

LES AUTEURS



**JEAN-MICHEL COURTY
ET ÉDOUARD KIERLIK**
professeurs de physique
à Sorbonne Université, à Paris

SUBLIMES SUBLIMATIONS SOLAIRES

Dans de bonnes conditions, la lumière du soleil sculpte la glace en des structures étonnantes. Les physiciens cherchent les ingrédients essentiels pour les expliquer.

Dans un de ses ouvrages paru en 1839, Charles Darwin décrit comment lors de sa traversée des Andes entre le Chili et l'Argentine, il dut se frayer un chemin dans un champ de « pénitents de neige », c'est-à-dire des minces lames de neige ou de glace de plus de 1 mètre de hauteur assez régulièrement espacées et orientées vers le Soleil. Si ses voyages l'avaient mené vers de grandes étendues gelées, comme le lac Baïkal, en Sibérie, le père de la théorie de l'évolution aurait pu observer des *zen stones*, des pierres qui trônent sur leur petit piédestal de glace, quelques centimètres au-dessus de la surface. Qu'ont en commun ces deux types de structures ? Les modèles développés depuis une dizaine d'années par les physiciens pour en comprendre l'origine répondent.

Premier indice, si ces caprices de la nature ne se ressemblent guère, ils ont en

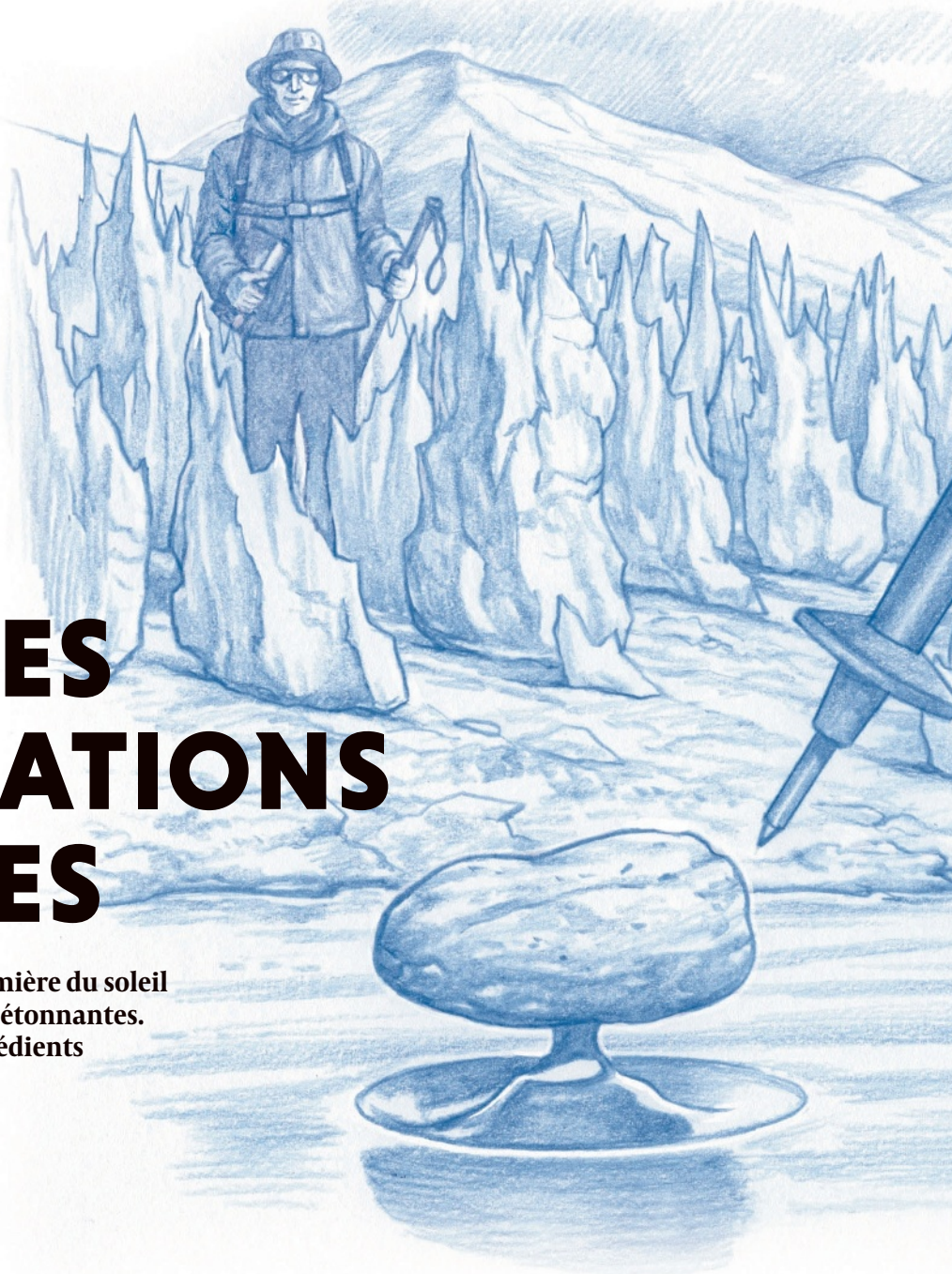
commun de naître sous des climats très froids et secs. Sur de longues périodes, la température y est systématiquement très en dessous de 0 °C et aucune précipitation ne se manifeste.

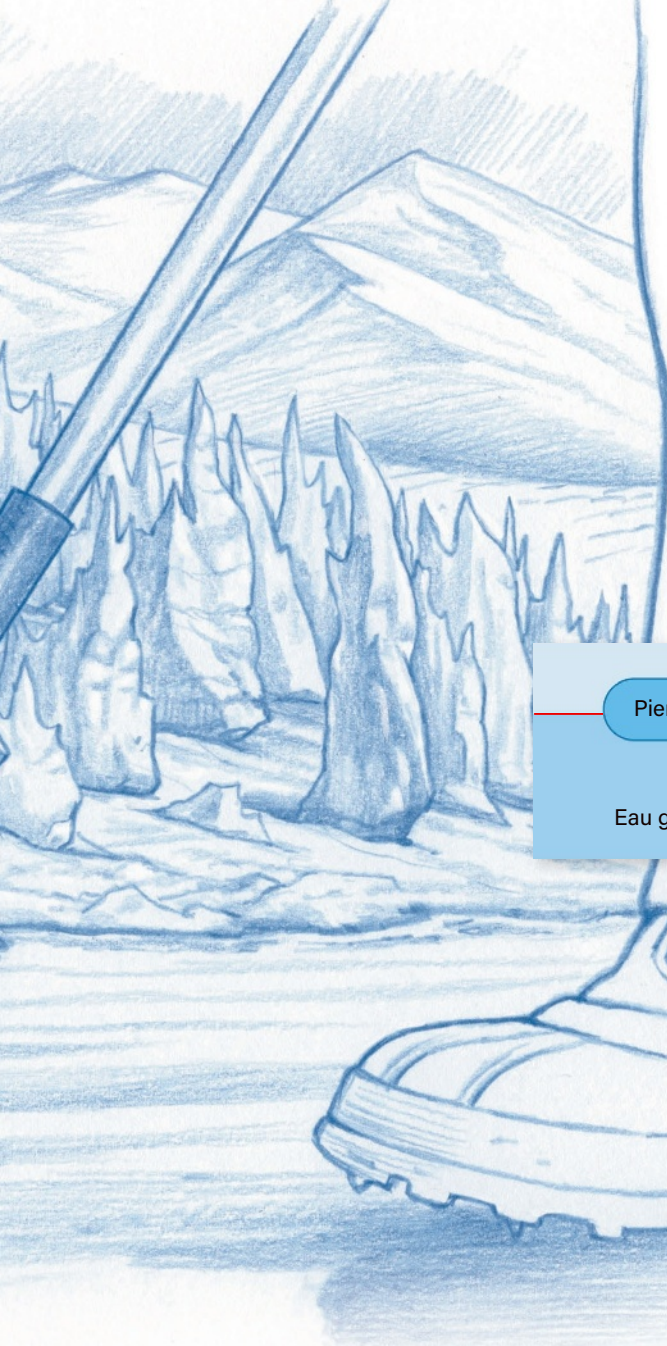
ON NE FOND PAS, ON SUBLIME

Une fois formée au début de l'hiver, la surface du manteau neigeux ou de la couche de glace ne bénéficie plus d'aucun apport de neige et elle ne fond jamais, même partiellement. Reste-t-elle immuable ? Non. Au-delà du tassement et des métamorphoses qui en résultent, la neige peut se sublimer, c'est-à-dire passer directement de l'état solide (glace) à l'état de gaz (vapeur d'eau), un changement d'état que permet l'air froid et sec. Cette sublimation peut se produire à des températures négatives quand la quantité de vapeur d'eau dans l'air est inférieure à

un certain seuil : 2,2 grammes par mètre cube à -10 °C (0,86 g seulement à -20 °C). Elle exige cependant un apport d'une grande quantité d'énergie, car tout se passe comme si on faisait d'abord fondre la glace puis évaporer le liquide obtenu. Il convient donc d'ajouter les énergies requises par les deux transitions, la fonte et la vaporisation ! Vers 0 °C, on obtient 2,84 kilojoules par gramme, soit près de six fois l'énergie nécessaire à la seule fusion.

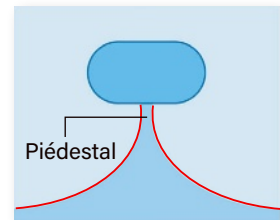
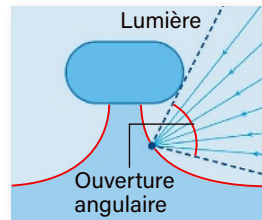
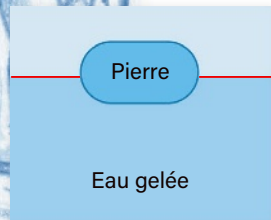
Une telle énergie est-elle disponible sous ces contrées ? Oui, grâce au Soleil ! Notre étoile fournit en effet au zénith une puissance lumineuse de 1 kilowatt par mètre carré au sol quand l'air est pur et transparent. Imaginons que cette lumière illumine une couche de glace parfaitement plane. Une partie est réfléchiée et renvoyée vers le ciel. Le pourcentage de lumière réfléchiée (l'albédo) est de l'ordre de 60% pour la glace. C'est





« ZEN STONE », MODE D'EMPLOI

Posée sur une surface d'eau gelée, une pierre fait de l'ombre à la glace sur laquelle elle repose. À mesure que l'ensoleillement se prolonge, la lumière qui arrive en un point de cette surface sous la pierre provient d'une partie limitée du ciel, définie par une ouverture angulaire. La part absorbée fournit de l'énergie à la glace, qui passe de l'état solide à l'état gazeux, c'est une sublimation. Peu à peu, la glace se creuse jusqu'à ne plus former qu'un piédestal à la pierre.



Entre champ de pénitents (au second plan) et zen stone (au premier plan), la nature joue à sculpter la neige et la glace, pour la plus grande perplexité des premiers glaciologues... mais pas des physiciens d'aujourd'hui.

donc 400 watts par mètre carré qui restent disponibles pour être diffusée dans et absorbée par la glace et constituer l'apport d'énergie nécessaire à la sublimation. À raison de 8 heures par jour (nous sommes en hiver!), l'épaisseur de la glace diminue au rythme de 4,5 millimètres par jour soit 13,5 centimètres par mois. Même en tenant compte des nuages et de la latitude des lieux, qui peuvent diviser l'estimation précédente par un facteur 2 ou 3, on a de quoi sculpter le couvert de glace pendant la durée de l'hiver.

FAIRE DE L'OMBRE POUR TRÔNER

Maintenant que le pourquoi (la sublimation) et le comment (l'énergie solaire) sont bien identifiés, comment expliquer les structures qui en résultent? Dans le cas des *zen stones*, un seul

mécanisme suffit: la pierre fait de l'ombre à la glace qu'elle recouvre et l'empêche de recevoir de l'énergie contrairement à la glace environnante qui se sublime. La surface gelée régresse au fil des jours tandis que la pierre, immobile, semble s'élever au-dessus sur son piédestal de glace.

Avec un Soleil en permanence au zénith au-dessus du Baïkal, le piédestal serait un cylindre qui prendrait appui sur les contours de la pierre. Ce n'est pas ce que l'on observe. Pourquoi? La première idée est que la course du Soleil l'hiver sous une latitude de 53° est limitée et son élévation par rapport à l'horizon est basse. La lumière arrive donc très inclinée sur la surface du lac et si ombre il y a, il s'agit d'une ombre portée. La sculpture obtenue devrait donc garder la trace d'un éclairage privilégié depuis le sud et de son caractère oblique. Or les piédestaux ont des formes de cônes, à peu près

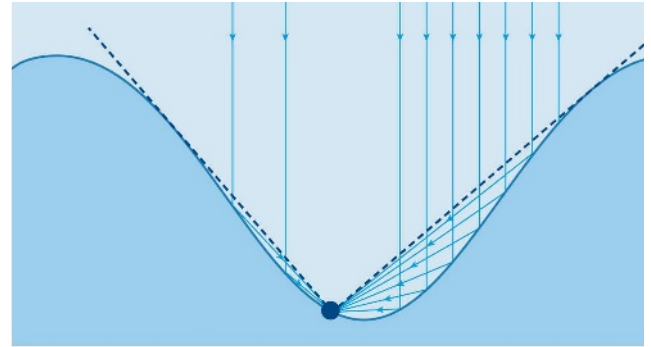
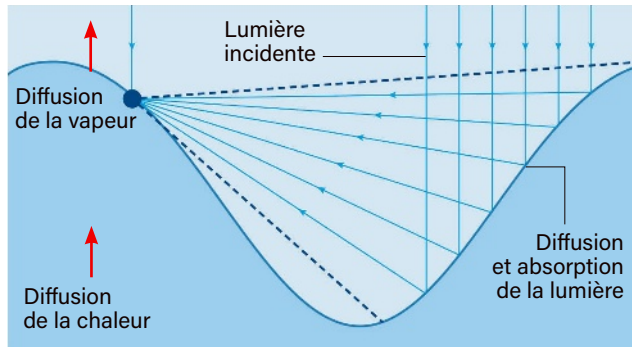
symétriques par rapport à la verticale. La raison en est la couverture nuageuse, qui bloque l'irradiation directe depuis le Soleil et produit une irradiation diffuse tellement importante que l'éclairage est quasiment isotrope: on reçoit la même puissance lumineuse quelle que soit la direction dans laquelle on regarde.

Pour un point éloigné de la pierre, la lumière arrive alors de la totalité du ciel et il reçoit donc l'intégralité de la puissance lumineuse et la surface se sublime en conséquence. En revanche à proximité

Les auteurs ont notamment publié: **En avant la physique!**, une sélection de leurs chroniques (Belin, 2017).



LA PROCESSION DES PÉNITENTS



Les pénitents résultent de plusieurs phénomènes : l'absorption et la diffusion de la lumière, la diffusion de la vapeur d'eau dans l'air et celle de la chaleur (de l'intérieur vers l'extérieur) au sein de la neige. La lumière reçue par réflexion, et donc l'énergie, en un point provient d'une zone plus ou moins étendue selon que l'on se situe sur une bosse (à gauche) ou dans un creux (à droite). En conséquence, la neige se sublime plus vite dans le second cas que dans le premier, ce qui accentue les ondulations de départ jusqu'à former des parois. À cela s'ajoute l'effet du vent ou des turbulences de l'air pour expliquer la périodicité des structures : moins l'air est brassé, plus la période est élevée.

de la pierre (au tout début) ou ensuite sous elle, on a un effet d'ombre plus ou moins fort, et la puissance lumineuse est plus faible (voir la figure page précédente), la glace se sublime moins vite et la lumière sculpte un piédestal qui s'affine au cours du temps jusqu'à former un mince pilier. Ce modèle proposé par les physiciens Nicolas Taberlet et Nicolas Plihon, de l'École normale supérieure de Lyon et du CNRS, aussi simple soit-il (il fait appel *in fine* uniquement à la géométrie) rend compte de façon convaincante des formes observées.

DES PÉNITENTS EXIGEANTS

Le cas des pénitents de neige apparaît bien plus compliqué. Comment une structure à peu près périodique peut-elle surgir de ce qui n'était au départ qu'une épaisse couche de neige? D'abord, puisque nous sommes en haute altitude avec un ciel bien dégagé, ces structures gardent la trace de la direction du soleil. Les lames sont en effet parallèles à l'éclairement au midi solaire: dans cette orientation, elles interceptent un minimum d'irradiation directe, ce qui augmente leur durée de vie.

Le mécanisme essentiel a été trouvé par la physicienne Meredith Betterton, aujourd'hui à l'université du Colorado, à Boulder, dans les années 2000: un point situé dans un creux du couvert neigeux reçoit plus de puissance lumineuse qu'un point situé à un sommet, car il reçoit plus de lumière réfléchiée par les points des surfaces environnantes (voir la figure ci-dessus).

En conséquence, la neige se sublime plus vite dans les creux qu'aux sommets: cela amplifie les ondulations de départ jusqu'à former des parois relativement abruptes. Mais qu'en est-il de la périodicité, car ce mécanisme ne fait pas intervenir la taille, mais la forme?

Philippe Claudin, de l'ESPCI, à Paris, et ses collègues ont proposé une solution en 2015. Ils ont remarqué que puisque la sublimation augmentait la quantité de vapeur d'eau au voisinage de la surface, la façon dont cette vapeur d'eau était évacuée devait jouer un rôle crucial dans la cinétique de la sublimation, comme le vent par exemple, qui favorise la sublimation parce qu'il balaye en permanence la vapeur d'eau formée à la surface.

Les physiciens ont alors montré que l'amplification des ondulations était favorisée pour une distance entre deux crêtes adjacentes qui est fonction de l'épaisseur d'air sur laquelle l'air redevient sec. Pour une épaisseur de quelques millimètres, on obtient des tailles de l'ordre de 1 mètre, compatible avec les observations. Ils ont aussi mieux décrit le mécanisme de la sublimation de la neige: la lumière n'est pas absorbée par la surface mais au contraire pénètre l'intérieur où elle est énormément diffusée (d'où la couleur blanche de la neige) et absorbée progressivement. Elle chauffe donc en profondeur et l'intérieur devient plus chaud que la surface, de quelques degrés. C'est le transfert thermique du chaud vers le froid qui fournit l'énergie de la sublimation. ■

BIBLIOGRAPHIE

N. Taberlet et N. Plihon, **Sublimation-driven morphogenesis of Zen stones on ice surfaces**, *PNAS*, 2021.

P. Claudin *et al.*, **Physical processes causing the formation of penitents**, *Phys. Rev. E*, 2015.

M. D. Betterton, **Theory of structure formation in snowfields motivated by penitents, suncups, and dirt cones**, *Phys. Rev. E*, 2001.