d'un tel défaut, la contrainte exercée se concentre au fond de la fissure. Dans un matériau comme le verre, les liaisons

chimiques du fond de la fissure cassent en premier, et la fissure s'ouvre comme une fermeture éclair ; les couches d'atomes se séparent le long du plan de la fracture. Quand plusieurs fissures s'ouvrent en même temps, le verre se brise.

rassemblés. Hors du noyau, les électrons engendrent un nuage diffus de charges négatives. Habituellement, c'est dans la direction du noyau le plus proche, là où des électrons qui appartiennent aux deux atomes voisins se recouvrent, que le nuage est le plus dense. En 1926, les physiciens découvrirent les lois de la mécanique quantique, qui décrivent la répartition des charges dans les molécules et dans les atomes, mais la résolution des équations pour un grand nombre d'atomes nécessite des superordinateurs.

À la fin des années 1970, les ordinateurs sont devenus suffisamment puissants pour que l'on étudie sommairement comment la rupture des solides dépend de leur structure électronique. Enfin, en 1990, des ordinateurs ont reproduit le phénomène de cassure ou de déformation des solides.

Grâce à ces machines, des physiciens comme Gregory Olson et Arthur Freeman, du Groupe de recherches métallurgiques de l'Université Northwestern, ont comparé les densités de charge dans des matériaux semblables. D'abord, ils calculèrent les densités de charge dans deux alliages virtuels, l'un où deux plans d'atomes se séparent, et l'autre où ils glissent l'un par rapport

à l'autre. À partir de cette densité de charge, ils déterminèrent la quantité d'énergie nécessaire au déclenchement d'une rupture ou d'un glissement. Puis ils modifièrent la composition des alliages virtuels et relancèrent les calculs. En comparant l'énergie obtenue pour les deux matériaux, ils déterminèrent si les alliages analysés étaient cassants ou ductiles. Les différences d'énergie trouvées entre les alliages virtuels s'accordent avec les propriétés mesurées sur des alliages réels, au laboratoire.

Ces calculs ont montré que l'on savait décrire les ruptures et les glissements, mais ils ne permettaient pas de prévoir comment la modification de la composition d'un alliage engendrait un matériau cassant ou ductile. C'est à ce travail de prédiction que je me suis attelé. En particulier, je voulais comprendre quels éléments on devait ajouter à une structure chimique pour en modifier le comportement mécanique. On sait empiriquement que certains éléments seulement conviennent, mais lesquels? La réponse est apparue quand on a mis au point une nouvelle description des liaisons chimiques dans les solides.

Des liens profonds

Une théorie prédictive de la fragilité serait très utile à ceux qui conçoivent de nouveaux alliages, tel l'aluminium de nickel, un alliage léger qui devient plus résistant quand on le chauffe et que les ingénieurs aéronautiques voudraient utiliser pour les moteurs d'avion. Malheureusement, comme beaucoup d'alliages qui supportent des températures élevées, l'aluminium de nickel est trop cassant pour être utilisé dans la fabrication d'avions et d'autres machines. Rendraient-ils l'alliage plus ductile si l'on remplaçait certains atomes de cet alliage?

Les théories classiques décrivent les liaisons chimiques par des densités de charge électronique situées entre les atomes, mais ce concept est simpliste : quand on écarte les atomes, la densité diminue, mais elle ne disparaît jamais. Dans cette hypothèse, les liaisons ne sont jamais rompues, et les ruptures n'ont jamais lieu. Une autre caractéristique de la densité de charge, fondée sur la topologie, représente mieux la nature d'une liaison et la manière dont elle se brise.

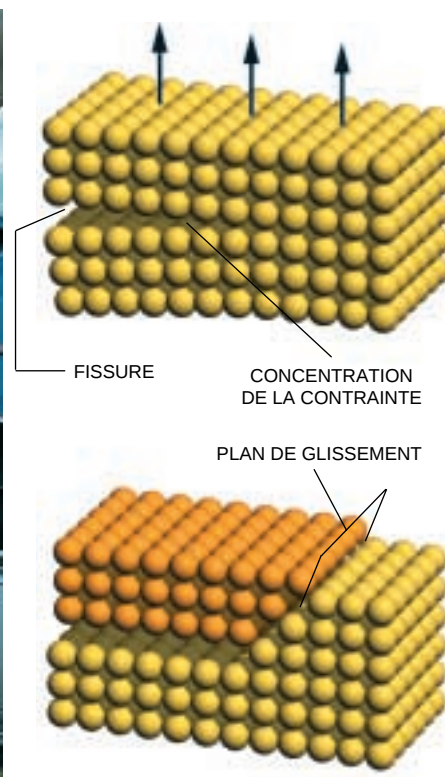
La topologie est une branche des mathématiques qui étudie les propriétés qui se conservent par déformation.



Chris Jones, The Stock Market

3. UN MATÉRIAU DUCTILE se déforme le long de plans inclinés par rapport aux fissures microscopiques initiales. Les atomes de part et d'autre de ce plan glissent les uns par rapport aux autres et diminuent ainsi la contrainte exercée sur les liaisons dans la fissure. Cette

réduction de la contrainte absorbe des quantités d'énergie considérables. C'est pourquoi l'utilisation des métaux ductiles est plus sûre que celle des métaux cassants dans la construction de voitures et d'autres structures résistantes.



Sim Films