

Quand le verre s'écoule

Le verre est-il vraiment un solide ? Non, mais sa viscosité est si élevée qu'aucun écoulement n'est perceptible, pas même à l'échelle de plusieurs siècles.

Certains matériaux ne passent pas instantanément de l'état liquide à l'état solide lorsqu'ils se refroidissent naturellement. Ainsi, le goudron ou le verre deviennent pâteux et s'écoulent de plus en plus lentement à mesure que leur température diminue.

Quel est l'état de ces corps à température ambiante ? Une expérience qui a débuté en 1927 montre que le goudron s'écoule très lentement. Selon une idée répandue, il en serait de même pour les verres à l'échelle des siècles, et les vitraux des cathédrales en attesteraient. Mais est-ce vraiment le cas ?

Dans le principe, la distinction entre un fluide et un solide est claire : est solide un corps qui conserve sa forme, est fluide un corps qui s'écoule et épouse la forme du récipient. La plupart du temps, nous n'avons aucun mal à faire la différence. Mais qu'en est-il, par exemple, de la gelée au madère ou du camembert bien fait ? De prime abord, nous aurions tendance à classer ces deux substances dans la catégorie floue des substances molles, c'est-à-dire qui se déforment uniquement sous l'effet d'une contrainte. Cependant, après

une nuit à température ambiante, le cube de gelée est toujours cubique tandis que la portion de camembert est devenue informe. Il apparaît donc que la gelée est solide et pas la pâte du camembert, du moins à l'échelle d'une nuit.

Nous n'avons pas spontanément reconnu le camembert comme fluide, parce que le temps qu'il met à s'écouler est bien plus long que celui pris par l'eau ou le miel. Cette durée est en effet proportionnelle à la viscosité du fluide, grandeur qui mesure sa résistance à l'écoulement, et inversement proportionnelle à sa masse volumique.

Une goutte de goudron en huit ans

Or si la viscosité de l'eau est d'une centipoise, celle du miel atteint 5 000 centipoises et celle du camembert 50 millions. Peu familiers avec ces unités, nous pouvons néanmoins comparer ces chiffres relatifs à deux substances dont les densités sont proches : s'il faut 10 secondes au miel pour couler, il en faudra 100 000 pour le camembert, soit plus d'une journée.

Ces exemples montrent que la fluidité doit être associée à une échelle de temps. Un cas étonnant est celui du goudron ; il semble solide et cassant pour des essais brefs, mais il coule à la longue. En 1927, Thomas Parnell, de l'Université du Queensland, en Australie, démarra ce qui est devenu l'expérience de physique la plus longue de l'histoire. Il versa du goudron fondu dans un entonnoir dont l'orifice était clos. Après avoir attendu trois ans que le goudron soit complètement refroidi, il déboucha l'orifice. Depuis, l'expérience se poursuit et le goudron s'écoule lentement. La première goutte est tombée au bout de huit ans en 1938. On en est aujourd'hui à huit gouttes, et il y a semble-t-il assez de goudron pour que l'expérience dure encore une centaine d'années... En supposant que le goudron s'écoule dans l'entonnoir comme le ferait de l'eau, on a estimé sa viscosité à 20 milliards de centipoises.

Ces ordres de grandeurs font apparaître une difficulté quant à la définition de la fluidité. Qu'advient-il lorsque l'échelle de temps de l'écoulement dépasse l'histoire de l'humanité, voire les temps géologiques ? Une telle situation se rencontre dans le cas des verres.

Suivons ce qui se passe lorsqu'un matériau se refroidit. À suffisamment haute température, il est liquide : ses



Dessins de Bruno Vacaro

1. Le miel est assez fluide pour s'écouler et n'importe qui peut s'en rendre compte. Le goudron aussi s'écoule à la température ambiante, mais cet écoulement est presque imperceptible. Ainsi, dans une expérience commencée en 1927, huit gouttes seulement de goudron ont franchi le col d'un entonnoir et sont tombées dans le récipient inférieur.



molécules sont animées de mouvements incessants, avec des énergies cinétiques assez élevées pour empêcher l'apparition d'une structure ordonnée. À mesure que la température s'abaisse, les molécules ralentissent et leurs interactions diminuent leurs mouvements relatifs. À notre échelle, on constate un accroissement sensible de la viscosité ; dans le cas de l'eau, elle est multipliée par six entre 100 °C et 0 °C.

Dans les corps cristallins, il existe une température bien précise, la température de solidification (ou de fusion), pour laquelle les molécules s'immobilisent en s'ordonnant sur un réseau périodique et ne conservent que de petits mouvements vibratoires autour de leurs positions d'équilibre. Le matériau est alors devenu solide et la notion de viscosité perd son sens.

Les vitraux des cathédrales, une fausse preuve

Tel n'est pas le cas de la plupart des verres, dont la viscosité augmente de façon phénoménale sur un intervalle de quelques centaines de degrés. Prenons l'exemple d'un verre du commerce utilisé pour des fenêtres : vers 1000 °C, sa viscosité est de un million de centipoises, assez faible pour qu'il soit soufflé et travaillé. Vers 700 °C, elle a été multipliée par 4000 ; malgré cette valeur élevée, on peut observer des déformations du verre sous l'effet de son propre poids. À 550 °C, la viscosité atteint un million de milliards de centipoises, soit 50 000 fois plus que le goudron. Cette valeur de la viscosité définit par convention la température de transition vitreuse.

À cette température, la disposition des molécules ressemble à celle d'un liquide – elle est désordonnée –, mais les molécules sont quasi immobiles. La structure du verre apparaît alors comme celle d'un liquide figé, du moins à l'échelle de quelques milliers d'années. Pour des températures plus basses encore – la température ambiante, par exemple –, le verre, dans un état de la matière dit amorphe, est considéré comme solide.

La physique de la transition vitreuse est loin d'être éclaircie, mais nos connaissances sont suffisantes pour mettre

2. Dans de la silice cristalline, les molécules (SiO_2) sont disposées de façon ordonnée (à gauche). Liquide, ce matériau constitue du verre fondu : les molécules sont libres de se déplacer les unes par rapport aux autres, et ont donc des positions irrégulières (au centre). En refroidissant, le verre fondu se solidifie : des liens intermoléculaires se créent et la structure désordonnée se fige (à droite).

fin à un mythe scientifique. Dans certains ouvrages de vulgarisation, on peut lire qu'à température ambiante, le verre est encore pâteux et s'écoule très lentement. Les vitraux datant du Moyen Âge en seraient la preuve : ils sont plus épais à leur base qu'à leur sommet, ce qui résulterait d'un écoulement sous l'effet de la gravité au cours des siècles. Hélas, sans même invoquer la verrerie romaine – par exemple le vase *Portland* du *British Museum*, toujours aussi délicat après 2000 ans d'existence – ni le fait que la hauteur du vitrail n'a pas varié, une étude approfondie montre qu'il n'en est rien.

On peut évaluer la température à laquelle on devrait porter le vitrail pour percevoir, sur une période de 1000 ans, un écoulement : le résultat est de l'ordre de 400 °C. On peut aussi obtenir une valeur effective de viscosité en extrapolant à la température ambiante la dépendance en température de la viscosité (à température ambiante, la viscosité des verres, si tant est qu'elle ait un sens, ne peut être mesurée directement). On trouve alors des valeurs de l'ordre de 10^{22} centipoises, ce qui correspond à des temps caractéristiques d'écoulement de dix milliards d'années – l'âge de l'Univers...

En fait, il semble que les procédés de fabrication anciens ne permettaient pas d'obtenir un verre aussi uniformément plat qu'aujourd'hui, et qu'afin d'assurer une meilleure solidité, les artisans auraient volontairement placé les vitraux de façon que leur partie la plus épaisse se trouve en bas et leur partie la plus mince en haut. Que ne l'ont-ils écrit noir sur blanc !

E. D. ZANOTTO, *Do cathedral glass flow ?*, in *American Journal of Physics*, vol. 66, pp. 392-395, 1998.

R. EDGEWORTH et al., *The pitch drop experiment*, in *European Journal of Physics*, vol. 5, pp. 198-200, 2004.

Blog des auteurs : <http://fausstroll.free.fr/blog/>