

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.

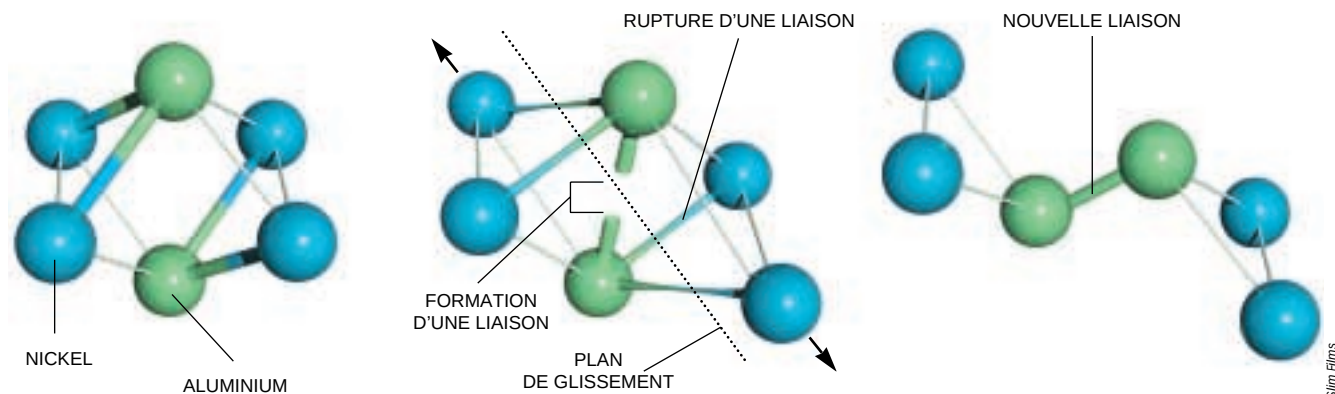
Jusqu'à ce moment, le métal avait travaillé doucement, uniquement à l'endroit des fissures, comme les ingénieurs l'avaient souhaité. Cette déformation ductile diminue les contraintes en émoussant les extrémités des fissures. Leur lente croissance est le meilleur moyen de noter des signes de fatigue avant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