

James Thompson et son frère William Thompson (qui fut anobli sous le nom de Lord Kelvin) répliquèrent en indiquant que la mince couche d'eau résultait plutôt d'un abaissement temporaire de la température de fusion, en raison d'une pression exercée par le contact d'un objet. Comme les molécules sont plus proches dans l'eau liquide que dans la glace, l'écrasement de la glace (sous la lame d'un patin, par exemple) aurait favorisé la fusion du solide.

Cette théorie de «fusion par compression» s'est imposée pour expliquer pourquoi la glace est glissante, et on la trouve encore dans de nombreux manuels de physique. Toutefois des calculs simples montrent que la fusion par compression n'explique la physique du patin à glace qu'à des températures proches de la température de fusion normale de la glace : un patineur glissant sur un lac gelé, sur des patins à glace ordinaires, ne réduit la température de fusion que de quelques degrés. Par la

seule fusion par compression, les patins ne glisseraient qu'aux températures légèrement inférieures à 0 °C. À Cambridge, en 1939, Frank Bowden et T.P. Hughes cherchèrent une meilleure théorie. Ils conclurent de leurs analyses qu'un autre facteur dominait à basse température : les frottements de la lame du patin contre la glace produisent suffisamment de chaleur pour former une mince couche d'eau liquide.

Les physico-chimistes étudient ainsi la théorie de la fusion par compression

Les effets de la fusion de surface sur l'environnement

UN SOL FROID ET DUR

Les agriculteurs savent que les gelées font remonter les cailloux dans les champs : des terres qu'ils avaient consciencieusement nettoyées sont sens dessus dessous, des pierres tiennent en équilibre sur des aiguilles de glace, et le sol est boursoufflé autour des gros rochers. Ce phénomène de «débeurrage» résulte des films liquides présents à la surface de la glace. Il s'amorce quand de l'air froid refroidit le sol et gèle une partie de l'eau à proximité de la surface du sol, mais les véritables dégâts se produisent après cet épisode initial. Les forces moléculaires et les impuretés sur les surfaces glacées retardent la prise en glace des films liquides jusqu'à ce que la température tombe à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de zéro. Jusqu'à cette température, une mince couche d'eau liquide enveloppe les cristaux de glace qui croissent entre les minuscules fragments de roches et d'argile qui composent le sol.

De l'eau provenant des profondeurs du sol alimente la croissance des cristaux de glace. L'eau chaude a plus d'énergie libre que l'eau froide et, comme tous les corps, elle tend vers un état d'énergie minimale. Dans les sols gelés, cette évolution engendre un phénomène de «pression thermomoléculaire» : l'eau chaude est attirée vers les endroits où elle peut perdre une partie de son énergie en formant de la glace. Cette migration est facilitée quand l'eau

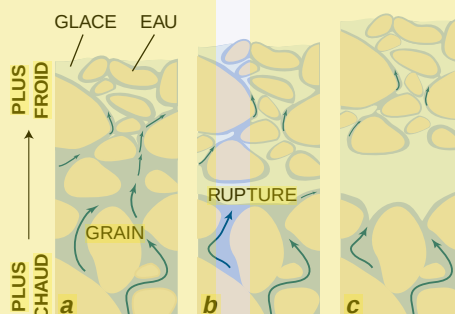
peut utiliser un passage déjà créé, à savoir le film liquide sur les surfaces gelées.

L'eau continue ainsi à envahir les espaces entre les grains de gelé jusqu'à ce que la pression de l'eau déjà présente soit égale à la pression de l'eau qui arrive. La force d'adhérence entre les grains de glace et de sol atteint 12,5 kilogrammes par centimètre carré par degré au-dessous de zéro, jusqu'à ce que la glace gèle complètement. La plupart

du temps, le sol craque bien avant qu'une telle pression soit atteinte. L'eau coule alors dans le vide, où elle gèle. La couche de glace grossit à mesure que de l'eau arrive et gèle, et finit par soulever le sol au-dessus d'elle. À Washington, Larry Wilen a fabriqué un appareil simple avec lequel il mesure directement les forces de soulèvement par le gel : dans une cavité circulaire, un cristal de glace est entouré d'eau ; la cavité est fermée d'un côté par une plaque de verre, de l'autre

par une feuille de plastique. Entre 0 °C et -1 °C, un film d'eau se forme là où la glace touche le plastique.

L. Wilen refroidit la surface du disque de sorte que le centre soit plus froid. L'eau du bord du disque, plus chaude, coule le long du film liquide vers le centre du cristal de glace, mue par la pression thermomoléculaire. Une partie de l'eau gèle en chemin, soulevant la feuille de plastique, de la même manière que l'expansion des couches de glace sous terre déforme le sol. En nous fondant sur cette expérience, nous avons construit une théorie qui explique le mouvement microscopique de ce film liquide responsable du débeurrage.



LE DÉBEURRAGE crée ces cercles de pierres sur l'île du Spitzberg. Le phénomène commence quand l'eau du sol gèle. De l'eau plus chaude monte le long des films liquides qui recouvrent alors la glace (a). Quand la pression de l'eau entre les grains de sol et de glace est supérieure à la pression due à l'eau qui arrive, le sol craque (b). L'eau s'engouffre et gèle, soulevant le sol (c).

et celle de la fusion par frottements depuis plus de 100 ans, mais ces deux théories n'expliquent ni la dynamique du phénomène de soulèvement du sol par le gel ni l'électrification des nuages, qui sont deux effets importants de la glace dans l'environnement (voir l'encadré ci-dessous).

Les surfaces humides

Dès les années 1950, des physiciens ont repris l'étude de la fusion de surface, qui a finalement été obser-

vée en 1985 : à l'Institut de physique atomique et moléculaire d'Amsterdam, Joost Frenken et Friso van der Veen ont envoyé des faisceaux d'ions sur un cristal de plomb en le chauffant à une température proche de sa température de fusion (328 °C) ; en analysant comment les ions étaient réfléchis par le matériau, les deux physiciens ont déduit que les atomes de surface devenaient de plus en plus désordonnés, se comportant comme les particules d'un fluide dès la tem-

pérature de 318 °C. Le film s'épaississait progressivement, et le cristal finissait par fondre dans la masse à partir de la surface. Puis, en 1986, avec Da-Ming Zhu, l'un de nous (G. Dash) a montré que de minces couches d'argon et de néon subissent des changements de phase progressifs aux températures inférieures à leur température de fusion normale. Depuis, les physico-chimistes ont montré que la plupart des solides subissent cette fusion de surface.

LES COLLISIONS ÉLECTRISANTES

En été, la foudre précède souvent la grêle. En effet, la glace est présente dans les cumulo-nimbus qui constituent les fronts orageux et qui jouent un rôle central dans la production des éclairs. Les Anciens pensaient que la foudre était déclenchée par les dieux en colère. Plus tard, elle a tenu une place importante dans les recherches sur l'électricité. Toutefois on comprend seulement depuis peu comment la microphysique de la glace détermine le développement des charges électriques dans les nuages. Cette électrification résulte de la présence d'un film liquide (d'une épaisseur de quelques molécules) à la surface des cristaux de glace qui sont en mouvement dans les nuages.

Les éclairs partent de la base des nuages, où la température est assez basse pour que les gouttelettes d'eau gèlent. Emportés par des courants d'air ascendants, ces minuscules cristaux de glace heurtent la grêle qui tombe vers le sol. Les cristaux de glace emportent une charge électrique positive, ce qui confère à la grêle une charge négative équivalente. Ainsi une différence de potentiel considérable s'établit dans les nuages, entre des charges positives, en haut des nuages, et des charges négatives, en bas.

Les physiciens avaient établi cette théorie grâce à des observations et à des simulations en laboratoire, mais ils ne savaient pas calculer la charge électrique des nuages. En 1984, Greg Turner et David Stow, de l'Université d'Auckland, ont proposé que les films d'eau qui couvrent la surface des cristaux de glace et des grêlons jouent un rôle dans le processus de charge. Cinq ans plus tard, avec notre collègue Marcia Baker, l'un de nous (G. Dash) a proposé un mécanisme plus détaillé de cet effet : la charge électrique est transmise avec l'eau quand celle-ci passe des grêlons aux cristaux de glace pendant la collision.

Dans notre laboratoire, Brian Mason a testé cette hypothèse en 1998 : il a pesé des grains de glace avant et après une collision, en utilisant deux microbalances à cristaux de quartz, qui détectent des changements de masse de l'ordre de quelques dix milliardièmes de

grammes ; il déterminait ainsi la masse infime de quelques couches de molécules d'eau. Il a également mesuré les courants électriques qui circulaient pendant les collisions afin de chercher un transfert de charge associé au transfert de masse. Comme le prédisait la théorie de M. Baker et G. Dash, un transfert de masse est toujours associé à un déplacement de charges. Le cristal de glace (épaissi par la collision d'une épaisseur de quelques centaines de molécules seulement, sur une surface de un centième de millimètre carré) acquiert simultanément une charge positive.

B. Mason a observé que la masse transférée est bien supérieure à ce que laisse

prévoir la théorie élémentaire de la fusion de surface. Cette différence entre les prévisions et les expériences nous a conduits à chercher une description plus rigoureuse des collisions qui électrisent les nuages. Nous supposons

qu'un mécanisme augmente la tendance de la glace à se liquéfier, même aux températures inférieures à sa température de fusion : une violente collision perturbe assez le réseau moléculaire solide de la glace pour produire du liquide supplémentaire, même à dix degrés (ou plus) sous la température de fusion. Les collisions, ainsi que les impuretés – tel le dioxyde de carbone, que l'on trouve en grande quantité sur la glace –, expliquent la présence d'un film d'eau épais à la surface des cristaux de glace. En raison de l'épaisseur du film, on obtient une libération de masse liquide et de charge plus importante que dans un contact ordinaire entre deux surfaces glacées.

La formation d'un liquide, après un tel impact, libère également des ions chargés négativement qui s'étaient accumulés près

de la surface du cristal, à mesure qu'il grossissait. Pendant une collision, les cristaux de glace et les grêlons partagent leurs couches liquides, et les cristaux qui grossissent perdent une partie de leurs ions négatifs. Nous soupçonnons que c'est ainsi que les grêlons qui traversent la base du nuage pendant leur chute accumulent la charge négative qui produit les éclairs.



LES ÉCLAIRS proviennent de la base de nuages orageux, où les grêlons qui tombent accumulent une charge négative au cours de collisions avec des cristaux de glace qui montent au sein de courants ascendants (cartouche).

Frank A. Carr, Bruce Coleman Inc.