

Quelques exemples d'exercices proposés aux collégiens

En mathématiques :

«Si m représente un nombre positif, quelle est l'expression égale à $m+m+m+m$?»

a – $m + 4$

b – $4m$

c – m^4

d – $4(m + 1)$

«Il y a 28 élèves dans une classe. La proportion de filles par rapport aux garçons est de 4 pour 3. Combien y a-t-il de filles dans la classe?»

En physique :

«En mer, les équipages de deux bateaux peuvent communiquer en criant. Pourquoi est-ce impossible pour les équipages de deux vaisseaux spatiaux séparés par la même distance dans l'espace?»

a – Le son est plus réfléchi dans l'espace

b – La pression est trop élevée à l'intérieur des vaisseaux spatiaux

c – Les vaisseaux spatiaux voyagent plus vite que le son

d – Il n'y a pas d'air dans l'espace pour permettre au son de se déplacer.

En sciences de la vie et de la terre :

«Quelle est la fonction de la chlorophylle dans une cellule végétale?»

a – Absorber l'énergie lumineuse et produire de la nourriture

b – Enlever les déchets par un transport actif

c – Produire de l'énergie chimique à partir de la nourriture

d – Contrôler la forme de la cellule

«Les combustibles fossiles se sont formés à partir...?»

a – d'uranium

b – d'eau de mer

c – de sable et de graviers

d – de plantes et d'animaux morts

Quelques exercices proposés aux lycéens de fin d'études secondaires

En sciences (culture générale) :

«Certaines chaussures à talons hauts ont la réputation d'abîmer les sols. Le diamètre à la base de ces très hauts talons est d'environ 0,5 centimètre, et il est d'environ 3 centimètres pour les talons ordinaires. Expliquer brièvement pourquoi les très hauts talons peuvent abîmer les sols.»

«L'énergie nucléaire peut être produite par fission ou par fusion. La fusion n'est pas couramment utilisée comme source d'énergie dans les réacteurs. Pourquoi?»

a – Les principes scientifiques sur lesquels la fusion est basée ne sont pas encore connus

b – Les procédés technologiques d'utilisation sans danger de la fusion ne sont pas développés

c – Les matières premières nécessaires ne sont pas aisément disponibles

d – Les déchets produits par le processus de fusion sont trop dangereux

«Les CFC (chlorofluorocarbones) ont révolutionné la vie personnelle et industrielle ces 30 dernières années. Ils ont servi de réfrigérant dans les réfrigérateurs et de propulseur dans les aérosols, les emballages sous pression et les extincteurs. Il y a maintenant de très forts mouvements internationaux pour arrêter l'utilisation de ces substances, parce qu'...?»

a – elles sont chimiquement inertes

b – elles contribuent à l'effet de serre

c – elles sont toxiques pour les humains

d – elles détruisent la couche d'ozone

En mathématiques (série S seulement) :

«Quelles sont toutes les valeurs de x pour lesquelles l'inéquation $5x + 5/3 \leq -2x - 2/3$ est vraie?»

a – $x \leq -7/9$

b – $x \leq -1/3$

c – $x \geq 0$

d – $x \geq 7/3$

e – $x \geq 9/3$

«Dans un repère orthonormal, les sommets du triangle PQR sont les points : P(1;2), Q(4;6) et R(-4;12). Parmi les phrases suivantes, laquelle est vraie pour le triangle PQR?»

a – PQR est un triangle rectangle en P

b – PQR est un triangle rectangle en Q

c – PQR est un triangle rectangle en R

d – PQR n'est pas un triangle rectangle

«Un examen consiste en 13 questions. Un étudiant doit répondre seulement à une des deux premières questions et seulement à neuf des questions restantes. Combien de choix de questions l'étudiant a-t-il?»

a – $C_{13}^{10} = 286$

b – $C_{11}^8 = 165$

c – $2 \times C_{11}^9 = 110$

d – $2 \times A_{11}^2 = 220$

e – Un autre nombre

différents pays ont placé les États-Unis soit à la première place, soit à la deuxième derrière Singapour. Le mérite en fut attribué aux scientifiques qui avaient terminé leurs études depuis une vingtaine d'années, mais pas aux enseignants.

On admet souvent, tel un axiome, que les connaissances en mathématiques et en sciences des lycéens déterminent la santé économique d'un pays. Toutefois, plusieurs arguments semblent aller à l'encontre de cette croyance : dans les rapports évaluant la compétitivité d'un pays, on constate souvent que de nombreux critères de réussite, telle la qualité de l'infrastructure portuaire, viennent bien avant la qualité de l'enseignement ou la compétence des scientifiques ou des ingénieurs. Face à l'urgence, plus de 1 000 lois ont été promulguées aux États-Unis depuis 1970 pour réformer le système éducatif, mais elles semblent avoir eu peu d'effets sur les connaissances scientifiques acquises par les lycéens.

Si le niveau des élèves en sciences ne paraît pas baisser, la culture scientifique qu'ils acquièrent ne leur est peut-être pas utile dans la vie de tous les jours. Nous pensons que les étudiants qui veulent devenir des scientifiques auraient encore le temps, après le lycée, d'apprendre les théories et les faits scientifiques. En revanche, tous les lycéens devraient apprendre à réfléchir, à distinguer le fait de l'opinion, la probabilité de la certitude, la déduction rationnelle de la superstition, les données des suppositions, la science du folklore, la théorie du dogme.

Wayt GIBBS est journaliste à *Scientific American*. Douglas FOX est journaliste scientifique.

A. BEATON et al., *Mathematical and Science Achievement in the Final Year of Secondary School*, IEA, TIMSS International Study Center, Boston College, Chestnut Hill, Ma., USA, février 1998.

Les dossiers d'éducation et formation. Évaluation internationale en mathématiques et en sciences en classes de cinquième et quatrième, ministère de l'Éducation nationale, de la Recherche et de la Technologie, Direction de la programmation et du développement, n° 99, juin 1998.

L'état de l'école, ministère de l'Éducation nationale, octobre 1998.

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).

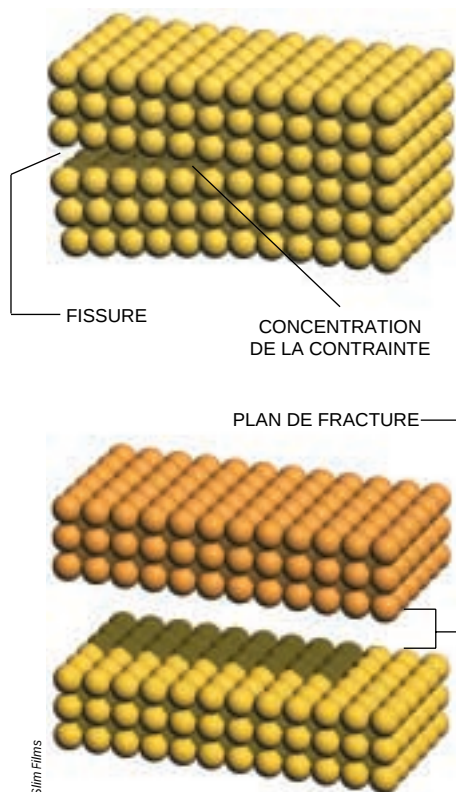
Les artistes et les ingénieurs exploitent cette propriété en dirigeant la formation de fissures aux endroits qui leur conviennent. Ainsi, la force nécessaire pour casser une vitre le long d'une rayure faite au diamant est bien inférieure à celle qu'il faudrait pour fendre une vitre sans défaut.

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.

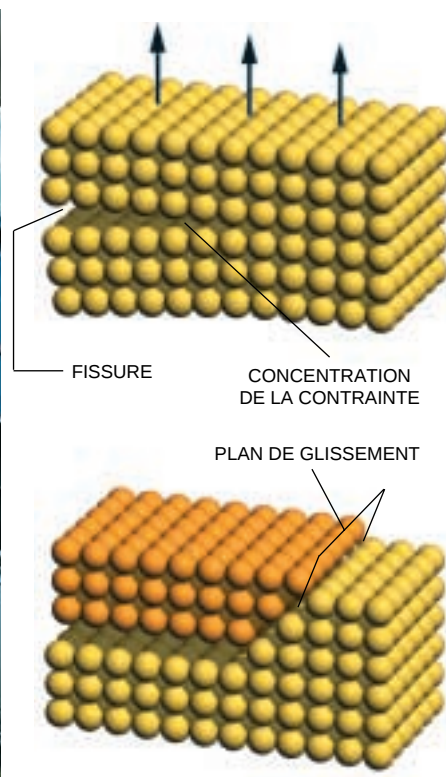
La topologie est une branche des mathématiques qui étudie les propriétés qui se conservent par déformation.



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

En coupant ou en associant des formes, on modifie leur topologie. Une tasse à thé et un anneau, par exemple, sont identiques d'un point de vue topologique : on peut passer de l'un à l'autre par des déformations continues, l'anse de la tasse se transformant en trou. Si l'on utilise un anneau en argile, on peut le façonner en forme de tasse à thé sans couper l'argile. En revanche, on ne peut transformer une boule d'argile en un anneau ou en une tasse à thé sans une perforation qui sépare des parties qui étaient initialement contiguës.

En utilisant ces concepts, le chimiste canadien Richard Bader a analysé les molécules organiques. Ces idées peuvent toutefois être étendues à l'étude des solides métalliques. La cassure change la nature des liens à l'intérieur d'un objet, de sorte que sa description topologique paraît judicieuse. Tout d'abord, comme Bader l'a fait pour les molécules organiques, j'ai dû montrer dans un solide le lien entre la représentation topo-

logique et la représentation classique des liaisons chimiques (voir l'encadré ci-dessous).

On comprend ce qu'est une liaison topologique entre deux atomes quand on compare la densité de charge à une chaîne de montagnes : l'altitude correspond à la densité de charge, les sommets sont les lieux où les charges sont les plus fortes et les cuvettes sont les zones de moindre charge. Deux atomes sont topologiquement reliés quand une ligne de crête relie les sommets. De telles lignes de crête correspondent aux tiges de la représentation classique de la liaison chimique.

Durant quatre ans, j'ai analysé des métaux et des alliages afin de montrer que la représentation topologique des liaisons relie les mêmes atomes que la représentation classique. La topologie enseigne qu'il n'est pas nécessaire d'examiner la totalité de la densité de charge pour établir la carte d'un terrain : seuls sont primordiaux les sommets, les cuvettes et les cols. À partir

de la position de ces points critiques, on interpole le terrain avoisinant. Notamment, quand on connaît la position de deux pics et d'un col qui les relie, on déduit sans risque qu'une ligne de crête – ou une liaison chimique – lie un sommet à l'autre en passant par le col.

La démonstration de la validité de la représentation topologique des liaisons chimiques fut simple, mais elle indiquait seulement quels atomes étaient connectés. Comment savoir si les liaisons se rompraient facilement ou non ? Pour répondre à cette question, il fallait examiner la forme du terrain autour des points critiques. Cette forme peut être caractérisée par les courbures principales en chaque point, des nombres qui décrivent la courbure selon la direction où l'altitude change le plus vite et selon la direction perpendiculaire. Une courbure principale est négative quand elle est analogue à celle d'un sommet ; elle est positive pour une cuvette. Sur un col entre deux sommets, l'altitude

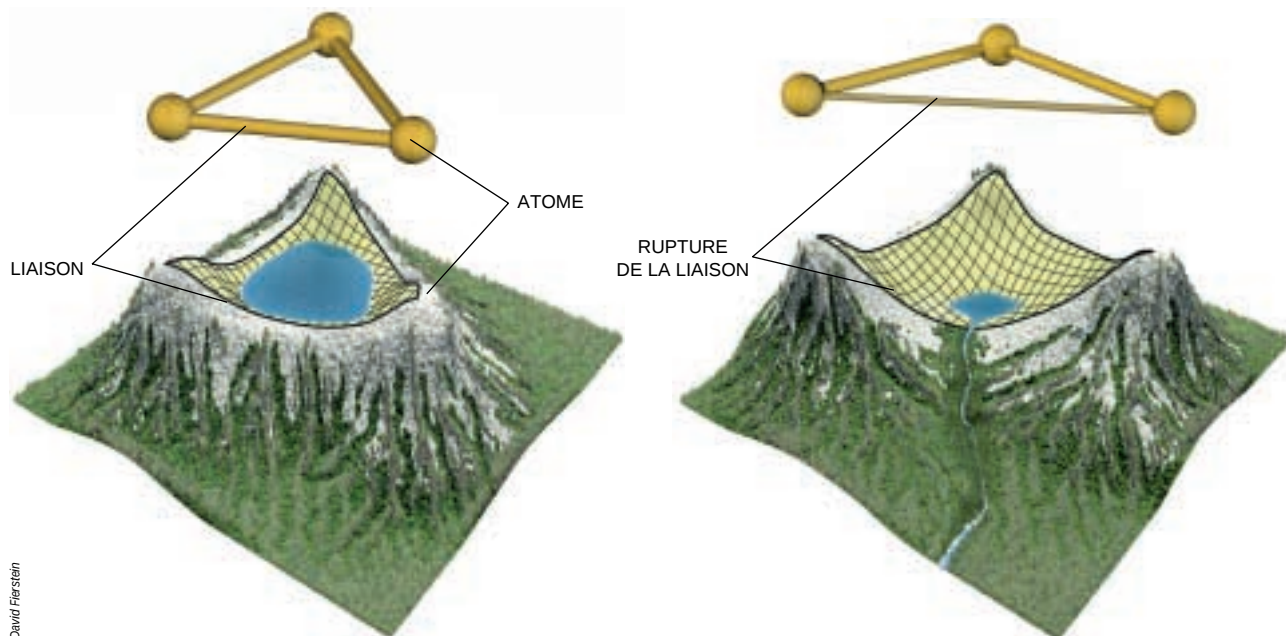
Une nouvelle approche des liaisons chimiques

La théorie classique des liaisons chimiques représente celles-ci comme des tiges entre des atomes. En réalité, les liaisons sont un nuage de charges électroniques. Si l'on sépare deux atomes, le nuage de charges devient moins dense, mais, comme il ne s'annule jamais, on ignore le moment de la rupture. Pour savoir ce qui disparaît lorsque les liaisons se brisent, on examine la topologie de la densité de charge.

La densité de charge, à deux dimensions, est analogue à un paysage de montagne. Les sommets représentent les maxi-

mums de la densité de charge, qui correspondent au noyau des atomes ; la cuvette représente une zone où la charge est très faible, et les arêtes joignant deux sommets représentent les liaisons chimiques.

Lorsqu'un matériau est étiré, les atomes s'éloignent et la densité de charge le long des liaisons diminue. Finalement, les liaisons se cassent – et cessent d'exister en tant que connexion topologique – quand le point le plus bas de la crête passe sous le niveau du fond de la cuvette.



augmente rapidement dans la direction des sommets voisins et décroît dans la direction perpendiculaire. Le col a une courbure principale positive et l'autre courbure principale négative. C'est un point selle.

La description complète de la densité de charge nécessite une description en trois dimensions (au lieu des deux qui correspondent à un paysage). Chaque point critique possède alors trois courbures principales. Un point selle qui a, par exemple, deux courbures principales négatives et une courbure principale positive définit une liaison tridimensionnelle.

Premières prédictions

Comment décrire maintenant la rupture d'une liaison topologique? Lorsque deux atomes à l'intérieur d'un solide s'éloignent, les courbures changent le long de l'axe de la liaison et dans les deux directions perpendiculaires. Quand la courbure s'annule dans une ou deux de ces directions, la connexion topologique entre les atomes disparaît. Dans cette théorie, une liaison est rompue, non pas quand la densité de charge s'annule entre les atomes, ce qui n'arrive jamais, mais quand les deux atomes perdent leur connexion topologique.

Grâce à cette description, on obtient une analyse quantitative de la fracture. Reprenons l'analogie du paysage, à deux dimensions, et considérons un point selle (voir l'encadré de la page 72). En partant d'un col entre deux sommets, on peut se diriger dans quatre directions différentes à altitude constante (deux autour de chacun des sommets adjacents). En suivant ces chemins, la densité de charge n'est donc pas modifiée. Si quatre personnes se mettent en marche à partir du col, chacune dans l'une de ces quatre directions, elles décriront un X dans un plan qui fera un angle aigu avec la pente escarpée qui descend vers le lac ou la cuvette qui représente la zone de densité de charge minimale. On calcule que cet angle est lié au quotient des deux courbures principales du col.

Étirer une liaison interrompue, c'est réduire la densité de charge entre les noyaux. C'est aussi comme si l'on éloignait deux sommets tout en abaissant le col, par déblai de roches. La valeur de l'angle initial, avant la séparation, indique combien de rochers

peuvent être enlevés, et, à mesure que l'on creuse, l'angle diminue. Lorsque cet angle approche de zéro, l'altitude du col devient inférieure à celle de la surface du lac et celui-ci commence à se vider. Quand l'angle est égal à zéro, le col n'existe plus (la liaison se rompt). À cet instant, le col est au même niveau que le point le plus bas de la cuvette, et la dernière goutte d'eau du lac disparaît.

Inversement, une liaison se forme par l'ajout de charges. Topologiquement, la création d'une liaison correspond au remblai de matériaux rocheux pour former une digue ou une ligne de crête à partir du centre du lac. En bref, une liaison se brise quand on retire de la charge de la zone qui entoure le point selle, et une liaison peut se former quand on ajoute de la charge auprès d'un minimum.

Quand on considère des densités de charge dans l'espace à trois dimensions, les angles qui les mesurent doivent être remplacés par des formes géométriques. Au lieu d'un plan contenant les quatre directions où l'on peut se déplacer à altitude constante, on doit utiliser une forme qui contient toutes les directions où la densité de charge est équivalente.

Si l'on prend la forme en X des directions bidimensionnelles de densités de charge égales et qu'on la fasse tourner autour de son axe le long de la liaison chimique, on obtient deux cônes opposés par le sommet. Les cônes font un angle aigu avec un plan perpendiculaire à la liaison et passant par le sommet des cônes. C'est cet angle qui mesure la quantité de charges qui doit disparaître au point selle pour qu'une liaison se brise. Lorsque l'angle diminue, les bases des cônes se rapprochent et forment finalement un disque. Comme pour le paysage bidimensionnel, plus l'angle initial est grand, plus grande est la charge qui doit être ôtée pour arriver à un angle nul et rompre la liaison.

L'inverse d'une rupture de liaison est la formation d'une liaison, dont la compréhension est également nécessaire à la description du phénomène de rupture. De même qu'un cône représente une liaison, d'autres formes géométriques représentent les autres points critiques. Les minimums qui peuvent devenir des liaisons quand on leur ajoute suffisamment de charges, sont représentés par des ellipsoïdes. Dans

ce cas, deux angles sont nécessaires à la caractérisation géométrique et à la mesure de la quantité de charges qui doit être transportée du point selle pour former la liaison. Ces angles indiquent également dans quelle direction il sera le plus facile de construire une digue qui traverse le lac.

Avec cette représentation géométrique pour tous les points critiques

d'un solide, on peut mesurer exactement quand et de combien la densité de charge se modifie pendant la formation et la destruction d'une liaison. Le comportement cassant ou ductile d'un matériau dépend de la prépondérance de ces deux mécanismes, formation et destruction d'une liaison. Ainsi, en favorisant un mécanisme par rapport à l'autre, nous pour-

rions modifier le comportement des matériaux.

Appliquons ce raisonnement à la description des propriétés de l'aluminium de nickel et de deux alliages très proches, les aluminures de fer et de cobalt.

Ces trois composés aux structures identiques sont idéaux pour tester une nouvelle description de la rupture des

Fâcheuses cassures

La défaillance subite d'une structure qui met en jeu la sécurité doit évidemment être évitée à tout prix. Les passagers et l'équipage du vol 243 d'*Aloha Airlines* ont fait les frais d'une telle défaillance, le 28 avril 1988. Vingt minutes après le départ, des fissures le long des rivets de l'enveloppe métallique de l'avion se sont brusquement ouvertes. Une surpression dans la cabine emporta six mètres de fuselage avant, et l'avion dut atterrir en urgence. Un passager fut éjecté en vol ; ce fut la seule victime.

Des contrôles plus minutieux de l'avion, avant l'accident, auraient révélé que des fissures microscopiques autour des rivets avaient grandi, au cours de 19 années de service. Pendant le fatidique et dernier vol de cet avion, les fissures ont atteint une taille critique et se sont ouvertes.

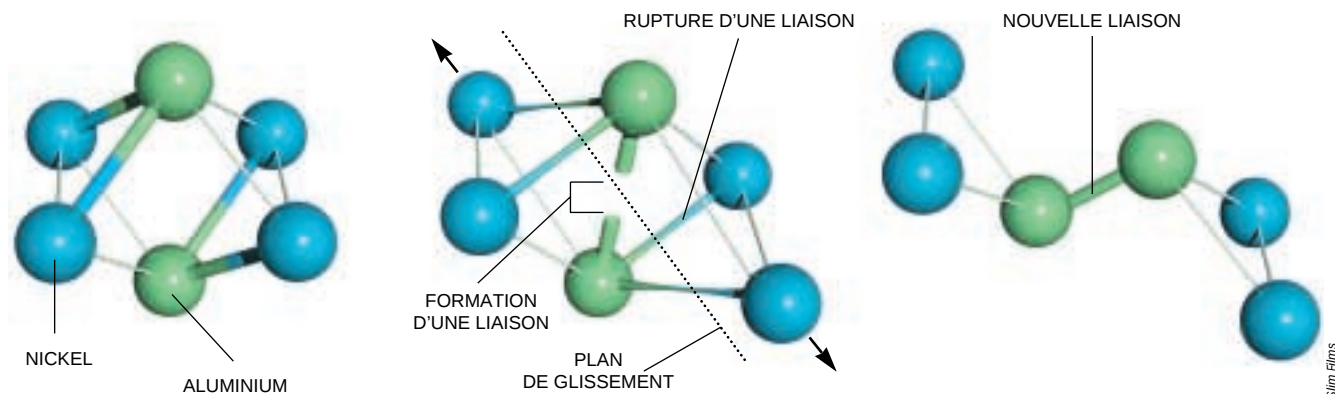
Jusqu'à ce moment, le métal avait travaillé doucement, uniquement à l'endroit des fissures, comme les ingénieurs l'avaient souhaité. Cette déformation ductile diminue les contraintes en émoussant les extrémités des fissures. Leur lente croissance est le meilleur moyen de noter des signes de fatigue avant une brusque rupture.

Par souci de sécurité, les constructeurs de matériaux cherchent à ajouter un zeste de ductilité aux métaux rigides utilisés dans les avions. Pour rendre un matériau plus ductile, on lui ajoute un élément chimique, mais lequel ? Pendant des siècles, la recherche de cet élément s'est effectuée par tâtonnements, mais aujourd'hui, on prédit quels seront les éléments les mieux adaptés.

Les métallurgistes ont un autre moyen de prévenir la rupture d'un matériau cassant : le contrôle de la structure microscopique. Les chimistes des matériaux peuvent disposer individuellement chaque cristal métallique avec le même soin que pour l'emballage de la porcelaine. Par exemple, ils enveloppent les cristaux d'un matériau cassant dans des couches d'un matériau ductile, tel le cuivre : toute fêlure se produisant dans le cristal d'un métal cassant ne dépassera pas la couche ductile. Une fois que le meilleur alliage de base est choisi, on le rend suffisamment ductile, grâce à cette structure en sandwich, pour qu'il soit sans danger ou tout au moins pour qu'il présente des signes de fatigue avant la catastrophe.



L'ÉVACUATION DES PASSAGERS du vol 243 de l'*Aloha Airlines*.



4. LA TOPOLOGIE DE DENSITÉ DE CHARGE révèle où et quand les liaisons chimiques se brisent et se forment lorsqu'un solide métallique se déforme. Les théories classiques n'expliquent pas ces phénomènes : par exemple, elles n'indiquent pas si une liaison se forme entre deux atomes d'aluminium, dans un cristal d'aluminium de nic-

kel quand celui-ci est étiré le long d'un plan de glissement. La charge nécessaire à la formation de cette liaison provient de la rupture des liaisons entre les atomes d'aluminium et de nickel. La manipulation de ce transfert de charge est la clé de la fabrication d'alliages plus ductiles.

matériaux. J'ai cherché les différences de propriétés entre ces trois alliages qui n'avaient pas été expliquées par les modèles classiques, et quels éléments ajoutés à l'aluminium de nickel le rendraient plus ductile. L'aluminium de nickel est ductile si les liaisons initiales sont maintenues longtemps avant la rupture, tandis que de nouvelles liaisons se forment rapidement le long du plan de glissement. Pour satisfaire ces exigences contradictoires, il fallait utiliser la charge des liaisons qui se rompent pour en former de nouvelles. Afin d'évaluer dans quelle mesure ce projet était faisable, j'avais besoin de nouveaux programmes informatiques qui engendreraient les nombres représentant la densité de charge et qui évalueraient les changements dans sa topologie.

À l'Université de Tulane, James MacLaren avait mis au point les instruments dont j'avais besoin pour calculer la densité de charge des trois aluminiums, et pour identifier les points critiques et les différents angles qui les décrivent. Les premières simulations ont confirmé l'accord avec les propriétés expérimentales. Par exemple, l'aluminium de fer, connu pour être le plus ductile des trois alliages, est celui qui a la charge la plus forte autour du point selle, dans les liaisons entre les atomes de fer et d'aluminium. Cet aluminium a aussi un minimum très plat entre les atomes d'aluminium voisins, et, par conséquent, la création d'une liaison à cet endroit ne nécessiterait qu'une faible charge.

J'ai poussé cette idée plus loin. Les programmes ont calculé la modification

des propriétés de l'aluminium de nickel en remplaçant quelques atomes de nickel par un élément qui placerait davantage de charges le long de la liaison nickel-aluminium, charges qui seraient ensuite disponibles pour la création de nouvelles liaisons entre les atomes d'aluminium à l'endroit du minimum. Cette redistribution des charges rendrait le matériau plus ductile.

Par quels éléments remplacer le nickel? L'analogie avec la chaîne de montagnes montre que chaque atome est un sommet, avec des pentes différentes qui en descendent. Dans une montagne d'aluminium proche d'une montagne de fer, il y a davantage de rochers à l'endroit du col, et la cuvette est plus plate qu'à côté d'une montagne de nickel. Avec du fer, il y a suffisamment de rochers pour retirer une partie de la liaison et pour la construction d'une nouvelle ligne de crête entre les atomes d'aluminium dans la cuvette. En revanche, avec une montagne de cobalt, il n'y a pas assez de rochers à l'emplacement du col pour la construction d'une ligne de crête. Le fer semblait le meilleur candidat pour la substitution.

Lorsque ce résultat fut obtenu, la recherche empirique d'éléments capables d'améliorer l'aluminium de nickel était en cours depuis 15 ans, de sorte que j'espérais qu'elle aurait confirmé mes prévisions. De fait, à une conférence, à la fin de 1998, j'appris que dix pour cent de fer substitué au nickel donne exactement l'effet prévu.

Trop tardive pour améliorer les alliages d'aluminium de nickel, la théorie topologique de la liaison chimique

devrait mettre fin aux longs tâtonnements des métallurgistes.

On l'utilise déjà pour chercher de nouveaux alliages plus légers, plus solides et qui conservent leurs propriétés à des températures supérieures. Ces alliages seront utilisés pour la fabrication d'avions supersoniques dans les années 2010. Enfin, au lieu de tester d'innombrables alliages que l'on modifie à l'aveuglette, les métallurgistes utiliseront des ordinateurs pour calculer la densité de charge d'alliages qu'ils n'auront pas à réaliser. Munis de cette information, ils détermineront comment modifier la densité de charge pour obtenir les propriétés désirées et ainsi prévoir quels éléments produiront ces changements. Et si l'on brise une bouteille de champagne sur le nez d'un avion construit avec ces alliages, j'espère être là pour en étudier la rupture.

Mark EBERHART est professeur de chimie et de géochimie à l'École des mines du Colorado.

Richard F.W. BADER, *Atoms in Molecules : A Quantum Theory*, Oxford University Press, 1994.

Mark EBERHART, *Computational Metallurgy*, in *Science*, vol. 265, pp. 332-333, 15 juillet 1994.

Ivan AMATO, *Stuff*, BasicBooks, 1997.

M.E. EBERHART et A.F. GIAMEI, *The Visualization and Use of Electronic Structure for Metallurgical Applications*, in *Materials Science and Engineering A : Structural Materials*, vol. 248, n° 1, pp. 287-295, 1998.

Les archives climatiques des lacs du Jura

MICHEL MAGNY

Les sédiments accumulés dans les lacs du Jura, les glaces du Groenland et les sédiments de l'Atlantique Nord, révèlent les fluctuations du climat depuis 10 000 ans. Paradoxalement, un brusque réchauffement peut amener un refroidissement de la planète.

L'étude des climats du passé repose sur la nature et la datation des sédiments anciens en divers points du globe terrestre. Après avoir longtemps divergé, les données marines et continentales s'accordent aujourd'hui pour reconnaître la relative instabilité du climat au cours des douze derniers millénaires. Certaines des oscillations climatiques qui ont été ainsi identifiées présentent un intérêt tout particulier : remarquables par leur amplitude et leur rapidité, elles pourraient préfigurer le proche avenir de notre climat menacé par la pollution de l'atmosphère.

L'examen des sédiments déposés au fond des mers a établi que le climat, lors de la période quaternaire (recouvrant

les deux derniers millions d'années), a été marqué par une alternance de phases froides, ou glaciations, et de phases de réchauffement, ou interglaciaries.

Pendant les glaciations, les continents sont partiellement envahis par des calottes glaciaires qui se développent à partir des zones polaires et des montagnes. Le stockage des eaux sous forme de glaces sur les continents a pour conséquence un abaissement du niveau des océans. Ainsi, lors du dernier maximum glaciaire, il y a quelque 20 000 ans, d'énormes calottes de glace ont recouvert l'Amérique du Nord jusqu'au Sud des Grands Lacs, et l'Europe du Nord jusqu'au Sud de Belfast et de la Baltique ; parallèlement, le niveau des

océans a baissé de 120 mètres. Pendant les périodes interglaciaires, le climat se réchauffe, et la Terre retrouve une physionomie voisine de celle qui prévaut actuellement.

Ces grands changements climatiques résultent des variations périodiques de l'orbite de la Terre, qui modifient la quantité de chaleur solaire absorbée par la Terre. Ainsi, les glaciations se répètent tous les 100 000 ans environ depuis près d'un million d'années. Toutefois certaines variations du climat sont beaucoup plus rapides.

Dix degrés en 20 ans !

L'analyse de deux sondages réalisés par des équipes européennes (Projet GRIP) et américaines (Projet GISP2) sur le site de Summit, au Groenland, a donné de nouvelles courbes retraçant dans le détail l'histoire du climat depuis 130 000 ans, c'est-à-dire depuis le dernier interglaciaire (ou Éémien). Ces courbes s'appuient, en particulier, sur l'évolution du rapport des deux isotopes 18 et 16 de l'oxygène contenu dans la glace (une diminution de la concentration en oxygène 18 traduit un refroidissement du climat).

1. VUE AÉRIENNE DU PETIT LAC D'ÉTIVAL, dans le Jura (à gauche). Avec plus de 80 plans d'eau, souvent d'origine glaciaire, le Jura offre aux paléoclimatologues un champ d'investigation exceptionnel. Ils extraient des carottes où les sédiments enregistrent les variations passées du climat qui ont affecté l'alimentation des lacs et provoqué des variations de leur niveau. La carotte de 50 centimètres de longueur a été prélevée dans les sédiments du lac de Narlay, dans le Jura, documente une forte baisse du niveau du lac survenue vers 2500 avant notre ère. Comme les autres glaciers alpins, le glacier d'Aletsch (à droite), dans les Alpes suisses, se révèle très sensible aux variations du climat, même de faible ampleur. Sa masse s'est ainsi considérablement amoindrie depuis la fin du Petit Âge Glaciaire, vers 1850. La comparaison des oscillations du climat retracées récemment dans le Jura avec celles obtenues au début des années 1970 par les palynologues et les glaciologues dans les Alpes suisses et autrichiennes montre que les hausses des lacs du Jura coïncident pendant les dix derniers millénaires avec les avancées des glaciers dans les Alpes (un refroidissement du climat se traduisant dans les deux régions par de plus fortes précipitations).