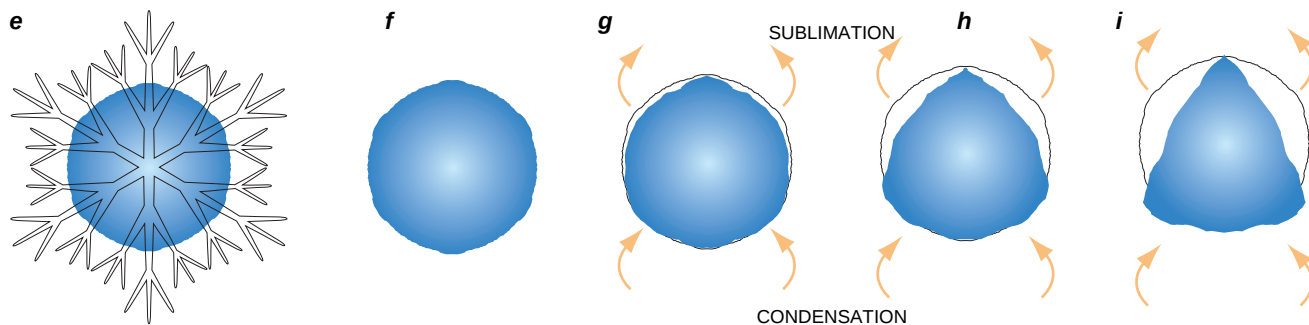




du manteau neigeux et de la formation des plaques. L'existence d'une couche fragile enfouie et la mauvaise adhérence des strates créent ainsi des zones de fragilité et d'instabilité. Quels sont les différents modes de rupture liés à cette stratification ? Nous avons étudié le cas simple de la superposition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

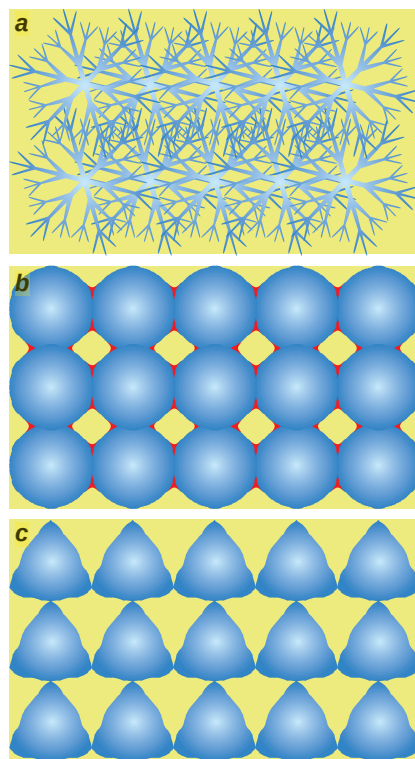
Cette instabilité est renforcée par le déséquilibre dans la répartition de la neige au sein d'une plaque : pour un même volume de neige, la surface des bords d'une plaque épaisse de trois mètres en son centre et de quelques dizaines de centimètres à la périphérie est inférieure à celle des bords d'une 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

d'altitude après une forte tempête, font encore plus de ravages : dans la faible pente où elle s'est formée, l'avalanche était un écoulement dense, puis, dans une zone plus pentue, sa vitesse a augmenté et sa couche supérieure s'est transformée en un aérosol. Les premiers étages d'un immeuble ont été brisés par la partie dense, tandis que les étages supérieurs ont été soufflés par l'aérosol. Avec de la neige sèche peu cohésive et sur une forte pente, l'augmentation de la vitesse fait évoluer l'avalanche vers un aérosol. À l'inverse, lorsque la

pente diminue, l'effet de la gravité disparaît, et les frottements arrêtent l'avalanche.

Cette première classification, qui distingue les écoulements selon leur masse volumique, n'explique pas tous les types d'écoulements, et nous l'avons complétée par l'analyse des mécanismes physiques. L'écoulement et les transitions entre les différents types dépendent des échanges d'énergie cinétique et de quantité de mouvement (le produit de la masse par la vitesse de la masse en mouvement) entre les constituants de l'avalanche.

Les transferts d'énergie

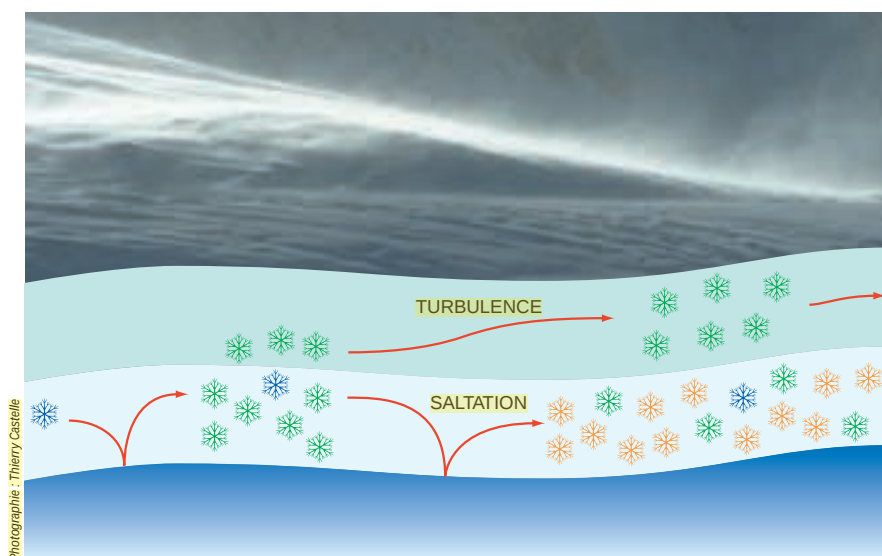
Initialement, le manteau neigeux est un milieu hétérogène et anisotrope, mais, après le déclenchement d'une avalanche, le matériau se désagrège, et le fort brassage mélange ses différentes couches et rend la composition de l'avalanche plus homogène.

Dans les avalanches de neige sèche et peu cohésive que nous avons étudiées, les frottements, les chocs ou la turbulence de l'air sont les seuls vecteurs d'énergie. Quand la masse volumique de l'avalanche de neige est élevée et la vitesse de l'écoulement faible, par exemple lorsqu'une avalanche dense dévale un couloir peu pentu, les contacts entre les grains sont longs, et les échanges d'énergie s'effectuent surtout par l'intermédiaire des frottements. Dans cette phase, les frottements entre les grains dominent, tandis que l'effet des chocs et de l'air est négligeable.

Lorsque la vitesse de l'avalanche dense augmente, son volume augmente également, tandis que sa concentration en glace diminue. Dans cette phase, les contacts entre grains sont de plus en plus courts, et la dissipation de l'énergie par frottements diminue au profit d'échanges de quantité de mouvement lors de chocs entre les cristaux de neige. L'écoulement est alors moyennement dense et rapide.

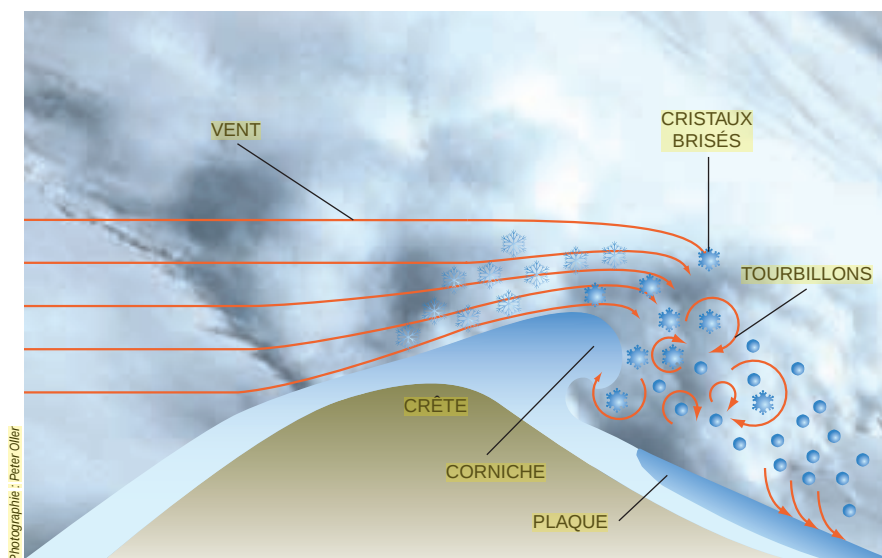
Quand la pente est forte sur une distance importante, la vitesse augmente. Les frottements et la cohésion de la neige étant faibles, les grains de neige sont alors arrachés et mis en suspension dans l'air : la majeure partie ou la totalité de la neige dense est ainsi intégrée dans l'aérosol qui se forme. Dans un écoulement aérosol, les grains sont totalement entourés d'air et n'interagissent plus. Les grains de neige sont portés par l'air, dont la turbulence assure la dissipation de l'énergie.

Pour une avalanche mixte, l'écoulement est composé d'une couche dense recouverte d'une couche de poudreuse en aérosol, qui se forme par l'érosion du sommet de la couche dense. Les deux couches interagissent en échangeant de la masse et de la quantité de mouvement (voir la figure 7). Dans les zones pentues, le front de l'avalanche est constitué de la partie dense, tandis que la partie aérosol est en retrait de 10 à 40 mètres, car elle est freinée par l'air qu'elle



Photographie : Thierry Castelle

4. UN CRISTAL DE NEIGE ARRACHÉ par un vent suffisamment fort déloge en retombant d'autres cristaux (cristaux verts) qui en font autant (cristaux orange) : peu à peu, la quantité de neige transportée par ce phénomène de saltation (couche bleu clair) augmente. Lorsque le vent s'accélère, les grains arrachés ne touchent plus le sol et sont emportés par la turbulence de l'air (couche verte).



Photographie : Peter Oller

5. AU-DESSUS D'UNE CRÊTE, le vent accéléré par effet Venturi arrache des cristaux de neige. Derrière la crête, le vent ralentit et forme des tourbillons : les cristaux brisés pendant le transport se déposent et forment, d'une part, une corniche et, d'autre part, une plaque de neige dense et cohésive qui, en se détachant, déclenche les avalanches.

incorpore. En revanche, dans la zone de faible pente, la partie dense, freinée par les frottements, s'arrête rapidement, tandis que la partie poudreuse en aérosol, entraînée par son inertie, parcourt une plus grande distance avant de s'arrêter.

En surface d'un écoulement dense, les particules de neige sont soulevées et mises en suspension dans l'air turbulent. La turbulence tend à maintenir les grains de neige en suspension, tandis que la gravité les entraîne vers le sol. Dans un aérosol, l'équilibre – ou le déséquilibre – entre ces deux forces détermine l'évolution de l'écoulement. Quand la turbulence de l'air l'emporte, l'écoulement s'amplifie ; à l'inverse, lorsque la gravité domine, l'aérosol régresse.

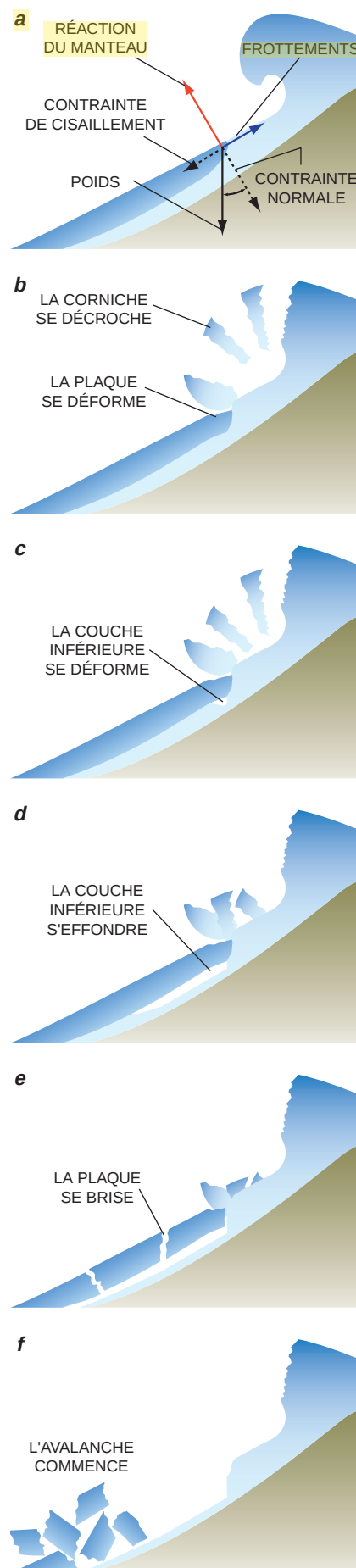
Connaissant la physique de la formation des couches de neige, du transport de la neige par le vent et du déclenchement des écoulements, nous avons modélisé la formation des avalanches catastrophiques et, pour les avalanches mixtes, les transitions et les échanges entre les deux phases de l'écoulement.

Modélisation et prévention

La modélisation du transport de la neige par les avalanches a longtemps consisté en des simulations effectuées sur des maquettes dans des souffleries. Cependant, celles-ci ne rendent pas compte de la complexité des phénomènes en jeu. Aussi, la modélisation physique a progressivement été remplacée par la simulation numérique.

Dans un premier temps, les écoulements denses et les aérosols étaient simulés par des modèles distincts. Par exemple, les avalanches denses étaient simulées par des modèles dits de la dynamique du point, dans lesquels l'écoulement est un bloc indéformable, assimilé à un point dont on étudie la trajectoire.

Puis, dans les années 1980, des modèles plus complexes sont apparus pour les avalanches aérosols : elles étaient étudiées comme l'écoulement d'une suspension. Toutefois, la plupart des avalanches catastrophiques sont composées d'une partie dense en contact avec le sol et d'une partie aérosol qui recouvre la partie dense. Les



6. UNE PLAQUE à l'équilibre (a) est soumise à son poids (en noir), à des forces de frottements du reste du manteau neigeux (en bleu) et à la réaction du manteau neigeux. L'ensemble des contraintes qui s'exerce sur la couche inférieure se décomposent en une composante normale et une composante tangentielle, nommée contrainte de cisaillement. La chute d'une corniche entraîne la rupture de la plaque. Sous la surcharge, la plaque en se déformant (b) écrase la couche inférieure (c). Cette dernière s'effondre de proche en proche (d) : les forces de frottements avec le reste du manteau neigeux ne suffisent plus à retenir la plaque, qui se brise (e et ci-dessus), se décroche, et dévale la pente (f).