

En effet, le long toit qui court de la gauche du tableau jusqu'au clocher de la Vieille Église (dans l'ombre) est celui d'un vaste entrepôt, celui de l'Oost-Indisch Huis, c'est-à-dire la Maison des Indes orientales. Il s'agit du siège de la chambre de Delft de la Compagnie hollandaise des Indes orientales (*Verenigde Oostindische Compagnie*).

Cette compagnie fédérait six chambres régionales, comme celle de Delft, et employait des dizaines de milliers de Hollandais, dont trois cousins de Vermeer.

Cette première grande société par actions, créée en 1602, obligea les entreprises commerciales à fusionner en une unique organisation afin de profiter de l'essor du commerce avec l'Asie. L'idée était bonne, car en quelques années, la Compagnie régna sur le commerce et les échanges mondiaux, notamment avec les pays d'Asie et particulièrement la Chine.

Ces relations florissantes n'eurent pas à souffrir des dommages dus au Petit Âge glaciaire. Au contraire, dans l'Empire du Mi-

lieu, entre 1654 et 1676, des plantations chinoises de mandariniers et d'orangers séculaires succombèrent au gel.

Parmi les importations, la porcelaine chinoise, en particulier celle à motifs bleus sur fond blanc, eut beaucoup de succès. Cet engouement marqua le début d'une production locale : la réputée porcelaine de Delft.

T. Brook, *Le chapeau de Vermeer. Le XVII^e siècle à l'aube de la mondialisation*, Payot, 2010.



alg-images

IDÉES DE PHYSIQUE

Le verre : attention, fragile !

Pour rendre le verre moins fragile ou le découper sans qu'il éclate, mieux vaut comprendre pourquoi et comment il se brise.

Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK

Si le saladier en acier que des mains maladroites ont fait tomber s'en tire par quelques bosses, le plat en verre ou en porcelaine se brisera en mille morceaux. Quelle injustice ! À quoi est-elle due ?

Le verre est un matériau dit fragile. Soumis à une contrainte mécanique, par exemple une compression ou une flexion, il se déforme d'abord élastiquement, c'est-à-dire qu'il retrouve sa forme initiale lorsque la contrainte cesse d'être appliquée. Ces déformations sont très faibles, car le verre est très rigide. Mais il se rompt sans prévenir lorsque la contrainte augmente : combien de miroirs brisés pour avoir serré trop fortement les mâchoires de maintien !

Fragile ou ductile

Au contraire, les matériaux dits ductiles, tels les métaux, peuvent subir une importante déformation permanente, la déformation plastique, avant de se casser. Pourquoi ? La cohésion d'un métal est due à la mise en commun d'électrons entre les atomes ; ces électrons forment une « mer » où baignent les ions métalliques. Et cette mer d'électrons suit avec facilité le mouvement des ions, lesquels peuvent donc se réarranger.

En revanche, les verres usuels sont composés d'oxydes amorphes, telle la silice (SiO_2). La cohésion est assurée par des liaisons covalentes, très fortes, entre les atomes de silicium et

d'oxygène qui forment un réseau de tétraèdres : il en résulte une structure très rigide, où les atomes ne peuvent se déplacer les uns par rapport aux autres.

Sous l'effet d'une tension mécanique, la seule liberté du matériau réside dans l'allongement des liaisons, comme avec des ressorts, ce qui constitue une déformation élastique. De telles liaisons se rompent lorsque la distance entre les atomes concernés devient trop grande. Des calculs de mécanique quantique suggèrent qu'une liaison se

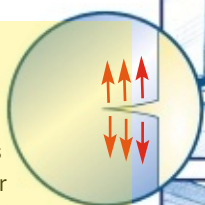
défait lorsque son allongement atteint 20 pour cent. Or en pratique, un matériau homogène se brise bien avant de s'allonger autant.

Pourquoi cette différence ? À cause des défauts, toujours présents à l'intérieur des matériaux ou sur leurs surfaces. Au-delà d'un certain seuil de contrainte, il peut devenir plus avantageux pour le matériau, du point de vue énergétique, d'accroître la taille des défauts (fissures, cavités, etc.) que de se déformer élastiquement.

À l'échelle microscopique, un défaut se traduit par une absence locale de cohésion de la matière. Pour que le matériau résiste à la contrainte, la force non exercée par ces liaisons absentes se reporte sur les liaisons qui bordent le défaut.

La contrainte est ainsi amplifiée à l'extrémité d'une fissure. En tête d'une fissure étroite, l'amplification est proportionnelle à la racine carrée du rapport de la profondeur de l'entaille sur le rayon de courbure au fond de la fissure. Avec une simple microfissure profonde de 0,1 millimètre et d'un rayon de courbure égal à 5 nanomètres, une pression exercée sera ainsi localement multipliée par 100 !

Dans le cas des métaux, une telle contrainte locale dépasse aisément la limite d'élasticité : le matériau se déforme irréversiblement en tête de fissure sur une certaine zone, ce qui diminue d'autant la contrainte. Comme cette zone de déformation plastique peut être assez étendue en raison de la mobilité des atomes, il faut appliquer de fortes contraintes pour que la fissure se propage.



Dessins de Bruno Vacaro

1. L'IMPACT DU BALLON SUR LA VITRE crée des fissures qui se propagent et font voler en éclats la vitre. La naissance d'une fissure est due à l'apparition de forces de tension trop intenses (flèches rouges). La vitre étant du verre qui a subi un recuit pour le rendre plus homogène et ainsi plus solide, les fissures, une fois nées, se propagent aisément et forment des éclats relativement grands.



2. L'ASSIETTE LÂCHÉE DES MAINS tombe par terre et se brise en une multitude de petits morceaux : elle était en verre trempé. La trempe accroît la solidité du verre en mettant sa surface en compression, mais elle fragilise son intérieur en y créant des tensions.

En revanche, dans un matériau comme le verre, il n'y a pas réorganisation des atomes et la contrainte amplifiée se reporte uniquement sur quelques atomes : au-delà d'un certain seuil, les liaisons atomiques se rompent et la fissure se propage alors par séparation des plans atomiques, en laissant des surfaces relativement lisses.

Recuit ou trempé ?

Puisque c'est en étirant que l'on ouvre les fissures, le verre casse toujours en tension. Il est en revanche très résistant à la compression ; ce n'est qu'avec de très importantes pressions que l'on atteint un régime plastique. Pour obtenir un verre plus solide, une première étape est d'éliminer les tensions internes. De telles tensions apparaissent spontanément lors du refroidissement (en général non homogène) du verre à partir de la température où on le travaille (vers 700 °C pour le verre à vitre ordinaire). D'où la pratique du recuit, qui consiste à échauffer le verre à une température proche de son point de ramollissement : le matériau est alors assez mou pour que les tensions internes se relâchent.

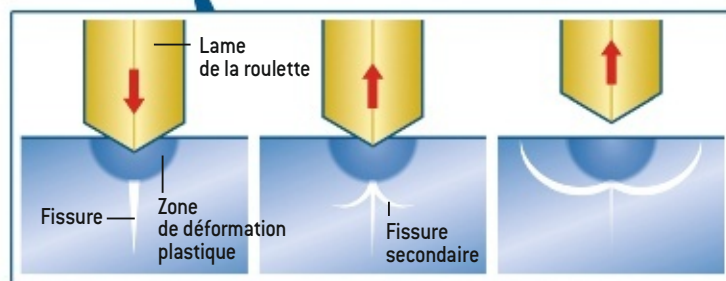
Sans recuit, la moindre rayure au mauvais endroit (c'est-à-dire un endroit déjà

soumis à une tension interne) peut briser le verre localement. Le verre recuit, tel celui des vitres des fenêtres (voir la figure 1), est si homogène qu'une fissure, une fois ouverte, peut se propager sur toute la vitre et la briser tout du long ! Évidemment, si l'on chauffe à nouveau le verre de façon non homogène, il redevient fragile : s'il y a des différences de température au sein du verre, des zones se dilateront plus que d'autres et des contraintes internes apparaîtront : la rupture brutale redevient possible. Pour éviter cela, on emploie du verre dont la dilatation thermique est faible, tel le pyrex, trois fois moins dilatable que le verre usuel.

Une autre technique, la trempe, accroît encore la solidité du verre. Le verre est échauffé comme pour le recuit, mais sa surface est ensuite refroidie rapidement par des jets d'air. Les couches externes se solidifient donc en premier et forment une espèce d'armature rigide. Lorsque l'intérieur se refroidit, il tend à se rétracter. Selon l'épaisseur du verre, cela se traduit par un léger amincissement sans conséquence. En revanche, dans les directions parallèles à la surface, le verre intérieur reste solidaire des couches externes déjà solidifiées. Il demeure alors sous tension et met la surface en compression.



3. LA ROULETTE du vitrier, en appuyant sur la surface du verre, crée une toute petite zone de déformation plastique et, juste au-dessous, une fissure. Lorsque la roulette est retirée, la fissure verticale s'amincit tandis qu'une fissure latérale en forme de moustaches s'ouvre et s'agrandit jusqu'à atteindre la surface. La découpe du verre n'est donc pas tout à fait nette.



LES AUTEURS



Jean-Michel COURTY et Édouard KIERLIK sont professeurs de physique à l'Université Pierre et Marie Curie, à Paris. Leur blog : <http://idphys.free.fr>