

La physique des avalanch

M. NAAIM • F. BOUVET-NAAIM • L. VIDAL

Une meilleure compréhension de la physique des avalanches et la modélisation de leurs mécanismes améliorent la prévention des risques.

Au XVIII^e siècle, la neige était vitale pour les montagnards. Chaque hiver, ils l'attendaient pour transporter sur des traîneaux le bois et le fourrage stockés en altitude pendant l'été. Elle protégeait également du gel les terres ensemencées et fournissait de l'eau, au printemps, au moment de la fonte. Aujourd'hui, grâce aux véhicules mécaniques, l'homme dépend moins des conditions climatiques. Pourtant, l'or blanc est devenu le cœur de l'économie de la plupart des régions montagneuses qui accueillent tous les ans les adeptes des sports de glisse. Hélas, trop de neige nuit et, chaque saison, les dégâts et surtout les victimes des avalanches nous rappellent les dangers de la montagne. Par exemple, le 23 janvier 1998, l'avalanche des Orres a fait 11 victimes, ou, plus récemment, le 29 janvier 2000, l'avalanche de Thones, près d'Annecy, quatre victimes. Peut-on comprendre ce qui semble être un caprice de la nature pour en éviter les conséquences dramatiques ?

Si toutes les avalanches sont des écoulements rapides d'une masse de neige le long d'une pente sous l'effet de la gravité, elles diffèrent par leur ampleur et par divers paramètres physiques, notamment la compacité du manteau neigeux (la superposition de couches de neige différentes) et des écoulements, ainsi que par l'adhérence des couches de neige entre elles. Jusqu'à aujourd'hui, dans les modélisations des écoulements de neige, ces caractéristiques et les contingences naturelles n'avaient pas été suffisamment prises en compte. Les modèles étaient loin de la réalité.

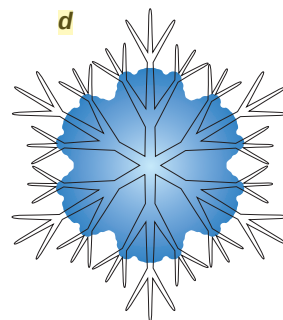
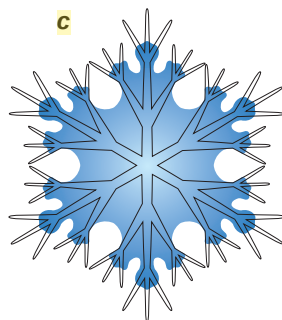
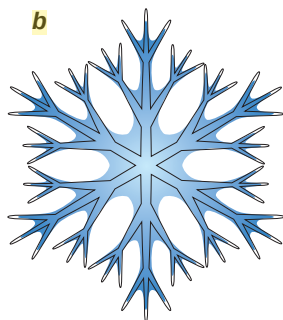
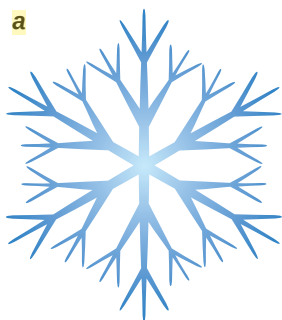
En étudiant les phénomènes de transport de la neige par le vent, nous avons détaillé la dynamique des avalanches, de leur déclenchement à leur arrêt. Ainsi, à partir de l'analyse des différentes étapes, c'est-à-dire la formation du manteau, sa rupture et l'écoulement lui-même, nous pouvons désormais simuler la plupart des avalanches majeures. Ces reconstitutions aident les collectivités à améliorer leurs plans d'occupation des sols et d'aménagement du territoire.

Le manteau neigeux

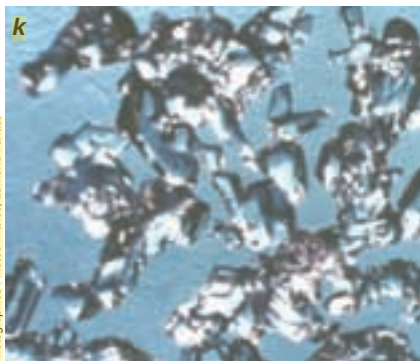
De sa formation en haute altitude jusqu'à sa fonte au printemps, la neige subit des métamorphoses qui modifient sa structure, sa cohésion, ainsi que les formes des cristaux. Dans un nuage, la neige cristallise sous des formes variées selon la température. Par exemple, lorsque la température est inférieure à -12°C, les cristaux ont une forme d'étoile ; quand la température est comprise entre -6 et -10°C, la neige tombe sous la forme de bâtonnets. Au sol, ces cristaux subissent également de nombreuses transformations en fonction du gradient de température qui règne à l'intérieur du manteau neigeux. Ce gradient varie selon le moment de la journée : au soleil, la surface est plus chaude que les couches enfouies ; inversement, pendant la nuit, la terre rayonne la chaleur emmagasinée, et les couches basses sont plus chaudes que la surface. Les métamorphoses des cristaux sont plus importantes la nuit, car les variations de température en fonction de la profondeur sont plus prononcées. Détaillons

1. AU COL D'ORNAN, en Isère, le nuage de neige d'un écoulement aérosol dévale une pente.





0,5 MILLIMÈTRE



5 MILLIMÈTRES

Photographies : Météo-France, Edmond Peliaud

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