

Le verre dans tous ses éclats

Un nouveau modèle éclaire l'un des plus anciens mystères de la physique : la solidification de cette matière non cristalline

C'est en pensant au difficile déplacement des passagers dans les rames bondées de métro qu'une équipe internationale de chercheurs vient de résoudre, en partie, l'un des plus vieux et importants mystères de la physique : la formation du verre. Le passage du verre fondu au verre dur et cassant que nous connaissons est en effet fort différent de la transformation de l'eau liquide en glaçon, ou de bien d'autres « changements de phase ».

Alors que la fonte de la glace se fait toujours à 0 °C, celle du verre – à base de silice, d'aluminium ou de polymères – est assez variable, d'où le savoir-faire des souffleurs de verre et des industriels.

Au niveau moléculaire, la situation est tout aussi troublante. Alors que dans la glace les molécules forment un joli cristal, dans le verre, l'organisation est la même

pour la phase solide ou liquide – très désordonnée. Singularité supplémentaire : cette matière apparemment figée s'écoule, mais si lentement que même les vitraux des cathédrales n'en gardent pas la trace et qu'il faudrait des milliards d'années pour le voir.

Autre mystère, la température à partir de laquelle le verre dur se met à fondre dépend de l'épaisseur (pour des verres extrêmement fins). Là encore, ce n'est pas le cas d'un glaçon, qui se liquéfie à température constante quelle que soit sa dimension.

En outre, depuis une vingtaine d'années, les chercheurs ont observé qu'il existe une mince couche liquide en surface : une particule d'or s'y enfonce de quelques nanomètres...

Même si, depuis des millénaires, les artisans, les industriels ou les artistes fabriquent du verre, la thermodynamique, qui décrit par-

faitement les passages du liquide au solide ou du liquide au gaz, bute sur la question de la transition vitreuse.

D'où l'intérêt du modèle proposé dans les *PNAS* le 22 juin par une équipe internationale de l'ESPCI ParisTech et de l'université Paris-Diderot, en France, et de l'Institut Perimeter et de l'université McMaster (Hamilton), au Canada.

Une fine couche liquide

« Nous avons fait d'une pierre deux coups », résume Thomas Salez, chercheur CNRS à l'ESPCI. Trois coups, même. Leur théorie décrit l'évolution de la viscosité avec la température. Elle explique pourquoi les verres très fins fondent à plus basse température que les plus épais, ainsi que la présence de la fine couche liquide en surface.

La clé est donc de considérer que les molécules du matériau sont des passagers du métro aux heu-

res de pointe. Dans cette rame imaginaire, plus la température baisse, plus le volume diminue et la densité augmente : la voiture est bondée, les passagers ne peuvent plus bouger. Le matériau est solide tout en étant désordonné. Cependant, il est quand même possible de remuer. Soit en jouant des coudes, peu efficace, soit en jouant collectif, en suggérant de bouger aussi à son voisin, qui lui-même demandera à sa voisine de faire un effort, et ainsi de suite... Bien entendu, les molécules ne se parlent pas entre elles, et ce mouvement coopératif à la queue leu leu, qui peut concerner plusieurs dizaines de « passagers », n'apparaît que rarement. Néanmoins, ce jeu de taquin mis en équation permet aux chercheurs de reproduire l'évolution de la dynamique du verre lorsque le liquide se refroidit.

En outre, si les portes du métro s'ouvrent, un espace se libère sou-

dain et, constat universel, la coopération n'est plus nécessaire : chacun pour soi ! Le voisinage de l'ouverture devient donc plus mobile que l'intérieur. Voici l'équivalent de la couche liquide observée dans les expériences de vitrification. Tout cela assemblé dans des formules par le mathématicien de l'équipe, Justin Salez, explique aussi l'effet de l'épaisseur sur la transition vitreuse.

« Nous pensons avoir capturé l'essentiel de la physique du phénomène », estime Elié Raphaël, du CNRS, à l'ESPCI. « Le domaine est très vaste et plusieurs modèles ont déjà été proposés, avec des modes et des controverses entre différentes écoles. Certaines idées fonctionnent, mais sont peu explicatives. Le modèle présenté dans les *PNAS* a l'avantage de la simplicité et de réunir des idées raisonnables », explique Ludovic Berthier, chercheur CNRS à l'université de Montpellier.

Pour l'instant, il manque à ce nouveau modèle plus de confrontation avec des résultats expérimentaux. Il ne sera pas facile non plus d'observer la queue leu leu moléculaire pour valider cette hypothèse.

« Ce n'est pas la fin du problème, mais le début ! », s'enthousiasme Kari Dalnoki-Veress, de l'université McMaster. L'analogie du métro ouvre en effet des perspectives pour modifier les propriétés des verres en jouant sur la nature des supports ou du confinement, qui peuvent « ouvrir » ou « fermer » les portes aux molécules. « Depuis quelques années, on fabrique des verres plus stables et denses par dépôt couche par couche plutôt que par refroidissement. Ces propriétés pourraient s'expliquer par un mécanisme analogue à celui décrit dans les *PNAS* », suppose Ludovic Berthier. ■

DAVID LAROUSSIERE