



Étoiles des neiges

JEAN-MICHEL COURTY • ÉDOUARD KIERLIK

La forme d'un flocon de neige est déterminée par les symétries de la molécule d'eau et les conditions atmosphériques pendant sa chute.

Après cette nue, il en vint une autre qui ne produisait que de petites roses ou roues à six dents arrondies...
René Descartes, *Les Météores*, 1637

Chaque flocon de neige est unique, que sa forme soit celle d'une plaquette, d'une étoile, d'un bouton de manchette ou d'une nouille. Ce particularisme intrigue les savants, les premiers à s'en étonner étant Johannes Kepler et René Descartes. Aujourd'hui, les physiciens savent quels mécanismes commandent la croissance cristalline de la glace. Pour les découvrir, nous suivrons, de la prime enfance à la maturité, la croissance d'un «peloton de glace», comme disait si joliment Descartes. Nous comprendrons alors mieux l'incroyable variété de la structure des flocons et l'origine des angles de 60° ou de 120° qu'elle arbore partout.

La naissance d'un flocon de neige s'accomplit sous les auspices de trois marraines : la vapeur d'eau, la température et... la poussière. La vapeur d'eau, tout d'abord, doit être suffisamment dense dans l'atmosphère pour qu'elle s'y condense à la première occasion. Elle se condense sous forme de glace, quand la température est inférieure à 0° C à partir d'une densité minimale de vapeur d'eau dans l'atmosphère, la densité de saturation. Cette saturation dépend de la température : elle est atteinte pour cinq grammes par mètre cube à 0° C, mais seulement pour un gramme par mètre cube à -18° C. Finalement, il faut aussi une poussière. La croissance cristalline s'amorce à partir d'un germe, soit une poussière, soit un microcristal de glace. Quand l'atmosphère est très propre, un tel cristal microscopique ne se forme pas facilement. La densité de vapeur d'eau

peut même dépasser quatre fois la valeur de saturation sans que la moindre glace ne se forme. À un certain niveau de sursaturation, toutefois, les chocs entre molécules d'eau finissent par créer des agrégats assez volumineux pour servir de support à la croissance cristalline. Dans les nuages de neige, la vapeur d'eau est rarement aussi dense : aussi, le plus souvent, la croissance de la glace s'amorce à la surface de poussières atmosphériques. La chute de neige dense que nous espérons pour Noël est, pour l'essentiel, une pluie de poussières atmosphériques que leur robe de glace contraint à la chute !

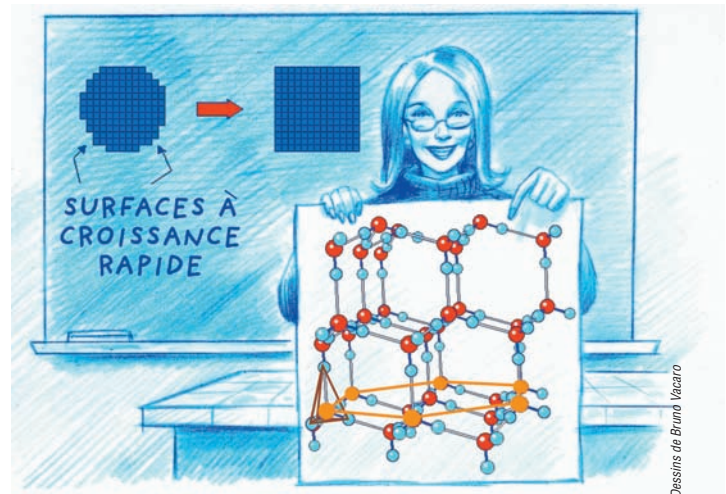
GERMES ATMOSPHÉRIQUES

Ces poussières atmosphériques sont, par exemple, de mica ou d'argile. De telles particules sont d'excellents «germes de croissance», car leur surface est faite d'atomes d'oxygène arrangés suivant une structure proche de celle de la glace. Une poussière est d'autant plus active qu'elle est grande et des particules d'un centième de millimètre se couvrent de glace dès que la saturation est atteinte. En revanche, les poussières submicrométriques que l'on trouve au-dessus de 4 000 mètres d'altitudes ne servent de germes que si l'atmosphère est nettement sursaturée.

Le cristal initial de glace mesure environ un centième de millimètre et sa forme est vaguement sphérique même si sa surface est très irrégulière à l'échelle moléculaire. La croissance qui se poursuit réduit très rapidement cette rugosité, car les molécules d'eau se fixent préférentiellement là où elles peuvent établir le plus de liaisons avec leurs semblables, donc



À un stade précoce de sa croissance, un flocon de neige prend la forme d'un prisme hexagonal, qui croîtra ensuite selon trois modes possibles.



Au sein de la glace, les molécules d'eau tendent à créer le plus possible de liaisons, ce qui explique la formation des plans cristallins.

Dessins de Bruno Vacaro

dans les creux. Petit à petit, la croissance engendre des plans cristallins et elle détermine leurs surfaces et leurs orientations de façon à produire une forme régulière et symétrique. Quelle est la raison moléculaire de ce comportement surprenant ? Aux pressions et aux températures atmosphériques, chaque molécule d'eau se trouve au centre d'un tétraèdre formé par ses quatre voisines et le réseau cristallin de la glace a une symétrie hexagonale (on comprend cette géométrie en regardant les tétraèdres «de dessus» : ils se projettent alors selon des triangles équilatéraux, qui accolés forment des hexagones). Le cristal qui résulte de la croissance est un prisme hexagonal, dont les faces supérieure et inférieure sont des hexagones (ce qui explique les angles de 120 et 60 degrés) et les facettes latérales des rectangles. Sa taille initiale est de l'ordre d'un cinquième de millimètre : ceux dont la croissance a abouti à une autre forme intègrent néanmoins des hexagones dans leur structure.

Dans l'étape suivante de la croissance, la nature de la surface de la glace joue un rôle dominant. Les molécules qui la constituent forment une couche désordonnée, quasi liquide. À l'échelle microscopique, cette couche conserve une sorte de mémoire de la structure des plans cristallins sous-jacents. À notre échelle, elle «lubrifie» la glace et la rend glissante ; c'est aussi par son intermédiaire que les flocons se collent lorsque nous formons des boules de neige. Nous savons cependant, qu'il est difficile de patiner ou de mettre la neige en boule par grand froid : cette observation nous indique que la couche superficielle quasi liquide n'existe pas quand il fait trop froid. Haute à peu près comme une molécule quand elle apparaît vers -12°C , elle gagne très vite en épaisseur quand la température croît. Vers 0°C , elle pénètre le cœur même du cristal : la glace s'est transformée en eau. Puisque la surface du cristal est quasi liquide, les molécules qui s'y déposent, peuvent s'y déplacer ensuite jusqu'à l'endroit le plus favorable (un creux !) avant de se fixer. Selon la température, ce processus de diffusion est plus ou moins lent, ce qui affecte la forme prise par le flocon.

L'HISTOIRE DÉTERMINE LA GÉOMÉTRIE

Ainsi, selon les conditions atmosphériques, les flocons, jusque-là tous jumeaux, adoptent une multitude de formes. Trois modes de croissance dominant. Les deux premiers sont commandés par la température : selon la valeur de celle-ci, ce sont soit les faces hexagonales, soit les facettes latérales, qui «poussent» le plus vite. Entre -10°C et -5°C , les bases hexagonales se développent plus que les facettes : à -6°C par exemple, cette vitesse de croissance est le double de celles des facettes latérales et le flocon a alors l'aspect d'une colonne. Aux températures supérieures à -5°C ou inférieures à -10°C en revanche, les facettes croissent plus rapidement que les faces hexagonales : elles poussent par exemple de 0,5 millimètre de millimètre par seconde à -13°C , soit quatre fois plus que ne le font les bases. Un flocon de neige qui reste à cette température pendant toute sa croissance prend la forme d'une plaquette hexagonale.

Le troisième mode de croissance est commandé par la concentration en eau de l'atmosphère où se forme le flocon. Plus la sursaturation est importante et plus le cristal croît vite. Lorsque la vitesse de croissance devient trop grande ou quand le cristal est devenu grand, les molécules d'eau qui se déposent n'ont guère le temps de migrer à la surface cristalline avant de se fixer. Il en est de même à très basse température lorsque la couche quasi liquide est absente. Puisqu'elles ne migrent plus, les molécules d'eau se fixent près de l'endroit où elles ont rencontré la surface cristalline. Quels endroits sont plus souvent atteints ? Les arêtes ! Ce comportement s'amplifie de lui-même, car plus les arêtes croissent, plus elles font saillie, et plus leur croissance s'accélère. C'est par ce mécanisme que se forment



Une couche d'eau quasi liquide recouvre les flocons de neige ou la glace quand il ne fait pas trop froid. Sans elle, il ne serait ni possible de mettre la neige en boule ni de glisser sur les flaques gelées.

les flocons en forme d'étoiles à six branches (les «roues à six dents» de Descartes).

Le même mécanisme fonctionne aussi de façon plus compliquée. Ainsi, il arrive que les branches à leur tour se dentellent, se subdivisant en branches plus petites, qui elles-mêmes se divisent... L'origine de cette magnifique ramification et de sa régularité a été expliquée en 1964 par les Américains Mullins et Sekerka, qui s'intéressaient aux nombreuses structures ramifiées observées en métallurgie. Mullins et Sekerka ont montré qu'une surface plane qui croît trop vite se couvre de bosses séparées par une distance d'autant plus petite que la vitesse de croissance est grande. En d'autres termes, la diffusion rapide de particules vers la surface favorise la croissance des bosses placées à une certaine distance les unes des autres. Si la croissance se poursuit au même rythme, celles-ci deviennent majoritaires, de sorte qu'un réseau régulier d'aspérités recouvre bientôt la surface. Dans le cas du flocon, la subdivision des branches d'un flocon n'intervient que si la vitesse de croissance est assez grande pour que la longueur séparant deux nouvelles aiguilles (les bosses) soit inférieure à la longueur des aiguilles déjà constituées.

LA CHUTE

Puisque nous comprenons désormais les formes multiples des «pelotons de glace», il nous reste à imaginer leurs parcours. Nés à haute altitude, où il fait très froid, les flocons sont emportés par le vent pendant leur croissance. De plus en plus lourds, ils tombent doucement vers le sol, traversant diverses couches de l'atmosphère, où ils rencontrent des conditions différentes. Ainsi, chaque couche et chaque endroit de l'atmosphère favorisent tel mécanisme de croissance, puis tel autre, etc. Une étoile à six branches qui traverse un nuage à -15°C , se parera bientôt d'étranges aiguilles ; confrontée à l'humidité extrême d'une couche basse à -2°C , elle accrochera promptement de fines plaquettes aux extrémités de ses aiguilles, etc.

Malgré les progrès accomplis depuis Descartes, la neige garde nombre de ses mystères. Les flocons sont presque toujours parfaitement symétriques. Quelle que soit leur complexité, leurs branches sont parfaitement identiques. Pourquoi ? Un mécanisme régule-t-il la croissance de l'ensemble du cristal ? Ou bien, le fait que chaque branche croisse dans les mêmes conditions suffit-il à expliquer leur étonnante similitude ? Les pelotons de glace n'ont pas fini de nous intriguer.

Morphogenesis on Ice : The Physics of Snow Crystals, Engineering and Science LXIV, vol. 1, 2001.