

toutes bien arrimées à leurs quatre voisines les plus proches. En revanche, quand nous arrivons près de la surface du cristal, le réseau se déforme, car les molécules externes sont en contact direct avec l'environnement non structuré que constitue l'air ambiant ; ces molécules de surface sont tenues par moins de liaisons chimiques, de sorte que leurs vibrations ont raison de leur ordonnancement. À une température suffisamment élevée (mais inférieure à la température de fusion normale), les molécules forment une couche comparable à du liquide (*voir le schéma de la page ci-contre*).

L'idée de l'existence d'un film liquide à la surface de la glace n'est

pas nouvelle, mais l'origine de cette couche était mal interprétée. Tous ceux qui ont déjà pris part à une bataille de boules de neige savent que, pour fabriquer un projectile efficace, on doit utiliser de la neige mouillée ; la neige sèche ne « colle » pas. C'est également vrai pour les « boules de sable » que l'on fait au bord de la mer. Dans les années 1630, René Descartes analysa ainsi la « tenue » de la glace. Puis, 200 ans plus tard, le même sujet captiva le physico-chimiste anglais Michael Faraday. Après 20 années d'analyse de la glace et de la neige, Faraday écrivit : « Quand on presse une poignée de neige mouillée, elle gèle et forme un bloc (contenant de l'eau) qui ne se disso-

cie pas comme le ferait une boule de sable ou d'un autre matériau. » Le journal de Faraday conserve les traces des premières études de ce que l'on nomme aujourd'hui la fusion de surface. Faraday avait conclu qu'une mince couche d'eau enveloppant les flocons de neige les collait en gelant ; cette couche lui semblait être une caractéristique naturelle de la glace à une température peu inférieure à sa température de fusion.

Faraday et son ami John Tyndall réalisèrent indépendamment des expériences qui leur montraient l'existence d'un film liquide à la surface de la glace à l'équilibre thermique, mais certains de leurs puissants contemporains étaient sceptiques. En 1849,



Richard Hamilton Smith, Corbis

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.

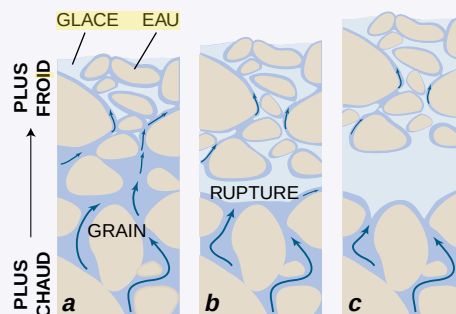
De l'eau provenant des profondeurs du sol alimente la croissance des cristaux de glace. L'eau chaude a plus d'énergie libre que l'eau froide et, comme tous les corps, elle tend vers un état d'énergie minimale. Dans les sols gelés, cette évolution engendre un phénomène de «pression thermomoléculaire» : 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 sol 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).