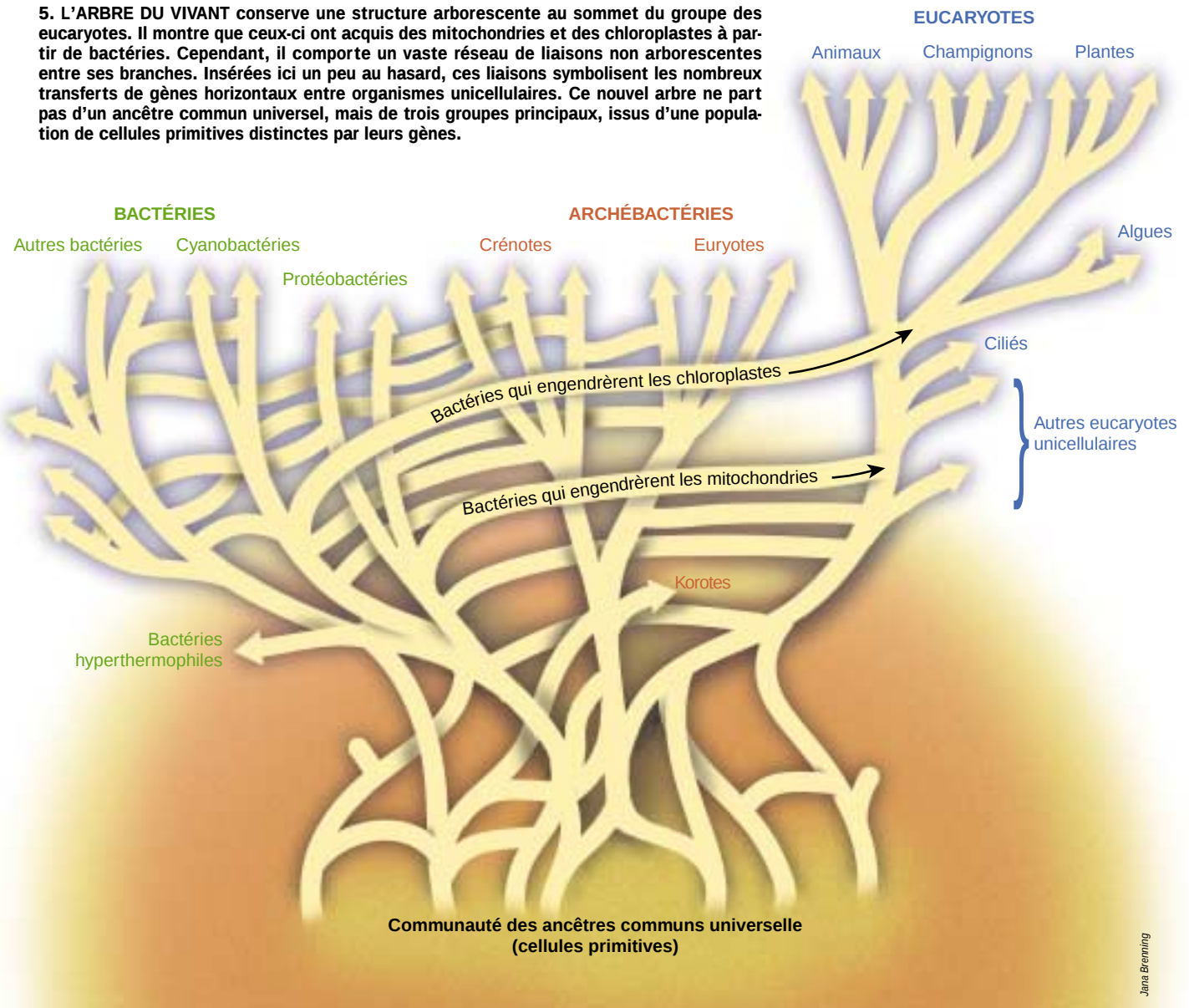


5. L'ARBRE DU VIVANT conserve une structure arborescente au sommet du groupe des eucaryotes. Il montre que ceux-ci ont acquis des mitochondries et des chloroplastes à partir de bactéries. Cependant, il comporte un vaste réseau de liaisons non arborescentes entre ses branches. Insérées ici un peu au hasard, ces liaisons symbolisent les nombreux transferts de gènes horizontaux entre organismes unicellulaires. Ce nouvel arbre ne part pas d'un ancêtre commun universel, mais de trois groupes principaux, issus d'une population de cellules primitives distinctes par leurs gènes.



gènes ancestraux, à la racine de chaque arbre, figureraient tous dans le génome de l'ancêtre commun universel. Cependant, de nombreux transferts se sont produits : les arbres des familles de gènes diffèrent, même si certains ont une topologie en partie analogue. L'ancêtre commun universel est un mythe.

Selon C. Woese, «l'ancêtre commun universel n'était pas un organisme particulier qui aurait engendré une lignée unique. C'était plutôt un conglomerat de cellules primitives qui ont évolué ensemble jusqu'à l'apparition de plusieurs lignées distinctes et ont finalement engendré trois groupes primitifs (les bactéries, les archéobactéries et les eucaryotes)». Autrement dit, les cellules primitives avaient peu de gènes, et elles étaient très différentes les unes des autres. En échangeant leurs gènes, ces

cellules primitives se sont communiqué leurs facultés. Finalement, cet éventail de cellules éclectiques et variables a fusionné en trois groupes fondamentaux qui restent reconnaissables, car la plupart (mais pas l'ensemble) des transferts de gènes de l'époque se perpétuent dans chaque groupe.

Cette idée décourage certains microbiologistes, car elle ébranle l'arbre du

vivant. Toutefois, la biologie a évolué conformément aux canons de la science. Le séquençage des gènes et leur analyse, par des méthodes de phylogénie moléculaire, ont montré que l'hypothèse attrayante de l'arbre universel unique était trop schématique. Son abandon laisse le champ libre à de nouvelles hypothèses, dont nous ignorons encore les tenants et les aboutissants.

Ford DOOLITTLE est professeur de biochimie et de biologie moléculaire à l'Université Dalhousie (Halifax, Canada).

Carl WOESE, *The Universal Ancestor*, in *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 95, n° 12, pp. 6854-6859, 9 juin 1998.

W. Ford DOOLITTLE, *You Are What You Eat : A Gene Transfer Ratchet Could Account for Bacterial Genes in Eukaryotic Nuclear Genomes*, in *Trends in Genetics*, vol. 14, n° 8, pp. 307-311, août 1998.

W. Ford DOOLITTLE, *Phylogenetic Classification and the Universal Tree*, in *Science*, vol. 284, pp. 2124-2128, 25 juin 1999.

Quand l'eau refuse de geler

JOHN WETTLAUFER • GREG DASH

Une mince couche d'eau subsiste à la surface de la glace, même aux températures bien inférieures à 0 °C. Cette couche permet de faire du patin à glace et favorise l'électrification des nuages d'orage.

Quand l'hiver s'annonce, on isole les conduites d'eau les plus exposées afin d'empêcher l'eau de geler à l'intérieur des canalisations : la glace étant moins dense que l'eau, elle ferait éclater les tuyaux.

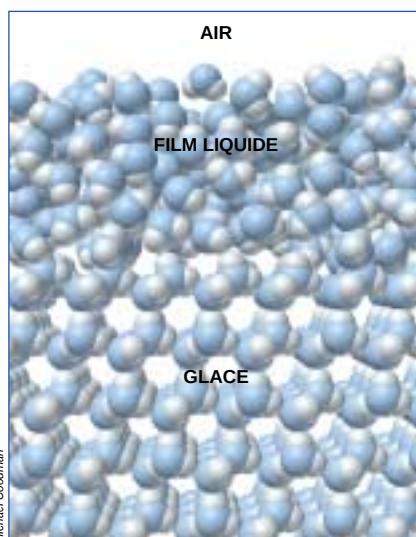
La solidification de l'eau et la fonte de la glace sont les exemples les plus communs, et parmi les plus spectaculaires, de changements de phase. Certains aspects de ces transformations restaient mystérieux. Ces 15 dernières années, les physico-chimistes ont découvert que les analyses avaient négligé la présence d'une couche d'eau dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques diamètres moléculaires, à la surface de la glace. Cette pellicule correspond à un état naturel de la glace solide ; formée par «fusion de surface», elle possède certaines des caractéristiques structurales du solide situé sous elle, mais elle a la mobilité d'un fluide. Malgré sa minceur, cette pellicule intervient de façon très importante dans les phénomènes de fusion et de prise en glace. Servant à la fois de voie d'écoulement de l'eau et de porteur de charge électrique, elle est capable de soulever des pierres et de faire claquer des éclairs dans le ciel.

Boules de neige et patins à glace

Généralement les solides fondent de l'extérieur vers l'intérieur : un morceau de beurre posé sur un fourneau ou un morceau de soudure sur un fer à souder se liquéfie d'abord en surface, parce que l'extérieur est chauffé par l'environnement ; puis cette couche

externe fondue chauffe une couche plus à l'intérieur, et ainsi de suite. La fusion de surface est un effet plus subtil : une couche de liquide se forme à la surface des solides même quand leur température est inférieure de plusieurs dizaines de degrés à leur température de fusion.

Pour comprendre le mécanisme de la fusion de surface, imaginons que nous soyons dans un cristal de glace, où le réseau rigide résulte de la répétition d'un motif fixe (une «maille») composé de quelques molécules d'eau. En nous déplaçant du centre vers la surface, nous rencontrons périodiquement des molécules d'eau,



Michael Goodman

DES FILMS D'EAU LIQUIDE présents à la surface de la glace permettent de patiner, même à des températures inférieures à 0 °C. Ces films lubrifiants se forment parce que les molécules d'eau de la surface sont moins tenues que les molécules de la masse.



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 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.

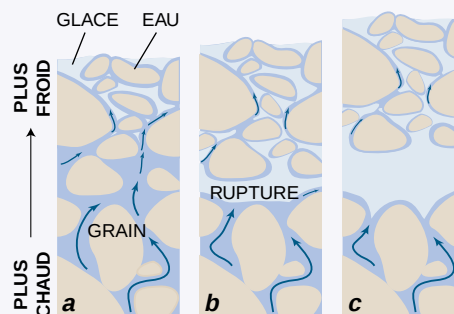
De l'eau provenant des profondeurs du sol alimente la croissance des cristaux de glace. L'eau chaude a plus d'énergie libre que l'eau froide et, comme tous les corps, elle tend vers un état d'énergie minimale. Dans les sols gelés, cette évolution engendre un phénomène de «pression thermomoléculaire»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

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



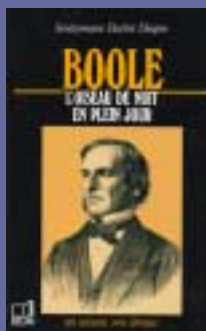
HARDY

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



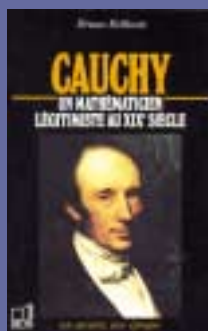
BOOLE

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

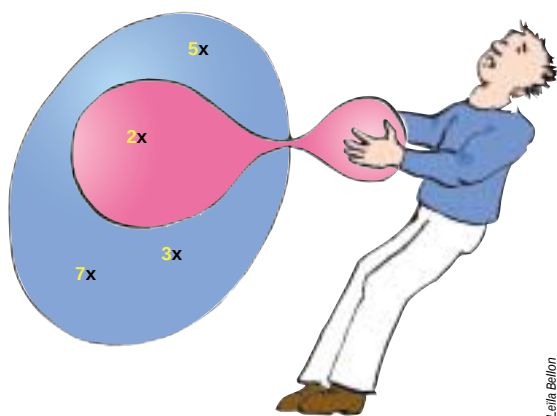
La glace, également, est couverte d'une mince couche d'eau. Plusieurs équipes ont suivi la fusion de surface de la glace en laboratoire. Toutefois, ils ne trouvent pas tous la même relation entre la température et l'épaisseur de la couche fondue. En effet, les diverses techniques utilisées ne mesurent 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.



La stratégie des sous-ensembles

IAN STEWART

Qui trouvera la stratégie gagnante d'un nouveau jeu, qui combine la théorie des ensembles et la topologie ?

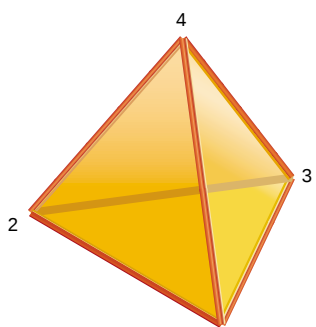
Les Babyloniens expliquaient déjà les notions mathématiques grâce à des jeux et à des énigmes : les archéologues ont retrouvé des problèmes d'arithmétique gravés sur des tablettes d'argile. Depuis, les mathématiques ont progressé, mais elles engendrent toujours des jeux. À l'Université de Berkeley, David Gale en a inventé un qu'il a décrit dans son livre *Games of no chance* (Cambridge University Press) et qui allie la théorie des ensembles et la topologie. Ce jeu devrait intéresser tous les amateurs de jeux mathématiques, car personne n'a encore découvert de stratégie gagnante.

Ce jeu considère des ensembles, c'est-à-dire des collections d'objets, nommés éléments. Lorsqu'un ensemble a un nombre fini d'éléments, on peut définir

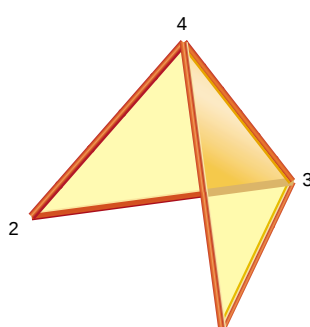
l'ensemble «en extension», par une liste. Par exemple, $\{2, 3, 5, 7\}$ est l'ensemble des nombres premiers inférieurs à 10. Un ensemble X est un sous-ensemble d'un ensemble Y quand tous les éléments de X appartiennent à Y : l'ensemble $\{3, 5, 7\}$ des nombres premiers impairs inférieurs à 10 est un sous-ensemble de l'ensemble $\{2, 3, 5, 7\}$. Chaque ensemble est un sous-ensemble de lui-même, et un sous-ensemble de Y est strict lorsqu'il est différent de Y . Un sous-ensemble peut ne contenir qu'un seul élément : $\{2\}$ est l'ensemble des nombres premiers pairs. Le sous-ensemble complémentaire de X dans Y est composé des éléments de Y qui n'appartiennent pas à X : $\{2\}$ est le complémentaire de $\{3, 5, 7\}$ dans l'ensemble des nombres premiers inférieurs à 10.

Enfin, un sous-ensemble peut n'avoir aucun élément, c'est l'ensemble vide.

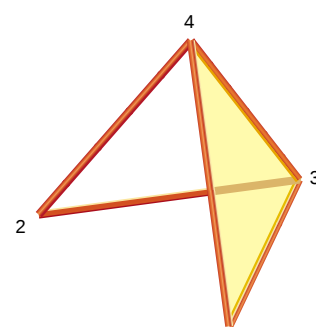
Le jeu de D. Gale est nommé «un sous-ensemble à emporter». Il se joue à partir d'un ensemble fini S , par exemple l'ensemble des entiers de 1 à n $\{1, 2, 3, \dots, n\}$. À chaque tour, un joueur enlève de S un sous-ensemble strict non vide, tel qu'il ne contienne aucun sous-ensemble déjà prélevé pendant la partie. Le premier qui ne peut plus jouer a perdu. Un moyen pratique de jouer consiste à composer un tableau à n colonnes, une par élément de S . Sur une ligne, on marque une croix dans les colonnes correspondant aux éléments du sous-ensemble pris par un joueur. Ainsi, une ligne de croix représente le choix d'un joueur.



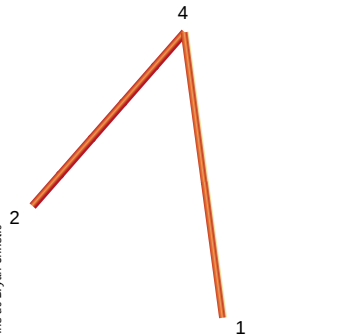
a - POSITION INITIALE



b - ANASTASIA CHOISIT $\{1, 2\}$



c - BARBARA PREND $\{2, 3, 4\}$



d - ANASTASIA CHOISIT $\{3\}$

2

1

1

e - BARBARA PREND $\{4\}$

f - ANASTASIA CHOISIT $\{2\}$

g - BARBARA PREND $\{1\}$

1. Le jeu du «un sous-ensemble à emporter» peut être représenté géométriquement. Pour $n = 4$, la position initiale est un tétraèdre (a). Les deux joueuses, Anastasia et Barbara, choisissent alternative-

ment un sous-ensemble dont les composants correspondants du tétraèdre (sommets, arêtes et faces) sont éliminés. Le joueur, ici Barbara, qui enlève le dernier élément gagne.