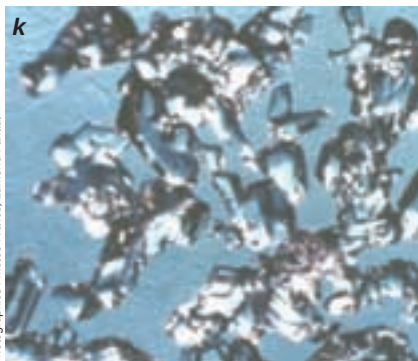


0,5 MILLIMÈTRE



5 MILLIMÈTRES

Photographies : Météo-France, Edmond Pelaut

2. LA FORME D'UN CRISTAL DE NEIGE varie selon la température. L'eau des excroissances d'un cristal en étoile se sublime, puis se condense dans les cavités (a et j). Le cristal s'émousse et devient un grain sphérique (de b à e). Ce dernier évolue encore et acquiert une forme pyramidale dite en «gobelet» (k et de f à i) lorsque la partie supérieure du grain se sublime tandis que de l'eau se condense sur sa partie inférieure.

un des scénarios possibles d'évolution des cristaux de neige.

La cohésion des cristaux en forme d'étoile, qui résulte de l'enchevêtrement des ramifications de ces cristaux, est faible (voir la figure 3). Quand la température varie peu dans l'épaisseur d'une couche (moins de 0,05 °C par centimètre), les cristaux en étoile évoluent spontanément vers une forme thermodynamiquement plus stable : les aspérités des étoiles se subliment, c'est-à-dire qu'elles passent de l'état

solide à l'état gazeux. Cette vapeur d'eau se condense au contact des zones concaves, au voisinage de la partie centrale des cristaux : les cavités se remplissent de glace. L'étoile s'émousse et prend peu à peu une forme sphérique nommée grain fin. Cet état compact confère à la couche une cohésion élevée grâce aux ponts de glace qui se forment : les points de contact des cristaux délimitent aussi des cavités où la vapeur d'eau se condense et relie les cristaux entre eux. Quand la température varie davantage (supérieure à 0,2 °C par centimètre), les grains fins se transforment à nouveau, car le gradient de température crée des zones plus chaudes où la sublimation est favorisée et des zones plus froides propices à la condensation : c'est toute la surface supérieure des grains qui se sublime, tandis que, sur la partie basse, l'eau se condense, s'accumule et cristallise : le grain acquiert une forme de pyramide, dite en «gobelet» (voir la figure 2). En raison des angles saillants, ces cristaux adhèrent moins les uns aux autres ; les couches de gobelets, dites «fragiles», sont moins stables.

Enfin, lorsque la température est proche de 0 °C, la neige s'humidifie et fond partiellement. Le film d'eau règle parfois : la cohésion de ces croûtes de regel, est forte. Le Centre d'étude de la neige de Météo-France, qui utilise aujourd'hui les rayons X pour étudier les transformations des cristaux de neige, a identifié plus de 1 000 types de particules neigeuses dont la formation dépend des échanges thermiques au sein de la couche et de la géométrie des cristaux. Les chutes de neige successives et les transformations des cristaux selon les variations climatiques constituent un manteau neigeux hétérogène et stratifié dont les propriétés mécaniques, notamment la cohésion, varient d'une couche à l'autre.

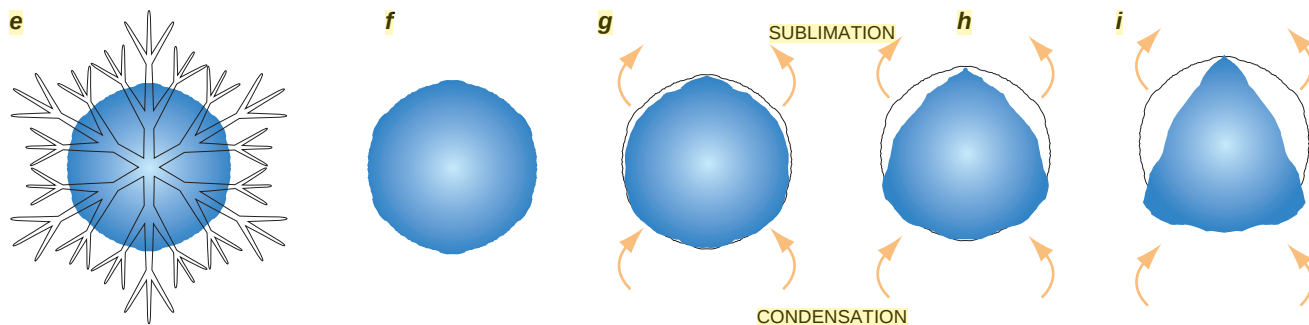
De plus, le vent transporte la neige tombée, il modifie sa répartition et le profil du manteau neigeux. Un vent suf-

fisamment fort arrache des grains de neige fraîche et les emporte jusqu'à ce qu'ils retombent sous l'effet de la gravité. Quand leur énergie cinétique est suffisante, ils expulsent à leur tour de nouveaux grains de neige (un grain arrache jusqu'à une dizaine d'autres grains) qui, par un effet «boule de neige», déplacent une quantité importante de neige. Ce phénomène, nommé saltation, est identique à celui de la formation des dunes de sable. Lorsque la vitesse du vent augmente, la saltation est prolongée au-dessus par une mise en suspension des grains de neige qui ne touchent plus le sol : leur déplacement devient turbulent (voir la figure 4).

Les plaques

En haute montagne, lorsque le vent accumule de la neige à proximité d'une crête, les risques d'avalanche sont renforcés. Sur la face exposée de la crête, le vent arrache des grains de neige fraîche, par exemple des cristaux en étoile, et les emporte. Avant la crête, le vent accélère par effet Venturi, selon lequel, en présence d'un goulet d'étranglement, la pression d'un fluide qui s'écoule diminue tandis que sa vitesse augmente. Au moment de l'arrachement et pendant le transport, les cristaux de neige sont brisés et deviennent sphériques. Après la crête, le vent ralentit : les cristaux se déposent et s'accumulent. Certains de ces cristaux de neige forment une corniche au sommet de la crête, d'autres s'accumulent sur le versant montagneux situé en aval et, grâce à la formation de ponts de glace, forment une plaque cohésive (voir la figure 5). Nous nous limiterons à l'étude du comportement de ces plaques créées par le transport éolien de la neige, dont on estime que les ruptures sont responsables d'environ 80 pour cent des avalanches majeures.

Les précipitations successives, ainsi que le transport de la neige par le vent sont responsables de la stratification



du manteau neigeux et de la formation des plaques. L'existence d'une couche fragile enfouie et la mauvaise adhérence des strates créent ainsi des zones de fragilité et d'instabilité. Quels sont les différents modes de rupture liés à cette stratification ? Nous avons étudié le cas simple de la superposition de deux couches : une plaque qui repose sur une couche fragile.

À l'équilibre, une plaque est soumise à son poids ; aux frottements avec la couche inférieure et avec la neige située sur les côtés ; à la résistance à la traction de la zone d'ancrage en amont et à la résistance à la compression du manteau neigeux en aval. Cette plaque exerce sur la couche inférieure une contrainte définie par le rapport de la force (ici le poids de la plaque) sur sa surface : elle se décompose en une composante perpendiculaire à cette surface et en une composante tangentielle (parallèle à la pente). Cette composante tangentielle est la contrainte de cisaillement de la couche inférieure.

Lorsque la neige s'accumule sur une plaque, la couche fragile inférieure risque de s'effondrer brutalement sous la charge : les forces de frottement sous la plaque s'annulent, les résistances et les frottements restants ne suffisent plus à la retenir ; elle se détache et dévale la pente.

En d'autres termes, la plaque qui compose l'avalanche se désolidarise du manteau neigeux d'abord parallèlement au sol, puis perpendiculairement au reste du manteau neigeux qui reste en place.

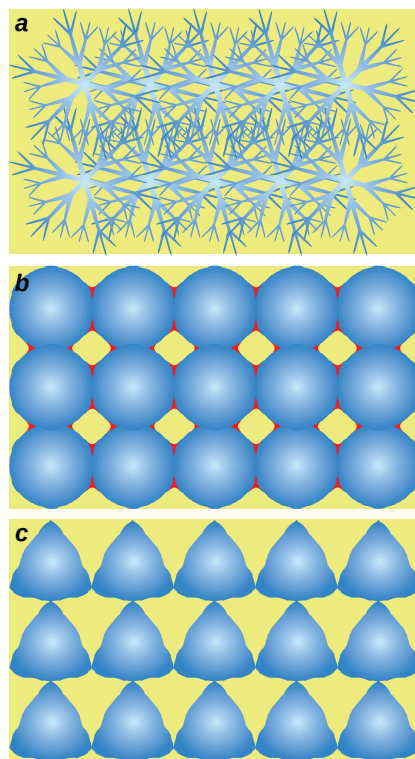
Cette instabilité est renforcée par le déséquilibre dans la répartition de la neige au sein d'une plaque : pour un même volume de neige, la surface des bords d'une plaque épaisse de trois mètres en son centre et de quelques dizaines de centimètres à la périphérie est inférieure à celle des bords d'une plaque homogène dans son épaisseur ; ainsi, sur les côtés, les forces de frottement d'une plaque hétérogène sont plus faibles.

Outre le déclenchement spontané, une perturbation locale, tels la chute d'une corniche ou le passage d'un skieur, est souvent la cause d'un écoulement. La surcharge instantanée de la plaque diminue localement l'épaisseur de la couche inférieure. La plaque se déforme alors pour s'adapter localement à la nouvelle géométrie de la couche inférieure. Cette déformation locale se propage dans la plaque, telle une ride à la surface de l'eau : la couche inférieure s'effondre alors de proche en proche ; le contact entre les plaques est rompu, les forces de frottements disparaissent et la plaque se décroche (voir la figure 7). Ce phénomène est d'autant plus probable que la plaque est fine et déformable. En outre, plus la pente est forte, plus le déclenchement est facilité. Désolidarisée du manteau neigeux, la plaque dévale la pente : c'est l'avalanche !

Les différents types d'avalanches

On distingue les avalanches denses où la neige reste compacte, les écoulements aérosols où la neige, mélangée à l'air, forme un nuage, et enfin les avalanches mixtes qui allient les deux types d'écoulement. L'écoulement le plus fréquent est l'avalanche dense qui suit les couloirs naturels, les ravins qui entaillent les versants montagneux : elle dévale les pentes à une vitesse de 20 à 30 mètres par seconde ; sa masse volumique est celle de la neige, de 150 à plus de 450 kilogrammes par mètre cube (l'eau a une masse volumique de 1 000 kilogrammes par mètre cube). En revanche, l'écoulement aérosol, plus rare dans les montagnes européennes, est plus turbulent et plus volumineux, car la neige, qui peut atteindre une vitesse de 60 mètres par seconde, incorpore l'air ambiant : sa masse volumique n'est que de 10 à 40 kilogrammes par mètre cube.

Les dégâts dépendent de l'énergie emmagasinée, de sa répartition au sein



3. LA COHÉSION D'UNE COUCHE dépend du type de cristal : une couche de cristaux en étoiles enchevêtrés (a) ou de gobelets aux angles saillants (c) est peu cohésive et instable. En revanche, grâce aux « ponts de glace » (en rouge), une couche de grains fins (b) est très cohésive, c'est-à-dire compacte et stable.

de l'avalanche et des obstacles, du volume de neige mobilisé et des caractéristiques du couloir. Les avalanches denses sont destructrices par la quantité d'énergie cinétique emmagasinée sur la pente parcourue, alors que les avalanches aérosols sont dévastatrices d'abord par le souffle engendré, puis par la vitesse et la turbulence de son écoulement. Les deux types d'écoulement arrachent parfois des arbres et descendent des blocs rocheux qui amplifient encore les dégâts, car ces éléments, plus denses, augmentent localement la pression de l'écoulement.

Les avalanches mixtes, telle celle d'Arinsal, en Andorre, en 1993, qui s'est déclenchée à plus de 2 000 mètres