

PAS SI SIMPLE

Bac to basics
LA NEIGE

P. 73

**QUESTIONS
DE LECTEURS**

P. 77



Comment ça marche ?
PESER EN PLIANT

P. 78



W^xyz
**NOMBRES COMPLEXES
POUR CALCULS
D'ÉCOLIERS**

P. 80

Chercher jouer trouver
**CARRELÉ
DE CRAQUELURES**

P. 82

BAC TO BASICS

Flocons étoilés, poudreuse, avalanches... Le vocabulaire de neige recouvre des réalités bien différentes. Qu'est-ce que la neige ? Rien que de l'eau et un peu d'air. Mais, au gré des conditions, elle ne cesse de se transformer ; sa structure et ses propriétés évoluent. Et l'homme, face à la complexité de ces transformations, peine à les prévoir.

La neige



■ ■ D'où viennent les flocons ?

Les cristaux de neige se créent et grossissent dans les nuages. Tout commence par une gouttelette d'eau, maintenue à des températures où elle devrait théoriquement se trouver sous forme de glace : pour geler, il faut qu'elle rencontre une particule de poussière, événement rare lorsque l'air est très pur. Lorsqu'elle en rencontre une, le noyau du cristal se forme. Celui-ci a une forme hexagonale, reflétant l'arrangement privilégié des molécules d'eau dans la glace. À partir du noyau, le cristal va croître, soit par les facettes, soit par les arêtes. Selon les cas, on aboutit à des formes compactes ou à une forme ramifiée : la fameuse étoile de neige.

Les modes de croissance dépendent des conditions qui règnent dans le nuage. Celles-ci ne sont pas homogènes, et un cristal suit en général les

Christophe Ancey est professeur (mécanique des fluides) à l'École polytechnique fédérale de Lausanne ; **Eric Martin**, ancien directeur du Centre d'études de la neige, est chercheur à Météo-France. Eric.Martin@meteo.fr

deux types de croissance simultanément. D'où une très grande variété de formes de cristaux. À cela s'ajoutent des phénomènes de givrage, c'est-à-dire la congélation de gouttelettes d'eau sur les cristaux. La forme initiale du cristal disparaît plus ou moins sous un agglomérat de petites particules opaques de glace. Il existe ainsi de nombreuses formes de cristaux et de nombreuses classifications. Par exemple, les cristaux de la neige « roulée » se présentent sous la forme de « boules de mimosa » blanches. Dans le cas particulier du givre de surface, la formation du cristal se déroule au sol et non dans les nuages : elle est due à une condensation solide sur la surface de la neige. Les cristaux, qui se forment lors de nuits claires, ont une forme de feuilles.

■ ■ De quoi sont faites les couches de neige ?

Formées par l'accumulation de flocons, ces couches contiennent de la glace, de la vapeur d'eau, de l'air, et parfois de l'eau liquide. La glace se présente sous l'aspect de grains, plus ou moins consolidés entre eux et de

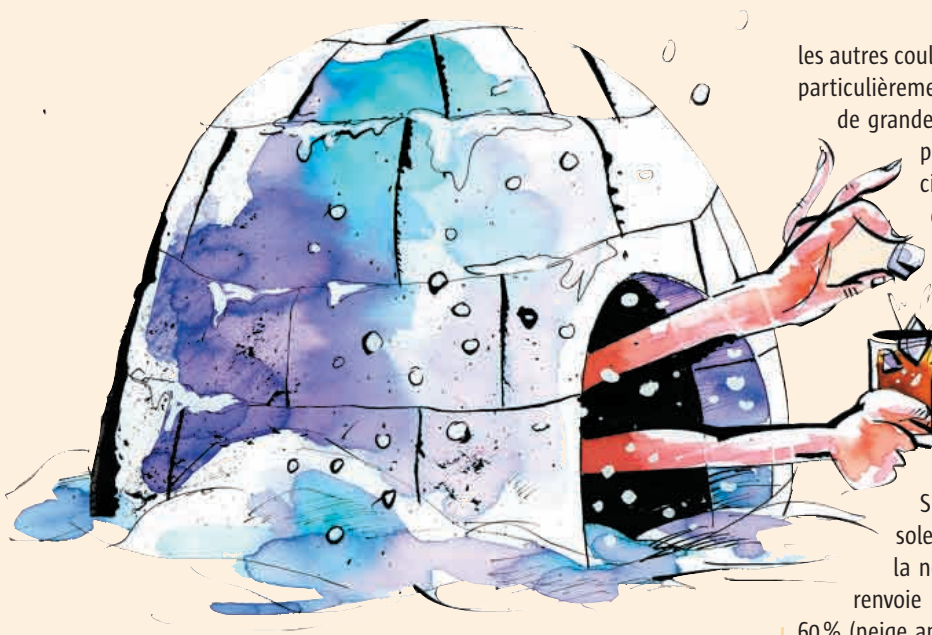
formes très variées. Les couches évoluent en permanence par des échanges continus entre les deux ou les trois phases. Selon les conditions, une molécule d'eau peut passer d'une phase à une autre.

Les cristaux de neige fraîche peuvent ainsi se transformer en grains fins (assez petits), en grains à faces planes (dont les contours présentent des parties rectilignes, et des angles nets), en « gobelets » (beaucoup plus gros et striés), ou en « grains ronds », qui sont les plus arrondis de tous et qui apparaissent lorsqu'il y a (ou qu'il y a eu) de l'eau dans la neige.

Les trois premiers types de neige sont caractéristiques d'une neige froide ou sèche, qui ne contient pas d'eau liquide.

Quant aux grains ronds, ils forment « la neige de printemps », dure le matin et très molle l'après-midi. Le matin, l'eau qui se trouvait la veille entre ⇒





⇒ les grains gèle, ce qui a pour effet de lier fortement les grains les uns aux autres. L'après-midi, l'eau et les grains de neige fondent : la neige se ramollit et perd sa cohésion.

■ ■ Un igloo de neige protège-t-il vraiment du froid ?

La neige, c'est froid, mais c'est aussi un bon isolant thermique ! Cette propriété provient de la grande quantité d'air que renferme la neige. À nos latitudes, en montagne, on considère, par exemple, qu'un manteau neigeux de 50 centimètres suffit à isoler le sol de l'atmosphère. La base du manteau neigeux, réchauffée par la chaleur emmagasinée par le sol durant l'été, reste en général à 0 °C, alors que la surface peut devenir très froide (couramment -20 °C). Dans un igloo, on obtient une isolation du même type : en comparaison avec les conditions dans une tempête de neige, il y fait très vite bon, car la chaleur du corps humain y est bien conservée.

■ ■ Pourquoi la neige est-elle blanche ?

Elle est en fait légèrement bleutée. La neige réfléchit en effet de façon quasi identique toutes les couleurs du spectre lumineux visible, mais la glace absorbe légèrement moins le bleu que

les autres couleurs. Cette nuance est particulièrement visible en présence de grandes épaisseurs de glace, par exemple sur les glaciers. Avec le temps, les cristaux se transforment : ils grossissent et deviennent moins ramifiés, tandis que de la poussière se dépose. La neige perd ainsi de son pouvoir réfléchissant.

Si le port de lunettes de soleil est recommandé sur la neige, c'est que celle-ci renvoie vers l'atmosphère de 60% (neige ancienne) à 90% (neige fraîche) du rayonnement solaire incident. Dans la partie visible du spectre, ce chiffre monte même jusqu'à 96% pour la neige fraîche. Un phénomène qui s'explique par les réflexions multiples dans les ramifications très fines des cristaux de neige fraîche. La neige est en outre peu réchauffée par l'air ambiant. En effet, la surface de la neige est très lisse, et l'atmosphère peu freinée au voisinage du sol ; en conséquence, les échanges de chaleur entre la neige et l'atmosphère sont peu nombreux. Pouvoir réfléchissant et absence de rugosité font que la neige « crée » elle-même des conditions favorables à son maintien au sol.

■ ■ Comment une couche de neige se transforme-t-elle ?

La plupart des transformations sont liées aux conditions météorologiques. Le vent casse les cristaux de neige pendant la chute ou après avoir arraché la neige déposée au sol. Les cristaux deviennent plus petits, plus compacts. Par la suite, la neige renferme moins d'air et devient plus dense. Le poids des couches supérieures, d'un engin de damage, ou d'un skieur, conduit également à une déformation de la structure et à sa densification. La thermodynamique permet d'expliquer une autre famille de transformations : les transferts de glace d'un grain à l'autre (voire plus localement au

niveau d'un même grain). Dans le cas de la neige sèche, la quantité de vapeur d'eau que peut contenir l'air au voisinage de la surface des grains dépend de la forme de cette surface et de la température. Dans le cas où la température du manteau neigeux est homogène, on assiste à une évaporation au-dessus des parties convexes, et à une condensation solide sur les parties concaves des grains. Ainsi, les creux, tels que les zones de contact entre deux grains, ont tendance à se consolider, tandis que les parties pointues s'émeussent petit à petit. Ce type de métamorphoses transforme des étoiles de neige en une neige de type « grain fin », qui a une bonne cohésion grâce au renforcement des zones entre les grains. Si la température de la couche n'est pas homogène, deux grains voisins n'ont pas la même température, et les transferts de glace se font d'un grain à l'autre. Les grains qui en résultent présentent des angles nets et des facettes. Les plus évolués (les gobelets) peuvent avoir une forme de pyramides creuses. Les grains ne sont pratiquement plus liés par la glace et sont posés les uns sur les autres à la manière d'un château de cartes. Enfin, si la neige contient de l'eau, les grains ont tendance à s'arrondir. En effet, la température de fusion* de l'eau dépend de la courbure des grains : plus ce rayon est grand, plus la température est abaissée. Ainsi, les petits grains fondent en premier et disparaissent au profit des gros.

■ ■ Pourquoi les avalanches se déclenchent-elles ?

Lorsque la structure composée de grains de neige plus ou moins soudés entre eux devient trop fragile pour lutter contre la pesanteur, elle se brise, et l'avalanche se déclenche. Cela n'arrive pas seulement sur des terrains pentus, mais aussi sur des surfaces planes : on entend alors un bruit sourd dû à l'affaissement de certaines couches du manteau neigeux et à l'expulsion de l'air. La déstabilisation peut être provoquée par une surcharge. C'est le cas lors des

chutes de neige : la neige qui tombe n'a pas le temps de se consolider par le mécanisme des métamorphoses, ce qui conduit à la rupture. Le passage d'un homme, d'un animal, l'accumulation de neige par le vent ou une explosion provoquée sont aussi à même de conduire à une surcharge. La majorité des décès (une trentaine par an en France) est due à des avalanches provoquées par l'homme. Très souvent, une couche avec une bonne cohésion surmonte une couche plus fragile ; le passage d'une personne provoque, dans la couche la plus fragile, un effondrement local qui se propage. La couche supérieure va céder à l'endroit le plus fragile (qui n'est pas forcément l'endroit exact où la personne se trouve), provoquant une cassure. Autre cas de figure : la déstabilisation peut venir de la structure elle-même, sans aucune intervention extérieure. Cela se produit lorsque la cohésion des grains est faible : avec les gobelets ou l'après-midi dans les versants ensoleillés avec les grains ronds (la « neige de printemps »).

■ ■ Quels sont les différents types d'avalanches ?

Une rupture d'un manteau neigeux humidifié provoque généralement une avalanche « coulante » ; au contraire, si la pente est suffisamment longue (plusieurs centaines de mètres) et soutenue (supérieure à 35°), la rupture dans un manteau neigeux épais de neige froide et légère risque fort de donner naissance à une avalanche en « aérosol ». Dans les premières, l'écoulement se

fait sous la forme d'une nappe peu épaisse (quelques mètres pour les plus grosses), avec une vitesse très variable selon la consistance de la neige et la topographie (de 5 à 50 mètres par seconde). Dès 1922, l'ingénieur français Paul Mougin proposa un modèle dynamique très simple où l'avalanche coulante était assimilée à un bloc glissant soumis à la gravité et à un simple frottement solide. Des modèles plus complexes ont été ensuite mis au point, notamment par l'ingénieur suisse Adolf Voellmy vers 1950. Les analyses des données de terrain ou les expériences de laboratoire ont montré par la suite que les frottements entre les grains sont la principale source de dissipation d'énergie, ce qui explique la relative bonne performance des modèles anciens. Les avalanches en aérosol mobilisent, elles, la neige sous la forme d'un nuage turbulent, rapide (jusqu'à 80 mètres par seconde) et assez épais (une vingtaine de mètres, voire plus). Contrairement aux avalanches coulantes, le nuage est assez dilué (environ 20 kilogrammes par mètre cube) : il s'agit essentiellement d'un mouvement d'air avec quelques particules de glace (1% à 5% du volume global). Les modèles d'aérosol sont assez récents. Des chercheurs soviétiques, Andreï

Kulikovskiy et Elena Sveshnikova, ont proposé le premier modèle pertinent dans les années soixante-dix. L'idée-force : la dynamique de l'aérosol est commandée par deux processus antagonistes au cours de la descente, l'incorporation d'air atmosphérique, qui a tendance à le diluer, et l'incorporation de la neige du manteau neigeux, à l'effet contraire.

■ ■ Peut-on prévoir les avalanches ?

On peut prévoir les conditions favorables au déclenchement, mais pas un déclenchement en particulier, car il est impossible, en pratique, d'avoir accès à tous les paramètres nécessaires. La prévision des zones et des périodes propices aux avalanches repose sur la surveillance continue du manteau neigeux. On prête attention en particulier à la cohésion globale du manteau neigeux, à la qualité des différentes couches de neige, à la présence de couches fragiles (et à leur profondeur d'enfouissement), etc. Cette surveillance est faite en général à l'échelle de zones où les conditions nivométéorologiques (chutes de neige et météo) sont considérées comme homogènes. Pour chaque zone, on prend en compte les variations du manteau neigeux selon des « tranches » d'altitude (par exemple correspondant à une limite pluie-neige), l'orientation (la neige n'a pas la même température selon les versants et évolue donc différemment) et la proximité des crêtes (pour prendre en compte le transport par le vent). Des réseaux d'observation relèvent des paramètres météorologiques quotidiens (température, humidité, vent, précipitations neigeuses) et font des mesures ponctuelles en surface et en profondeur dans le manteau neigeux (température, densité, type de grains, cohésion, présence d'eau liquide). En croisant ces informations avec les prévisions météorologiques, il est possible de prévoir la structure de l'ensemble du manteau neigeux et donc d'en déduire le risque d'avalanche. Ce dernier ne se chiffre pas, et les bulletins ⇒

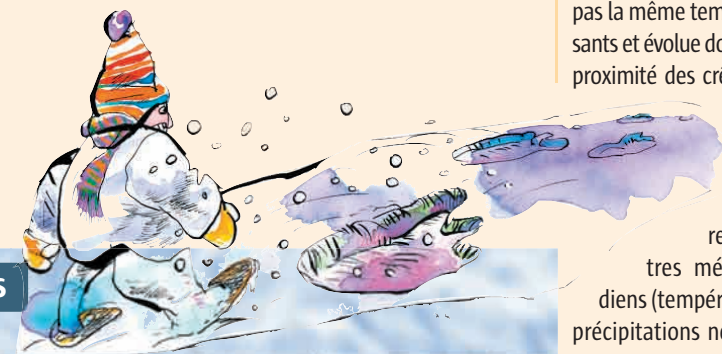


Fig.1 Chutes de neige journalières

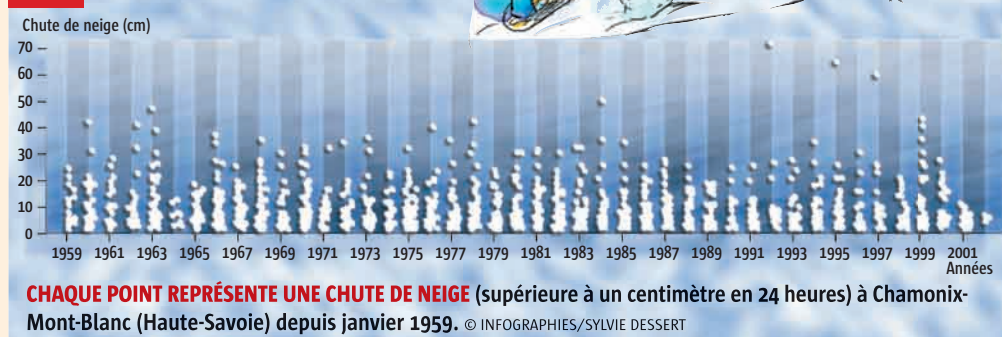
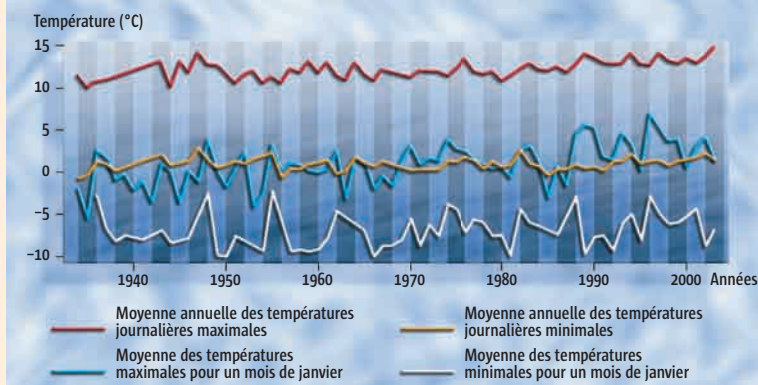


Fig.2 Variation des températures moyennes

À CHAMONIX-MONT-BLANC, en Haute-Savoie, l'enregistrement, de 1934 à nos jours, des moyennes annuelles des températures minimales (en jaune) et maximales (en rouge), montre que celles-ci ont peu varié, de même que les minima des mois de janvier (en blanc). En revanche, la moyenne des maxima au mois de janvier (en bleu) a significativement augmenté.

⇒ écrits indiquent un niveau de risque sur une échelle qui, en Europe, est unique et compte cinq niveaux. Cette échelle décrit des situations typiques ; elle est croissante en termes de risque pour le pratiquant de la montagne.

■ ■ Neige-t-il moins qu'avant ?

Selon une croyance très répandue, il neige moins qu'avant. Qu'en est-il réellement ? En ce qui concerne les chutes de neige, on note une variabilité du nombre annuel de chutes et de leur intensité ; cette variabilité est plus ou moins forte selon la région. Les Alpes du Nord bénéficient ainsi d'une meilleure continuité que les Alpes du Sud en termes de cumul annuel de neige. Mais les valeurs record de chute de neige journalière sont enregistrées dans les Alpes du Sud : le relief escarpé du Sud de la France force la rencontre entre des masses d'air chaud et humide venues de la Méditerranée et des masses d'air froid en altitude, ce qui explique l'intensité des précipitations. Cela dit, que l'on s'intéresse aux cumuls annuels moyens de neige, aux chutes de neige extrêmes, ou au nombre annuel de chutes de neige, les chroniques météorologiques ne révèlent aucune diminution significative. Prenons l'exemple de Chamonix (à 1 050 mètres d'altitude), où les chutes de neige sont mesurées depuis 1959 [fig. 1]. On observe des variations considérables d'une année sur l'autre et sur des périodes de trois à sept ans. On constate aussi des choses surprenantes : les plus fortes chutes de neige journalières

ont été observées durant la décennie quatre-vingt-dix, qui est l'une des moins enneigées en moyenne.

Pour savoir si la variabilité des chutes de neige ne cache pas une tendance plus systématique, il faut utiliser des méthodes statistiques très poussées. Les tests réalisés sur les données récoltées depuis la fin du XIX^e siècle (en Suisse) ou du milieu du XX^e siècle (en France) permettent d'attester de la stabilité des précipitations de neige. La diminution de l'enneigement ne peut donc être attribuée à une réduction des précipitations, ni en intensité ni en quantité.

■ ■ Alors pourquoi l'enneigement au sol devient-il de plus en plus faible ?

Au-dessous de 1 800 mètres, contrairement aux précipitations de neige, l'enneigement au sol a varié de façon notable. Sur le site expérimental de Météo-France au col de Porte (1 360 mètres), au-dessus de Grenoble, les mesures permettent de montrer



une diminution de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux et de la période d'enneigement : entre 1960 et 2004, son épaisseur moyenne a diminué assez régulièrement pour passer de 116 centimètres à 54 centimètres. Il est vraisemblable que, pour les stations de basse altitude, cette tendance perdure, voire s'accélère, dans les années à venir.

Le facteur principal qui influe sur le maintien de la neige au sol est la température de l'air, et on note bien au cours des dernières décennies une augmentation des températures pour la plupart des postes sur les Alpes. Comme pour les chutes de neige journalières, ce constat mérite d'être contrasté car, selon la saison et le lieu considéré, on peut aboutir à des conclusions différentes.

Ainsi, si l'on prend la moyenne des températures minimales et maximales à Chamonix depuis 1934 [fig. 2], on note assez peu de variations. En revanche, si l'on ne s'intéresse qu'à la moyenne des maxima au mois de janvier, on s'aperçoit qu'elle a significativement augmenté : elle passe de $-0,9$ °C avant 1945, à $+3,3$ °C pour la dernière décennie (alors que, dans le même temps, la moyenne annuelle des températures maximales est passée de $+11,8$ à $+13,6$ °C). Un constat similaire peut être dressé pour d'autres postes comme celui de Davos en Suisse, pour lequel on dispose de données journalières de températures depuis 1881. Cette tendance a des conséquences sur le milieu naturel (fonte des glaciers) ou sur le plan économique (enneigement des stations de ski, principalement en moyenne altitude). En revanche, l'impact sur l'activité avalancheuse semble beaucoup plus réduit. Notons par ailleurs qu'au-dessus de 1 800 mètres d'altitude, aucune tendance significative n'a été détectée. ■■

POUR EN SAVOIR PLUS

- C. Ancey (coord.), *Guide neige et avalanches*, Édisud, 1998.
- D.M. McClung et P. Schaerer, *The Avalanche Handbook*, The Mountaineers, 1993.
- www.larecherche.fr