

En 2014 nous recrutons 300 chercheurs (h/f)



—
Biologie
Chimie
Écologie & Environnement
Homme & Société
Ingénierie & Systèmes
Mathématiques
Nucléaire & Particules
Physique
Sciences de l'information
Terre & Univers
—

Le CNRS ➤ révélateur de talents

Les personnes en situation de handicap peuvent également être recrutées par voie contractuelle.



www.cnrs.fr

Inscriptions aux concours sur le site www.cnrs.fr
du 2 décembre 2013 au 6 janvier 2014



Suivez Emploi CNRS



Les fleurs et les rubans de glace

Quand les conditions météorologiques sont favorables,
les tiges de certaines plantes donnent naissance
à de magnifiques structures de glace.
Un phénomène rare et partiellement élucidé.

James R. Carter

Pour observer des fleurs de glace, il faut vous extraire de votre lit bien chaud aux premières heures d'une matinée hivernale et aller faire une longue promenade en forêt. Mais les trésors qui vous attendent méritent bien cet effort ! Si les conditions météorologiques et la flore locale sont adéquates, vous apercevrez des formations glacées éphémères, bourgeonnant à partir de tiges de végétaux : un jardin de glace.

J'ai observé par hasard, pour la première fois, ces sculptures naturelles de glace en décembre 2003, lors d'une randonnée dans le Tennessee. Je n'ai pas pu expliquer ce que j'avais vu jusqu'à ce que je fasse une recherche sur Internet ; mais une année plus tard, j'ai découvert des formations glacées similaires dans une région différente et associées à un autre type de plante. En novembre 2005, je roulais dans le Nord du Kentucky, et j'en observais par hasard sur le bord de la route, où des plantes avaient été fauchées. Des volutes de glace rayonnaient dans toutes les directions à partir de tiges dont le sommet avait été coupé.

L'ESSENTIEL

- Les fleurs de glace se forment sur les tiges d'une quarantaine d'espèces végétales.
- Ces structures peuvent naître lorsque la température ambiante est basse et le sol humide, mais non gelé.
- L'eau du sol est aspirée par capillarité et remonte dans la tige par des canaux. Elle ressort sur les côtés et gèle. Le processus alimente en continu la formation d'un ou de plusieurs rubans de glace.
- Un processus physique similaire est observé avec des pierres poreuses.

Toutes les photographies sont de James Carter sauf mention contraire.

J'ai continué à observer ces formations pendant quelques dizaines de kilomètres. Cette région était riche en espèces végétales capables de former des fleurs de glace, et les conditions de température et d'humidité étaient idéales ce jour-là. J'ai poursuivi mon exploration afin de mieux comprendre le phénomène et d'en apprendre plus sur les facteurs requis pour créer ces merveilles glacées (voir les figures 2 et 3).

Un jardin de glace éphémère

Quelques jours plus tard, en Virginie centrale, par un matin glacial qui succédait à une journée pluvieuse, je suis sorti chercher de nouveaux exemplaires de ces fleurs de glace. Le long d'un chemin en terre battue, je les ai découvertes sous trois formes : des rubans de glace à la base de petites tiges, des aiguilles de glace soulevant une mince couche de terre et une baguette de glace s'élevant jusqu'à environ cinq centimètres du sol. L'année suivante, je suis revenu sur les lieux de ma première observation dans



1. LES FLEURS DE GLACE ne se forment pas par condensation de vapeur d'eau, mais à partir du liquide qui s'échappe de la tige et gèle. Le processus est continu, ce qui conduit à la formation de rubans de glace.

le Tennessee et j'ai recueilli des graines de l'un des végétaux produisant de la glace, une plante nommée *Verbisina virginica*, pour les rapporter dans mon jardin dans l'Illinois. L'hiver suivant, j'avais mes propres fleurs de glace, ce qui a beaucoup facilité l'observation de leur formation et le décryptage des conditions favorables à ce phénomène.

Les pionniers de la fleur de glace

Tandis que je tentais de percer les secrets de ces fleurs de glace, je me suis plongé dans certains articles historiques sur le sujet. Plusieurs des végétaux produisant des fleurs de glace sont connus sous des noms vernaculaires, en particulier *frostweed* et *frost-plant* en anglais, qui signifient littéralement « herbe de givre » et « plante de givre » ; cela indique que leurs étonnantes « fleurs » hivernales sont connues depuis bien longtemps. Les premiers comptes rendus publiés remontent au début des années 1800.

Un article remarquable a été écrit par John Herschel, le fils de l'astronome William Herschel qui a découvert la planète Uranus. En 1833, il publia un article illustré dans la revue *Philosophical Magazine*, où il écrivait que la glace « semblait émerger comme une sorte de ruban – ou une excroissance ondulée en forme de papillote – comme s'il s'agissait d'un procédé d'extrusion d'un état mou présent à l'intérieur de la tige poussé vers l'extérieur par des fissures longitudinales sur les côtés de la tige [...]. La structure de ces rubans était fibreuse, comme celle de la variété fibreuse du gypse, qui présente une surface soyeuse brillante. »

Les observations de Herschel semblent avoir déclenché toute une série d'études sur le même sujet. L'une d'elles, parue dans un numéro de 1850 de la même revue, est du médecin et naturaliste John LeConte, de l'Université de Géorgie, aux États-Unis. LeConte a fait de nombreuses observations pertinentes sur des tiges entières ou coupées qui produisaient toutes de la glace. Il nota que de nombreuses tiges étaient mortes et sèches à la période de l'année où il fit son étude, bien que les racines aient pu être vivantes, et que la formation de glace n'ait pas semblé liée aux fonctions physiologiques de la plante. Il observait : « À une certaine distance, elles présentent l'aspect de boucles de coton



2. L'ASPECT DES FLEURS DE GLACE est très varié : dense et structuré (*en haut*) ou plus fin comme de la gaze (*en bas*). Néanmoins, on retrouve dans toutes ces fleurs une structure striée. L'eau s'échappe par des pores alignés le long de la tige, puis gèle et forme des rubans striés.

variant de 8 à 13 centimètres de diamètre, situées autour du pied des plantes ; et quand elles sont nombreuses, l'effet est saisissant et magnifique. »

En 1892, le naturaliste américain William Hamilton Gibson décrivait une glace « scintillant comme de petits éclats de quartz blanc au milieu des herbes proches de la base de la tige. C'est une fleur de cristal de glace du blanc le plus pur qui "jaillit" de la tige, faisant éclater l'écorce, et prenant la forme fantasque de toutes sortes de boucles, collerettes et crêtes plumeuses ». Gibson nota que la taille de cette formation de glace semblait être plus grande que la quantité de sève qu'une plante pouvait produire, ce qui indiquait que l'humidité provenant du sol devait être en jeu.

Beaucoup d'autres chercheurs ont étudié les aspects de la physiologie des végétaux susceptibles d'être liés à la production de fleurs de glace. L'une des recherches les plus minutieuses est celle de William Coblentz, physicien au Bureau américain des normes, à Washington (qui a été remplacé en 1988 par l'Institut américain des normes et de la technologie, le NIST). En 1914, Coblentz coupa des tiges de plantes et les inséra dans un sol humide dans son laboratoire, afin de prouver que les racines n'étaient pas nécessaires pour former ces volutes de glace, et que cette glace ne se formait pas par condensation de la vapeur d'eau contenue dans l'air ambiant (comme c'est le cas pour le gel).

Différents noms, différents phénomènes

Un siècle plus tard, les fleurs de glace restent en grande partie une énigme. Il n'existe même pas de consensus sur la façon de les nommer. Ainsi, on trouve les fleurs de glace sous diverses dénominations, qui parfois se rapportent également à d'autres phénomènes : franges de glace, filaments de glace ou fleurs de givre. Ce dernier terme n'est pas approprié, car les fleurs de glace ne se forment pas de la même façon que le givre. En outre, le terme fleur de glace désigne aussi des structures gelées qui se forment à la surface de mers salées, mais là encore il s'agit d'un phénomène différent.

Robert Harms, de l'Université du Texas, au Centre de ressources sur la flore à Austin, a proposé le terme *crystallofolia*

(le nom latin pour « feuilles de glace ») pour décrire ces formations.

Après avoir commencé à faire pousser mes propres fleurs de glace, j'ai souhaité apprendre tout ce que je pouvais sur ce phénomène. Il y a eu peu d'études scientifiques sur le sujet, mais en rassemblant tout ce que l'on sait, une image globale commence à émerger.

La première observation est que toutes les plantes ne produisent pas des fleurs de glace. J'ai compilé des comptes rendus qui répertorient à travers le monde une quarantaine d'espèces productrices de glace. Toutes sont des espèces herbacées, ce qui signifie qu'elles n'ont pas de tige ligneuse et que leurs feuilles et leurs pousses se fanent à la fin de la saison de croissance. La plupart des fleurs de glace sont associées à des tiges séchées ou mortes, mais certaines peuvent apparaître sur des tiges vertes vers la fin de la saison de croissance, lorsque les températures sont favorables. En outre, une autre formation de glace, nommée cheveux de glace, ou chevelure de glace, ne pousse qu'à partir de bois mort (voir la figure 4), mais le processus pourrait être distinct et impliquer des champignons.

Une quarantaine d'espèces produisent des fleurs de glace

Pour mieux comprendre comment les fleurs de glace se forment, R. Harms a étudié l'anatomie des espèces qui en fabriquent dans la nature. Il a remarqué que ces plantes ont un important système de canaux de transport de la sève et de l'eau, c'est-à-dire un important xylème. L'eau est aspirée du sol vers la tige par la conjonction d'un phénomène de capillarité et de la transpiration de l'eau par les feuilles. L'eau contenue dans les vaisseaux du xylème sort par des pores situés tout le long des canaux et passe dans les cellules du tissu adjacent, le parenchyme. Ces cellules forment un réseau perpendiculaire aux vaisseaux du xylème et transportent le liquide de l'intérieur vers la périphérie de la tige.

Quand les températures deviennent négatives, en automne et en hiver, la sève peut être en surfusion, situation où le liquide est à une température inférieure à la température de solidification, mais



3. DIFFÉRENTES ESPÈCES de plantes peuvent former des fleurs de glace. L'auteur en a répertorié une quarantaine. Toutes sont des herbacées telles que les dictames (*Cunila origanoides*, en haut) ou *Verbesina virginica* (en bas).



DES FLEURS DE GLACE SUR DES TIGES VERTES

La plupart des fleurs de glace émergent de tiges desséchées et mortes. Mais à l'automne, des tiges vertes peuvent former des fleurs de glace, grâce à des conditions météorologiques particulières. J'ai observé cette boucle de glace (*ci-dessus*) longue de quatre centimètres par un matin calme de la fin du mois d'octobre, sur *Verbesina virginica*, une plante connue pour produire des fleurs de glace. À cette époque, la température devient négative, mais uniquement sur les surfaces à ciel ouvert. Seules deux tiges coupées, comme celle représentée ici, ont produit de la glace. Les feuilles des plantes non coupées protégeaient du gel leurs tiges, qui ne formaient donc pas de fleurs. Les spécialistes des fleurs de glace débattent encore pour savoir si la source principale de la glace est la sève déjà présente dans les tiges vertes ou de l'eau supplémentaire aspirée vers le haut à partir du sol. Lorsque des tiges mortes forment des fleurs de glace, de l'eau monte du sol par capillarité, ce qui suggère que ces structures naissent d'un processus de nature plutôt physique que biologique. Cependant, personne n'a encore étudié la composition chimique de la glace formée au-dessus de ces tiges vertes, pour voir si elle diffère ou non de celle de la glace formée sur les tiges mortes.

Le phénomène physique responsable de la croissance des rubans de glace est la ségrégation de glace. Il est possible d'en voir une autre manifestation dans la nature sous la forme d'aiguilles de glace qui poussent dans le sol (*a*).

Les premières publications scientifiques sur les aiguilles de glace remontent au milieu des années 1800. Le phénomène de ségrégation de glace est à l'œuvre ici : le milieu sous-jacent doit avoir suffisamment de pores pour laisser l'eau remonter afin d'approvisionner la croissance de la glace. Ces pores doivent être assez petits pour que les forces de capillarité repoussent l'eau vers la surface. En 1981, Vernon Meentemeyer, de l'Université de Géorgie, et Jeffrey Zippin, ingénieur de l'armée américaine, ont remarqué que le sol doit contenir une quantité suffisante d'argile et de limon pour que sa po-



Des aiguilles de glace dans le sol.

SÉGRÉGATION DE GLACE ET MILIEUX POREUX

rosité soit favorable à la formation d'aiguilles. Par exemple, des aiguilles de glace peuvent se développer sous une motte de gazon recouverte de mousse (a). Les aiguilles de glace ont poussé en deux jours, avec une frontière visible due à l'interruption de la croissance entre les nuits.

La ségrégation de glace s'observe aussi avec des galets particuliers, qui forment des tiges de glace atteignant plusieurs centimètres de longueur (c et d). Des amateurs passionnés par ce sujet m'ont envoyé des photographies montrant de la glace poussant à partir de petites pierres, et, par la suite, ils m'ont envoyé des galets qui ont la particularité d'être poreux. Lorsqu'on les pose sur une surface humide (qui produit aussi des aiguilles de glace), une couche de glace se forme à leur sommet; cette couche fond partiellement dans la journée, puis, la nuit suivante,

une nouvelle couche de glace se forme et pousse la précédente vers le haut. Ces observations suggèrent que les aiguilles et les tiges de glace relèvent du même principe physique.

Les galets en question proviennent de roches sédimentaires contenant essentiellement de la silice. Certains morceaux de briques et de poteries produisent aussi des tiges de glace. Les galets qui produisent des tiges de glace assez importantes ont une porosité et une perméabilité particulières. Leurs pores sont assez petits pour absorber l'eau liquide et mettre en œuvre la ségrégation de glace. Pour estimer ces propriétés, on peut mesurer la quantité d'eau absorbée par le galet lorsqu'il est posé sur une éponge humide. S'il prend du poids, il produira probablement de la glace. Très peu de cailloux sont assez poreux pour former des tiges de glace.

En me fondant sur ces expériences, j'ai essayé de créer de la « glace de galet » dans un environnement contrôlé. J'ai reconstitué les conditions propices à la formation de glace en maîtrisant la température de la terre humide (du sable) sur laquelle sont placés les galets, en utilisant une lampe électrique ajustable comme source de chaleur pour empêcher le gel. L'ensemble est placé dans une enceinte isolée et la surface, avec la terre et les galets, est exposée à un air glacial.

Si toutes les conditions sont réunies, de la glace pousse sur les côtés ou au sommet d'un galet aussi longtemps que de l'eau dans le sol est disponible (ci-dessous : des galets posés sur de la terre humide avant, b, et après formation de la glace, c et une tige de glace sur un galet, d). La glace peut pousser à partir des côtés des cailloux, formant même un collier ou un tube recourbé si le plan de congélation (le lieu où les températures sont optimales pour la croissance de la glace) se trouve au-dessous du sommet du caillou. Quand on remplace le sable par une terre plus lourde ayant une teneur élevée en argile, le même dispositif entraîne la croissance d'aiguilles de glace à partir de la terre, glace qui pousse les galets vers le haut.



Susan Wells Robinson



Tiges de glace formées par des galets.

LA GLACE DES TUYAUX

Des observateurs curieux à travers le monde m'ont envoyé des photographies de spirales et de rubans de glace spectaculaires qui ont jailli naturellement de tuyaux métalliques en divers endroits (a et b). Pour expliquer comment ces structures se forment, j'ai essayé de reproduire ce processus et de faire pousser mes propres spirales de glace. J'ai mis au point une procédure que d'autres peuvent suivre.

La glace occupe un volume supérieur d'environ neuf pour cent à celui de l'eau liquide ; la solidification de l'eau entraîne une expansion. Lors de ma première tentative, j'ai utilisé des tuyaux en plastique, mais ces derniers n'ont pas tardé à se briser. Cependant, des tuyaux en fer peuvent résister à cette surpression.

Mes tests ont montré que l'une des extrémités du tuyau doit être aplatie ou recouverte d'une « capsule » et percée d'une petite fente. La méthode la plus performante que j'ai trouvée consiste à boucher temporairement cette extrémité rétrécie du tuyau, à la tenir à l'envers, puis à remplir cette extrémité avec une petite quantité d'eau que je fais geler, ce qui forme un bouchon de glace. Je remplis ensuite le reste du tuyau avec de l'eau très froide et je bouche l'autre extrémité. Je retourne le tuyau, de sorte que la fente et le bouchon de glace soient au sommet, et je le place dehors par une nuit glaciale. Avec un peu de chance, quand l'eau glacée contenue dans le tuyau est en expansion, elle pousse le bouchon de glace, qui crée de longues boucles par extrusion (c).



a

Sheryl Tarris



b

Raul Baz



c

où il n'y a pas d'élément pour amorcer le changement de phase de l'état liquide à l'état solide. À l'intérieur de la tige, la pression peut augmenter par gonflement des cellules, ce qui peut entraîner des déchirures longitudinales de l'épiderme de la tige. Dans ce cas, les cellules du parenchyme sont en contact avec l'air glacé. Elles se comportent alors comme de petits robinets alignés verticalement le long de la tige. L'eau, qui s'écoule de la tige sous l'effet de la pression, gèle. Le processus dure jusqu'à ce que la pression s'équilibre entre l'intérieur de la tige et l'extérieur, ou que l'eau s'épuise.

Comme le soulignait Gibson à la fin du XIX^e siècle, la quantité de glace est plus importante que la sève contenue dans la plante. En outre, la plupart des fleurs de glace se forment sur des tiges desséchées. Il est donc probable que l'eau soit aspirée par capillarité du sol et ressorte par les côtés de la tige, comme dans le scénario proposé par R. Harms. Dans le cas des fleurs de glace se formant sur des tiges vertes (voir l'encadré page 24), il reste à élucider quelles sont les parts respectives de la sève et de l'eau dans la glace formée.

Quand l'eau suinte de la tige, elle gèle, mais l'eau liquide repousse la partie solide et gèle à son tour. On nomme ségrégation de glace ce phénomène, où l'eau se déplace à travers un milieu poreux et gèle au contact d'un milieu plus froid. On l'observe ailleurs dans la nature, par exemple sur le sol avec les aiguilles de glace (voir l'encadré pages 24 et 25).

Des rubans de glace extrudés par des pores

En 1989, Hisashi Ozawa et Seiti Kinoshita, de l'Université d'Hokkaido, au Japon, ont étudié la ségrégation de glace en plaçant un cristal de glace d'eau au-dessus d'un filtre microporeux, qui lui-même recouvrait une nappe d'eau en surfusion. Les pores de ce filtre étaient si petits que, contrairement à l'eau liquide, la glace ne pouvait pas passer à travers. Quand l'eau montait à la surface, elle gelait à la base de la glace, s'y agglutinait et la repoussait vers le haut. La chaleur latente libérée au cours du changement de phase empêchait l'eau, située en dessous, de geler. Ainsi, le processus se poursuivait aussi longtemps qu'il restait de l'eau.

Dans le cas des fleurs de glace, des conditions similaires apparaissent le plus



4. LES CHEVEUX DE GLACE sont des filaments très fins de glace, longs de plusieurs centimètres, qui forment des boucles sur du bois mort dépourvu d'écorce. Il y a un siècle, le géophysicien Alfred Wegener s'y est intéressé. Récemment, le botaniste Gerhart Wagner et ses collègues, de l'Université de Berne, en Suisse, ont montré que les cheveux de glace sont liés à la présence d'un champignon. Les gaz produits quand ce champignon décompose le bois exercent une pression qui pousse l'eau contenue dans les canaux du bois vers la surface, où elle gèle.

■ L'AUTEUR



James R. CARTER est professeur émérite au Département de géographie et de géologie de l'Université d'État de l'Illinois, aux États-Unis.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

■ LE WEB

L'auteur présente de nombreuses photographies de fleurs de glace sur son site Internet : <http://my.ilstu.edu/~jrcarter/ice/>

souvent pendant la nuit, quand la température atmosphérique devient négative, tandis que l'eau contenue dans le sol reste liquide. Mais j'ai vu de la glace commencer à pousser sur des tiges en plein après-midi, quand un vent froid soufflait dans la région. Les pores des cellules végétales assurent la ségrégation de la glace et empêchent le liquide contenu dans la tige de se solidifier. Une fois que le sol lui-même est gelé, ces processus cessent, mais ils peuvent reprendre quand le dégel s'amorce. Sous les latitudes moyennes, les conditions pour que se forment des fleurs de glace peuvent être réunies à tout moment entre octobre et mars.

Il existe d'autres situations où se forment des structures de glace reposant sur un principe similaire à celui des fleurs de glace sur les plantes. Il est ainsi possible de fabriquer des tiges de glace sur des pierres poreuses (voir l'encadré pages 24 et 25). J'ai aussi montré qu'il était possible de fabriquer des rubans de glace, de façon artificielle, par extrusion dans des tuyaux métalliques (voir l'encadré page 26). Je suis toujours fasciné par le fait que quelque chose d'aussi banal que la glace puisse revêtir des formes si magnifiques... mais si éphémères et si rares. ■

Thomas Peacock et George Haller

L'ordre caché des écoulements chaotiques

De nouvelles techniques d'analyse en mécanique
des fluides permettent d'identifier des lignes
de séparation. Elles promettent de meilleures
prévisions du déplacement des polluants
dans les océans ou dans l'atmosphère.

En avril 2010, de fines particules de cendres émises par un volcan islandais en éruption ont perturbé le trafic aérien européen. Le même mois, l'explosion de la plate-forme pétrolière *Deepwater Horizon*, dans le golfe du Mexique, a provoqué la marée noire la plus importante de l'histoire des États-Unis. Un an plus tard, un tsunami a frappé la côte de la région de Tohoku, au Japon. En plus des nombreuses pertes humaines, il a provoqué le désastre de la centrale nucléaire de Fukushima Daiichi, accident qui a conduit au déversement de nombreux débris et éléments radioactifs dans l'océan Pacifique.

Ces trois événements d'importance partagent une même problématique : dans chaque cas, des matériaux sont libérés dans l'environnement à partir d'une source ponctuelle. Or, prévoir où les débris sont transportés par les courants atmosphériques ou marins est crucial pour rediriger le trafic aérien, les missions de nettoyage, etc.

Distinguer de l'ordre dans le chaos

Pour suivre des polluants ou des débris à la dérive et prévoir où ils vont s'accumuler, l'approche usuelle consiste à faire des simulations numériques des écoulements atmosphériques ou marins et à utiliser la carte des vitesses des courants. Cette approche permet en principe d'estimer le devenir des débris. La difficulté est que de telles prévisions sont très sensibles aux conditions initiales. En d'autres termes, deux simulations d'une même situation peuvent donner des résultats très différents si les positions ou les vitesses initiales diffèrent, même de façon infime. On peut remédier à ce problème de sensibilité aux conditions initiales en effectuant plusieurs simulations pour le même scénario. L'ensemble des résultats indique alors une tendance générale sur la trajectoire des débris, mais cela ne permet pas d'obtenir un résultat précis.

En outre, l'analyse classique consiste souvent à déterminer l'histoire complète d'une trajectoire. On obtient ainsi des figures complexes « en spaghettis » qu'il est difficile d'interpréter. Pour améliorer la compréhension et les prévisions du comportement d'un fluide, de nouveaux concepts et méthodes sont à développer.

Récemment, des idées se situant à l'interface de la dynamique non linéaire – domaine

L'ESSENTIEL

- Les méthodes d'analyse classiques permettent difficilement de suivre le devenir de débris transportés par un écoulement irrégulier.
- L'approche des structures lagrangiennes cohérentes consiste à identifier des lignes attractives et répulsives au sein du fluide.
- Ces lignes invisibles constituent des « barrières de transport » qui permettent de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement.
- Cette approche serait applicable au sauvetage en mer, à la cardiologie, au suivi des pollutions...

Andrew Bannister

Article reproduit avec l'autorisation de T. Peacock et G. Heller, *Physics Today*, vol. 66(2), pp. 41-47, 2013. ©2013, AIP Publishing LLC.