

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'électrisation 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 électrisation 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).



À l'occasion de l'année mondiale des mathématiques, revivez l'ambiance d'une époque à travers la vie et les travaux de ceux qui ont fait les mathématiques

ABEL

Un mathématicien
romantique
Code 0621-140 F
368 pages



FOURIER

Créateur de la
physique
mathématique
Code 1213-240 F
768 pages



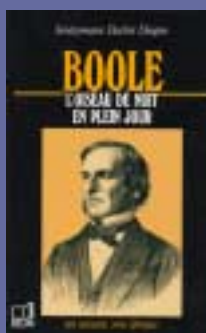
HARDY

L'apologie d'un
mathématicien
Code 0530-120 F
192 pages



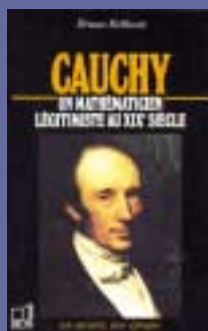
BOOLE

Le père du calcul
informatique
Code 1120-120 F
264 pages



CAUCHY

Un mathématicien
légitimiste
au XIX^e siècle
Code 0510-120 F
224 pages



KOVALEVSKAÏA

L'aventure d'une
mathématicienne
Code 1458-120 F
280 pages

BELIN

Voir bon de commande page 98

La glace, également, est couverte d'une mince couche d'eau. Plusieurs équipes ont suivi la fusion de surface de la glace en laboratoire. Toutefois, ils ne trouvent pas tous la même relation entre la température et l'épaisseur de la couche fondue. En effet, les diverses techniques utilisées ne mesurent pas les mêmes phénomènes. Les techniques optiques, par exemple, détectent des différences de densité entre la couche liquide et la glace solide à partir de différences de réflexion de la lumière. D'autre part, on obtient des informations sur la structure de la surface du cristal en mesurant la dispersion des rayons X.

Un autre phénomène est également à l'origine de différences entre les résultats d'expériences pourtant analogues : la couche liquide est fortement perturbée par les impuretés dissoutes dans l'eau. Or des impuretés de l'air ambiant, essentiellement des sels et du dioxyde de carbone, pénètrent dans les instruments et s'accumulent à la surface de la glace pendant la prise en glace. Nous commençons seulement à étudier leur influence sur la fusion de surface, mais une étude théorique réalisée par l'un de nous (J. Wettlaufer) indique que les impuretés favorisent la fusion de surface : la glace solide semble rejeter efficacement les impuretés, qui s'introduisent difficilement dans le réseau cristallin ; elles s'accumulent alors dans la couche liquide.

Ainsi, plus de 150 ans après les premières observations des minces couches de liquide à la surface de la glace par Faraday, nous commençons tout juste à clarifier les mécanismes physiques responsables du caractère glissant de la glace, de ses propriétés d'adhérence et de son énorme pouvoir de destruction. Beaucoup de questions restent ouvertes, mais nous savons qu'une meilleure connaissance de la microphysique de la glace nous permettra de mieux comprendre ses effets sur l'environnement. Le soulèvement du sol par le gel et l'électrisation des nuages ne sont que deux des phénomènes qui semblent dus à la couche liquide qui entoure la glace.

John WETTLAUFER et Greg DASH sont physiciens à l'Université de l'État de Washington.

Ice Physics and the Natural Environment, sous la direction de J.S. Wettlaufer, J.G. Dash et N. Untersteiner, NATO ASI Series I : Global Environmental Change, vol. 56, Springer-Verlag, 1999.