

# La formation des cristaux de neige

*Quels sont les facteurs qui régissent la croissance des cristaux de neige et qui expliquent l'étonnante variété observée ?  
Une instabilité récemment identifiée fournirait la clef de l'énigme.*

Kenneth Libbrecht

**Q**u'il s'agisse de glaçons dans le congélateur ou de la surface d'un lac en hiver, la glace adopte la forme de son contenant. Mais si l'on considère la neige, l'eau donne ici en gelant un résultat tout à fait différent : une multitude de formes aux motifs complexes. La diversité des formes est si remarquable qu'elle donne presque raison au vieil adage selon lequel il n'existe pas deux cristaux de neige identiques.

L'eau étant une substance très familière, on pourrait penser que le mécanisme par lequel les cristaux et flocons de neige développent leurs structures complexes est bien compris depuis longtemps. En fait, de nombreux aspects de la croissance de ces minuscules chefs-d'œuvre de glace restent très difficiles à expliquer, même qualitativement. Cette croissance est un phénomène hors d'équilibre et hautement non linéaire, dans lequel des processus subtils à l'échelle nanométrique peuvent profondément affecter le développement de motifs complexes à toutes les échelles. Les nuages d'hiver ont beau les livrer à notre observation par milliards, nous commençons tout juste à comprendre pourquoi les cristaux de neige acquièrent des formes aussi caractéristiques et distinctes.

Les cristaux de neige sont des cristaux de glace qui se forment dans l'atmosphère. Plus précisément, ils se forment quand la vapeur d'eau de l'atmosphère se condense directement en glace, en court-circuitant la phase liquide. « Flocon de neige » est un terme météorologique plus général, utilisé pour décrire différents types de précipitations hivernales, allant de cristaux de neige individuels à des agrégats de nombreux cristaux.

La formation des cristaux de neige s'amorce généralement lorsqu'une masse d'air chaud et humide s'élève et se refroidit, à la suite d'une collision avec une autre masse d'air. Une

partie de la vapeur d'eau que l'air contient se condense alors en d'innombrables gouttelettes d'eau. Chacune a besoin d'un noyau sur lequel se condenser, et ces noyaux sont les particules de poussière de l'air. Les gouttelettes, de taille micro-métrique, diffusent bien la lumière, de sorte qu'en s'agrégeant en grands nombres, elles forment des nuages visibles. Un amas nuageux de bonne taille peut ainsi contenir un million de tonnes d'eau sous forme de gouttelettes en suspension.

## De la vapeur solidifiée

Si ces nuages nouvellement formés continuent à se refroidir, les poussières favorisent la formation de la neige. Les gouttelettes d'eau ne gèlent pas immédiatement quand la température devient négative. Au lieu de cela, elles demeurent liquides, dans un état de « surfusion ». Une gouttelette d'eau pure peut rester en surfusion jusqu'à près de  $-40^{\circ}\text{C}$  avant de se solidifier. Les particules de poussière fournissent une surface solide capable de déclencher la solidification, de sorte que les gouttelettes chargées de poussière commencent à geler autour de  $-6^{\circ}\text{C}$ . Les particules de poussière étant très diverses, les gouttelettes des nuages ne gèlent pas toutes à la même température. C'est pourquoi la transformation en neige est progressive.

Une fois qu'une gouttelette a gelé, elle commence à croître et à se développer à mesure que la vapeur d'eau se condense et cristallise à sa surface. Les cristaux de neige se forment donc surtout à partir de vapeur d'eau, et non d'eau liquide. Les gouttelettes du nuage restées liquides s'évaporent lentement et alimentent l'air en vapeur d'eau, vapeur qui nourrit leurs sœurs gelées.

Il existe ainsi un transfert net de molécules d'eau, des gouttelettes liquides vers la vapeur d'eau puis vers les

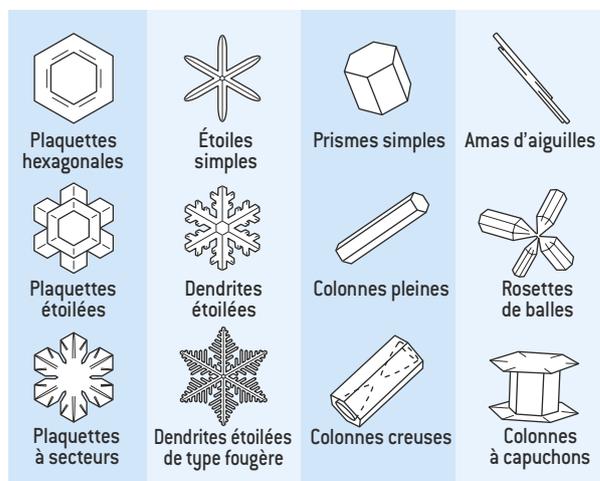
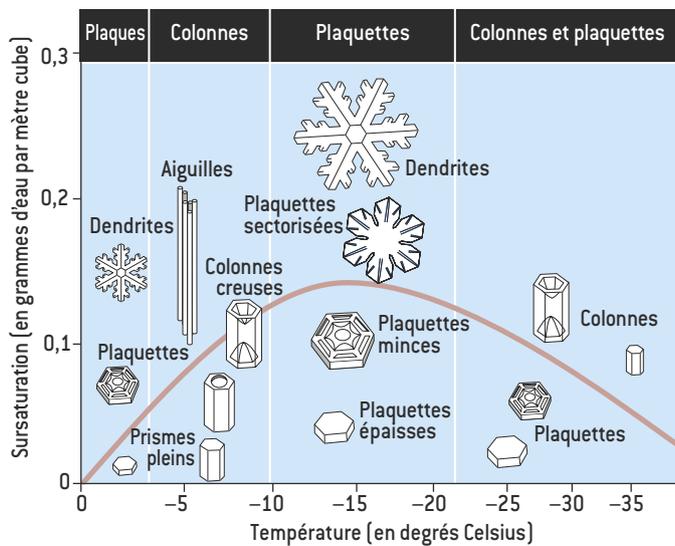


**1. Les cristaux de neige isolés** se présentent sous une multitude de formes et de tailles. Parmi ces formes [de gauche à droite, à partir du haut] : une colonne courte aux facettes creusées, une plaquette hexagonale, une plaquette étoilée, une plaquette à secteurs, un amas d'aiguilles, une dendrite étoilée, une colonne creuse, une colonne à capuchons et une rosette de balles à capuchons. Les prismes simples les plus petits ont une taille de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre, alors que les dendrites étoilées les plus grosses atteignent dix millimètres de diamètre. Tous ces cristaux proviennent de précipitations neigeuses naturelles, mais c'est grâce aux études de laboratoire que l'on commence à comprendre comment la simple solidification de la vapeur d'eau peut donner lieu à une telle variété de formes.



cristaux de neige. C'est par cette méthode détournée que l'eau liquide d'un nuage gèle. Environ un million de gouttelettes de nuage doivent s'évaporer pour que se forme un seul gros cristal de neige. En grossissant, les cristaux s'alourdissent, jusqu'à ce que la gravité les fasse tomber.

Qu'est-ce qui détermine la forme de ces cristaux ? L'angle entre les atomes d'une molécule d'eau est tel que le réseau cristallin de la glace est hexagonal. C'est pourquoi, *in fine*, les cristaux de neige ont une symétrie hexagonale. Aussi, les cristaux de neige se développent en commençant par former de petits prismes à facettes pouvant atteindre quelques dixièmes de millimètre, à peu près la taille du point qui conclut cette phrase. Selon le détail de leur croissance, ces cristaux simples peuvent devenir d'étroites colonnes hexagonales (tels de minuscules crayons à papier), de minces plaquettes hexagonales, ou toute autre forme intermédiaire.



**2. La structure des cristaux de neige** est très sensible à la température et à l'humidité, comme le montre leur diagramme de morphologie (*en haut*). Ici, la sursaturation fait référence à la vapeur d'eau en excès dans l'air lorsque l'humidité dépasse 100 pour cent. Le diagramme montre par exemple que les formes particulièrement grosses et photogéniques apparaissent autour de  $-15^{\circ}\text{C}$ , pour des sursaturations élevées. La courbe indique les conditions typiques que l'on trouve dans un nuage dense. Les chercheurs ont également établi des tables de classification de cristaux de neige comportant jusqu'à 80 entrées (*ci-dessus, un extrait d'une telle table*).

En grossissant, les cristaux développent en général des structures plus élaborées. Les cristaux de neige colonnaires peuvent évoluer en colonnes creuses, des vides coniques se formant aux extrémités, ou bien en fines aiguilles de glace mesurant quelques millimètres. Des colonnes épaisses forment souvent des amas nommés « rosettes de balles », ainsi nommées en raison de la forme de balle (d'arme à feu) des colonnes individuelles. C'est la compétition pour la vapeur d'eau au centre de l'ensemble qui inhibe la croissance dans cette zone et donne à chaque colonne un aspect effilé.

De petites plaquettes peuvent développer six branches primaires, ce qui donne des cristaux de neige étoilés. Un spécimen de bonne taille mesure deux à trois millimètres de diamètre. La surface des bras des plaquettes étoilées à branches larges comporte souvent des stries ou d'autres jolis motifs. Les six branches primaires d'un cristal de neige peuvent également émettre des ramifications latérales, avec des angles de  $60^{\circ}$ , ce qui forme des structures dendritiques évoquant des fougères et pouvant atteindre dix millimètres de diamètre.

Parfois, un cristal de neige commence à pousser en colonne, puis se met à croître en plaquette, ce qui donne deux cristaux de type plaquette reliés par une colonne, comme des roues sur un essieu. Ces formes rares sont nommées colonnes à capuchons, ou « boutons de manchette ». Il faut par ailleurs noter que les cristaux de neige bien symétriques sont plus l'exception que la règle, car de nombreux mécanismes peuvent perturber la croissance régulière d'un cristal de neige.

## Une immense diversité de formes

À quoi est due la grande variété de formes des cristaux de neige ? La symétrie et la complexité des cristaux de neige suscitent l'intérêt depuis des siècles. L'astronome allemand Johannes Kepler a été le premier à porter sur les cristaux de neige un regard scientifique. En 1611, il rédigea un petit traité intitulé *L'étrenne ou la neige sexangulaire*, dans lequel il tentait de comprendre pourquoi les cristaux de neige ressemblent à des fleurs. Kepler écrivit :

« Chaque plante possède un principe propre qui l'anime, puisque chaque spécimen de plante existe séparément, et il n'y a pas de raison de s'émerveiller que chacun possède une forme propre. Mais imaginer que chaque étoile de neige possède une âme individuelle est totalement absurde, et par conséquent les formes des flocons de neige ne sont en aucune façon le fait de l'âme comme chez les plantes. »

En remplaçant « âme » par « biochimie complexe des organismes vivants », on peut dire que Kepler avait vu juste sur l'essentiel. Aucun programme génétique ne régit le développement des cristaux de neige. Leur croissance est déterminée par des règles physiques relativement simples, et pourtant des formes complexes émergent spontanément. Kepler avait donc compris que la genèse des motifs et de structures complexes à partir de précurseurs simples était une question méritant l'attention des scientifiques, qui contiennent à s'y intéresser aujourd'hui encore.

Les techniques de diffraction de rayons X, nées dans les années 1920, ont permis d'étudier la structure des cristaux à l'échelle atomique et on a ainsi vite appris que la glace



**3. La relation entre forme et température** mise en évidence par le diagramme de morphologie des cristaux de neige peut être illustrée en produisant des cristaux de neige en laboratoire. Ces petits cristaux

ont tous été obtenus dans une chambre maintenue à un niveau de sur-saturation moyen, mais à diverses températures [ $-2^{\circ}\text{C}$  pour le montage photographique de gauche,  $-5^{\circ}\text{C}$  au milieu,  $-15^{\circ}\text{C}$  à droite].

d'eau a un réseau cristallin de symétrie hexagonale. Cette structure cristalline explique la symétrie hexagonale des cristaux de neige, mais, en soi, n'explique pas les morphologies complexes adoptées par ces cristaux.

Dans les années 1930, le physicien japonais Ukichiro Nakaya développa plusieurs techniques pour faire croître des cristaux de neige individuels dans des chambres expérimentales. Il découvrit bientôt que la morphologie d'un cristal dépendait surtout de la température et de l'humidité de l'air. Juste au-dessous du point de congélation, vers  $-2^{\circ}\text{C}$ , des cristaux plats, en forme de plaquette, apparaissent. Autour de  $-5^{\circ}\text{C}$ , les fines aiguilles deviennent la forme de prédilection. À  $-15^{\circ}\text{C}$ , se forment les cristaux de type plaquette les plus minces et les plus grands, tandis qu'au-dessous de  $-25^{\circ}\text{C}$ , les cristaux se présentent principalement sous la forme de courtes colonnes.

À toutes les températures, Nakaya a constaté que les cristaux prismatiques simples se forment lorsque l'humidité est faible, avec une croissance lente, alors qu'une forte humidité favorise une croissance plus rapide et des structures plus complexes. Des travaux ultérieurs ont montré en outre que les petits cristaux tendent à avoir des formes plus simples que les cristaux plus grands.

Nakaya a présenté toutes ses données dans un diagramme de morphologie, qui indique la forme des cristaux en fonction de la température et de l'humidité (voir la figure 2). Soixante-quinze ans plus tard, nous sommes toujours incapables d'expliquer de nombreuses caractéristiques apparaissant dans ce diagramme. En particulier, l'étrange dépendance de la morphologie des cristaux vis-à-vis de la température, avec un comportement pour ainsi dire oscillatoire entre les plaquettes et les colonnes à quelques degrés d'intervalle, reste mystérieuse.

Le diagramme de morphologie permet d'expliquer assez facilement deux caractéristiques bien connues des cristaux de neige : pourquoi ils semblent tous si différents, et pourquoi les six branches d'un cristal étoilé sont toutes semblables. Détaillons cela. En flottant de-ci de-là au sein d'un nuage, un cristal de neige en phase de croissance subit des fluctuations de température et d'humidité. Chaque changement de son environnement local affecte la façon dont le cristal croît. Sa croissance peut être tantôt plane ou colonnaire, à facettes ou à branches, selon les conditions rencontrées. En raison de cette sensibilité extrême à la

température et à l'humidité, des variations même modestes à l'intérieur d'un nuage donné entraînent des changements importants du mode de croissance. Au terme d'un voyage plein de rebondissements dans le nuage, un cristal donné peut donc avoir acquis une structure fort complexe.

De plus, la trajectoire suivie par chaque cristal de neige est elle-même fortement aléatoire, influencée par les incessantes turbulences atmosphériques. Il est pratiquement impossible que deux cristaux de neige suivent exactement la même trajectoire dans les nuages, et la probabilité de trouver deux cristaux de neige identiques est donc nulle.

Si chaque cristal de neige suit un chemin différent, ce n'est pas le cas pour les bras d'un cristal étoilé donné, qui se déplacent de façon solidaire. Les six bras subissent donc les mêmes changements de conditions atmosphériques aux mêmes instants, et c'est pourquoi les branches se développent de la même façon.

## Facettage et ramification

Au-delà du diagramme de morphologie, la compréhension des cristaux de neige a progressé grâce aux recherches en cristallographie et en métallurgie, étalées sur plusieurs décennies. L'industrie des semi-conducteurs, notamment, a fortement stimulé ces domaines, car la capacité de produire de gros cristaux, qui exige de bien comprendre leur dynamique de croissance, était devenue une nécessité industrielle.

La formation de facettes, c'est-à-dire de surfaces planes, est un phénomène qui joue un rôle majeur dans la croissance des cristaux. En grossissant, le cristal de neige développe des facettes parce que certaines surfaces cristallines accumulent de la matière plus lentement que d'autres. Les molécules qui s'ajoutent à la phase solide sont particulièrement attirées par les surfaces arrondies, rugueuses à l'échelle atomique, parce que ces zones présentent des liaisons intermoléculaires plus accessibles. Les régions moléculairement plates (les facettes) ont moins de liaisons libres, et constituent donc des sites d'attachement moins favorables.

Quand un cristal croît depuis un certain temps, seules subsistent les surfaces planes, à croissance lente. Autrement dit, le cristal finit par se facetter, quelle que soit sa forme initiale. C'est le réseau cristallin qui détermine quels sont les plans du réseau correspondant à la croissance la plus lente, et donc quels plans deviennent des facettes.

Le facettage de la glace traduit, dans la géométrie du cristal macroscopique, la géométrie de la molécule d'eau. Les cristaux de minéraux différents présentent des facettes organisées selon des structures différentes, selon l'organisation moléculaire du réseau cristallin. Quand le facettage domine la croissance du cristal de neige, le cristal hexagonal résultant présente six faces latérales, nommées facettes prismatiques, couronnées en haut et en bas par deux facettes basales. Telle est la forme de base des cristaux de neige de petite taille ou à croissance lente.

Dans certaines conditions, les molécules d'eau s'attachent plus facilement aux surfaces prismatiques qu'aux surfaces basales, ce qui produit de minces plaquettes de glace. Dans d'autres circonstances, les molécules s'attachent aux facettes basales, ce qui produit des colonnes. Dans les deux cas, le facettage est l'un des principaux mécanismes responsables de la diversité des formes et des motifs.

Cependant, le facettage ne peut être seul à l'œuvre. Sinon, tous les cristaux de neige auraient la forme de simples prismes hexagonaux, ce qui est loin d'être le cas. Un autre phénomène se produit quand la taille du cristal est importante (typiquement un demi-millimètre de diamètre) ou quand la croissance est rapide. Le cristal peut alors émettre des branches sous l'effet de l'instabilité de Mullins-Sekerka, un phénomène bien connu dans les processus de croissance.

En quoi consiste cette instabilité ? Lors de sa croissance, un cristal de neige utilise la vapeur d'eau de son environnement immédiat, et il faut un certain temps pour que des molécules supplémentaires diffusent dans l'air et atteignent le cristal. On dit ainsi que la croissance des cristaux de neige est limitée par la diffusion, et les différentes régions du cristal sont en concurrence pour s'approprier les ressources disponibles.

Si un point du cristal (par exemple l'une des pointes d'une plaquette hexagonale) est légèrement plus saillant, alors les molécules d'eau venant de l'air vont de préférence s'adsorber en ce point, tout simplement parce que la distance de diffusion est légèrement plus courte. Comme elle reçoit un peu plus de matière, cette pointe va croître un peu plus rapidement, ce qui à son tour va faire davantage ressortir la pointe. Le résultat est un renforcement de l'effet par rétroaction positive, de telle sorte que de grandes branches finissent par pousser à partir des six arêtes d'un cristal de neige hexagonal. Avec le temps, de nombreuses branches latérales peuvent à leur tour germer sur des bosses aléatoires ou sur des pointes de facettes des bras principaux.

**4. En laboratoire**, il est plus commode de faire pousser des cristaux sur un support solide qu'en suspension dans l'air. L'une des techniques consiste à faire pousser les cristaux de neige à l'extrémité de fines aiguilles de glace issues d'un fil électrofilé (à gauche). Le champ électrique intense attire les molécules d'eau de l'air, ce qui accélère fortement la croissance de l'aiguille. Quand on supprime la tension électrique, la croissance du cristal redevient normale. En contrôlant la température et l'humidité, on peut créer des cristaux de neige de la forme souhaitée. Par exemple, on peut imposer qu'une dendrite développe des colonnes creuses au niveau de ses pointes, puis que des capuchons viennent fermer chaque colonne, ce qui donne une forme évoquant un chandelier (à droite).



Le facettage et la ramification sont deux forces dominantes et antagonistes de la croissance cristalline. Le facettage est un processus stabilisant, qui entraîne la formation de surfaces planes et de formes simples. Si le facettage était seul à l'œuvre, les cristaux de neige ressembleraient tous à de simples prismes hexagonaux. À l'inverse, la ramification est un processus instable qui part de formes simples et les rend complexes. La seule ramification produirait également des cristaux aux structures variées, mais sans symétrie. Le jeu constant de ces deux forces est nécessaire pour sculpter les formes et les motifs que l'on observe dans les cristaux de neige.

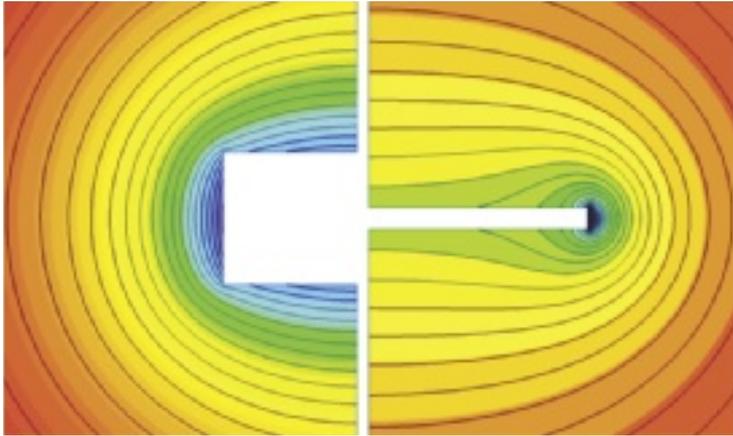
## La clef : non pas la température...

Bien que la ramification et le facettage expliquent de nombreuses propriétés de la croissance des cristaux de neige, ils n'expliquent pas directement l'organisation d'ensemble du diagramme de morphologie. Ces dernières décennies, on supposait que les taux de croissance du prisme et des surfaces basales dépendaient simplement de la température. Si les surfaces prismatiques accumulaient de la matière plus rapidement que les surfaces basales, alors on obtenait des plaquettes. Dans le cas contraire, ce sont des colonnes et des aiguilles qui se formaient. Les taux de croissance relatifs devraient changer spectaculairement avec la température (d'au moins deux ordres de grandeur sur quelques degrés) pour être cohérents avec le diagramme de morphologie, mais aucune autre explication ne semblait possible.

J'étudie depuis plusieurs années la formation des cristaux de neige en mesurant avec précision les taux de croissance des cristaux dans des conditions bien contrôlées. Le principe est le même que celui de Nakaya, si ce n'est que je bénéficie des techniques actuelles : interférométrie laser, enregistrement numérique des données, contrôle très fin de la température, et une multitude d'autres moyens que Nakaya aurait eu du mal à imaginer.

Je m'attendais à voir la croissance varier fortement avec la température : si des plaquettes minces et des colonnes étroites se forment à seulement quelques degrés d'écart, alors il est raisonnable de penser que les taux de croissance des facettes basales et prismatiques soient très différents et varient fortement avec la température.

Mes mesures ont montré que ce n'est pas le cas. Certes, il existe des différences entre les facettes, mais pas aussi importantes que prévu. De même, les taux de croissance varient effectivement avec la température, mais pas assez



**5. Les modélisations numériques** des niveaux de vapeur d'eau autour de plaquettes de cristaux de neige épaisses (à gauche, en vue par la tranche) ou minces démontrent qu'il y a moins de vapeur d'eau disponible autour des bords des plaquettes minces, qui poussent plus vite (du bleu au rouge, la concentration de vapeur d'eau augmente). Ces modèles

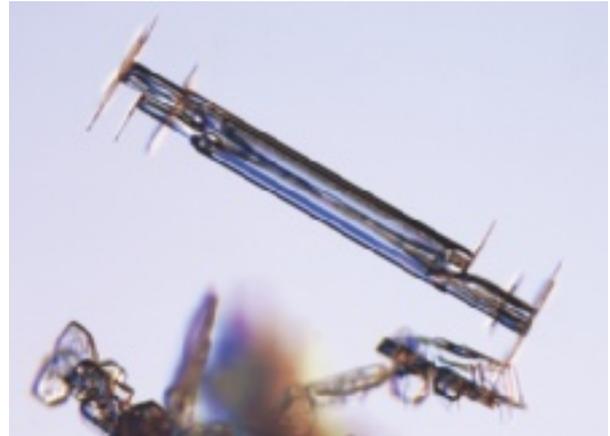
pour expliquer les caractéristiques observées sur le diagramme de morphologie.

La situation est devenue encore plus intrigante lorsque j'ai commencé à faire des modélisations numériques de croissance limitée par la diffusion, en particulier pour la croissance des plaquettes minces. Les principes classiques de l'instabilité de Mullins-Sekerka suggéraient que l'humidité devait être maximale au niveau des bords d'une facette, puisque ce sont les régions les plus saillantes dans l'air entourant le cristal. Au lieu de cela, les modélisations indiquaient que la croissance rapide des arêtes tend à y faire baisser la teneur en vapeur d'eau, de sorte que l'humidité près du bord est en fait plus basse qu'ailleurs. Ce résultat qui va à l'encontre de l'intuition signifiait que l'instabilité de ramification (Mullins-Sekerka) ne favorise pas la croissance de plaquettes minces, et entraînerait en fait la croissance de formes plus compactes.

## ...mais l'instabilité dite du tranchant de couteau

En rassemblant les mesures et les modélisations, on ne pouvait pas expliquer le diagramme de morphologie en faisant appel aux mécanismes connus de la croissance cristalline. La modélisation montrait que les taux de croissance devaient changer d'un facteur 100, voire 1000, quand la température variait de quelques degrés seulement; cela semblait improbable compte tenu de nos connaissances sur la dynamique de croissance des cristaux. De fait, les mesures montraient qu'il n'y a pas de changements abrupts du taux de croissance. Il fallait quelque chose de nouveau pour expliquer les changements spectaculaires de la forme des cristaux avec la température.

La solution réside selon moi dans un effet que je nomme cinétique d'attachement dépendant de la structure. L'hypothèse de base est que le taux de croissance intrinsèque d'une surface facettée dépend de sa structure. En particulier, j'ai suggéré qu'une facette très étroite, comme il en existe sur le pourtour d'un cristal en plaquette mince, croît beau-



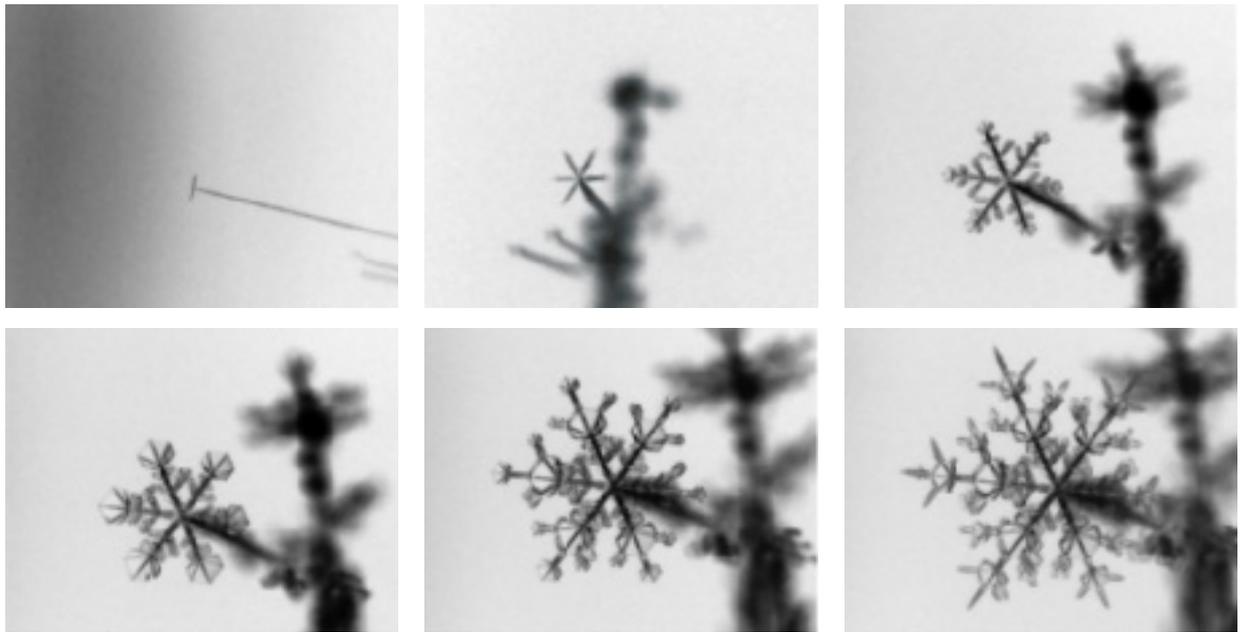
suggèrent l'existence d'une nouvelle instabilité de croissance, dite du tranchant de couteau. Cette instabilité accélère la croissance des plaquettes minces et pourrait expliquer la formation des colonnes à capuchons, où le cristal passe brutalement d'une croissance colonnaire à une croissance en plaquette (à droite).

coup plus vite qu'une facette plus large. La dynamique moléculaire de cet effet reste à élucider. Il se peut que les molécules du bord d'une plaquette mince soient moins liées que les molécules d'une surface plus large, tout simplement parce qu'elles ont moins de molécules voisines avec lesquelles elles seraient susceptibles de se lier. Par conséquent, le bord pourrait devenir intrinsèquement plus rugueux, les molécules de surface ayant plus de liberté pour s'agiter. Or une surface moins lisse tend davantage à condenser les molécules, ce qui augmenterait les taux de croissance.

La surface de la glace ayant une structure moléculaire complexe et imparfaitement comprise, il n'est pas possible en l'état actuel des connaissances de prouver ou de réfuter cette hypothèse. Mais je suis intimement persuadé que les données ne peuvent s'expliquer que par l'existence de ce phénomène, ou d'un phénomène voisin.

Le phénomène de cinétique d'attachement dépendant de la structure conduit à un autre type de comportement de croissance que je nomme instabilité du tranchant de couteau. Si le bord d'un cristal en plaquette, d'une certaine épaisseur initiale, s'amincit un peu, alors la cinétique d'attachement dépendant de la structure dicte que le taux de croissance intrinsèque du bord va augmenter. Cette croissance plus forte rend le bord encore plus fin, ce qui renforce le taux de croissance. Là encore, il se produit une rétroaction positive qui stimule la croissance du cristal et entraîne la formation de structures en plaquettes minces. L'instabilité se développe jusqu'à ce que d'autres mécanismes interviennent et interrompent l'amincissement du bord.

Non seulement l'instabilité du tranchant de couteau réconcilie les données de croissance des cristaux de façon satisfaisante, mais elle explique aussi de nombreux autres aspects des cristaux de neige naturels. Par exemple, les premières mesures de Nakaya montraient que les gros cristaux étoilés ont une épaisseur caractéristique d'environ 0,01 millimètre (environ un dixième de l'épaisseur d'une feuille de papier), qui est pratiquement indépendante de la taille du cristal et de la complexité des branches. Un tel comportement est exactement ce que l'on attendrait de ce type d'instabilité, et il est difficile à expliquer autrement.



**6. Cette série d'images** prises en laboratoire met en évidence comment les cristaux de neige prennent des formes aussi élaborées. Initialement, la température et l'humidité de la chambre sont réglées à des niveaux favorisant la ramification. Les conditions sont ensuite modifiées pour favo-

riser le facetage et la croissance en plaquette. En alternant plusieurs fois les deux types de conditions, on reproduit les conditions changeantes auxquelles un cristal de neige est soumis dans un nuage. Le résultat est un cristal où alternent des périodes de croissance en branches et en plaquette.

Les cristaux en colonnes à capuchons présentent presque toujours une transition brutale entre la colonne centrale et la plaquette surmontant chaque extrémité. Un changement de croissance en apparence instantané produit souvent des cristaux présentant de minces plaquettes au bout d'une colonne centrale. On s'attendrait à ce qu'une transition plus progressive soit la norme, ce qui tendrait à produire des plaquettes plus épaisses sur les colonnes, mais ce n'est pas ce que l'on observe.

La formation des colonnes à capuchons s'explique assez facilement avec l'instabilité du tranchant de couteau, car les instabilités ont tendance à amplifier de petits changements des conditions initiales. Si l'environnement local change très légèrement pour que la croissance en plaquette soit plus favorisée qu'une croissance colonnaire, alors l'instabilité entre en jeu et produit immédiatement des plaquettes minces. L'instabilité amplifie les effets de variations lentes des conditions extérieures et produit des changements brusques de la croissance qui, de colonnaire, devient plane; cela correspond à ce que l'on observe habituellement.

Cette amplification est une caractéristique importante de l'instabilité du tranchant de couteau : grâce à elle, les variations intrinsèques du taux de croissance avec la température dont on a besoin pour expliquer le diagramme de morphologie se trouvent fortement réduites. Nous ne comprenons toujours pas ce que sont ces effets liés à la température, mais au moins ils n'ont pas besoin d'être si radicaux. De petits changements du régime de croissance dus à une petite variation de température peuvent s'amplifier et produire les morphologies observées des cristaux.

L'instabilité du tranchant de couteau suggère que la dynamique de croissance des cristaux nanométriques pourrait être très différente de celle de structures plus grosses. Ce phénomène serait important pour comprendre le com-

portement de dispositifs nanométriques dans le domaine des semi-conducteurs, ou toutes sortes de procédés de nanofabrication dans lesquels on souhaite obtenir un auto-assemblage de structures complexes à partir de matière première disponible en vrac. À l'heure actuelle, on ne peut pas dire dans quelle mesure cette instabilité est répandue ou non, ni quelles autres surprises la dynamique de croissance à l'échelle nanométrique nous réserve.

## Une hypothèse séduisante, mais qui reste à confirmer

L'instabilité du tranchant de couteau est sans doute un troisième acteur majeur dans la formation de structures cristallines complexes, un acteur aussi important que le facetage et l'instabilité de ramification. Elle semble déterminante pour la morphologie à grande échelle de la plupart des cristaux de neige, et fournit un mécanisme d'amplification précieux pour expliquer le diagramme de morphologie. Si l'instabilité du tranchant de couteau n'existait pas, les cristaux de neige seraient plus petits, plus épais et plus compacts : ils seraient sans doute moins beaux.

Pour séduisante que soit l'instabilité du tranchant de couteau, elle n'en demeure pas moins une hypothèse à confirmer, qui demande des recherches théoriques et des observations supplémentaires. Par exemple, nous avons besoin de mieux comprendre la surface de la glace – des propriétés telles que la fusion de surface ou la rugosité – au niveau moléculaire pour expliquer la cinétique d'attachement dépendant de la structure.

De meilleures techniques de modélisation sont également nécessaires. La solidification limitée par la diffusion a fait l'objet de multiples travaux de modélisation,

et de nombreux aspects de la formation des motifs dans de tels systèmes sont bien compris. Cependant, personne n'a réussi jusqu'à présent à produire une modélisation satisfaisante de croissance limitée par la diffusion en présence d'un facetage important. Des travaux prometteurs ont récemment été menés dans ce domaine par les mathématiciens David Griffeath, de l'Université du Wisconsin à Madison, et Janko Gravner, de l'Université de Californie à San Diego, qui utilisent des modèles d'automates cellulaires. Dans ces modèles, on applique de façon répétée au cours du temps des règles élémentaires de croissance à des blocs disposés sur un réseau régulier. Cette technique relativement simple semble éviter une bonne partie des problèmes de calcul inhérents aux résolutions numériques directes de l'équation de diffusion, et leurs premiers résultats reproduisent de nombreux aspects de la croissance des cristaux de neige naturels, objectif qui s'était révélé étonnamment difficile à atteindre.

## Affiner mesures et modèles

Il reste en outre à affiner les mesures des taux de croissance des cristaux, et ce en élargissant la gamme des conditions externes (température, humidité, gaz ambiant, pression, etc.). Par exemple, en abaissant la pression, on provoque une diffusion plus rapide des molécules d'eau, et les cristaux se ramifient moins. Il reste à voir quel impact les variations de pression ont sur l'instabilité du tranchant de couteau.

Mon équipe travaille sur de nouvelles techniques où la croissance de cristaux de glace est modifiée électriquement pour produire de très fines aiguilles. Nous pouvons alors faire pousser des cristaux en plaquette ou en colonne sur la pointe de ces aiguilles dans toutes sortes de conditions externes. Isolés des courants d'air, ces cristaux peuvent devenir plus gros que dans la nature : nous en avons obtenus qui atteignent 25 millimètres. D'autres équipes, en particulier à l'Université de Washington et à l'Université de l'État de Pennsylvanie, utilisent la lévitation électrodynamique pour faire pousser des cristaux bien isolés.

Tous ces travaux devraient nous permettre de répondre en détail aux questions soulevées il y a quelque 400 ans par Kepler, lorsqu'il se mit à réfléchir aux formes spectaculaires des cristaux de neige.

Nous remercions la revue *American Scientist* de nous avoir autorisés à publier cet article.

**Kenneth G. LIBBRECHT** est professeur de physique et directeur du Département de physique à l'Institut de technologie de Californie (le *Caltech*), aux États-Unis.

K. LIBBRECHT, *Ken Libbrecht's field guide to snowflakes*, Voyageur Press, 2006.

K. LIBBRECHT, *Precision measurements of ice crystal growth rates*, <http://www.its.caltech.edu/ffatomic/publist/kgpub.htm/>, 2006.

K. LIBBRECHT, *The physics of snow crystals*, in *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, pp. 855-895, 2005 (<http://www.snowcrystals.com>).

K. LIBBRECHT et P. RASMUSSEN, *Flocons de neige. La beauté secrète de l'hiver*, Les éditions de l'Homme, 2003.

P. PELCÉ, *Théorie des formes de croissance*, EDP-Sciences, 2000.

**CLIMAT**  
Comment éviter la surchauffe ?

Le réchauffement climatique est une réalité mesurable. Après l'exposé des faits et des conséquences possibles sur l'homme, ce dossier explore les solutions les plus réalistes, des quotas aux énergies renouvelables.

**Actuellement en kiosque**  
**Les Dossiers**  
**de Pour la Science**

POUR LA SCIENCE