

Départ des avalanches

avalanches suivent le même principe de base : la neige s'accumule sur la pente d'une montagne jusqu'à la force de gravitation excède les forces assurant la stabilité du manteau neigeux. Une couche de neige, parfois tout le manteau neigeux, peut alors se détacher de la couche sous-jacente, aboutissant à la formation d'une avalanche.

Chutes de neige et manteau neigeux

Pendant les tempêtes de neige, la neige s'accumule sur les pentes. La quantité de précipitations dépend de nombreux paramètres, dont les conditions climatiques globales, la topographie locale, et les caractéristiques des chutes de neige. Dans les Alpes, où le climat est continental ou tempéré, les chutes de neige quotidiennes ne dépassent généralement pas 130 cm. Par exemple, dans la vallée de Chamonix (France), les chutes de neige quotidienne maximale varie de 72 cm à 106 cm en fonction de l'altitude (1050-2100 m). Il atteint 130 cm au-dessus du col de la Bernina (Suisse). Dans les régions à climat maritime (comme la côte Pacifique des États-Unis, la Norvège et le nord du Japon), le conflit entre les grandes masses d'air chaudes et froides conduit à de fortes précipitations de neige le long de la côte. A Crestview en Californie (altitude 2300 m), le mois de janvier 1952 a battu les records avec 2,1 m de neige tombés en 24 heures.

Le cumul annuel de neige montre d'importantes variations spatiales et temporelles. Par exemple, dans la vallée de Chamonix, le cumul annuel moyen des chutes de neige dépend de l'altitude : à une altitude de 1050 m, il varie de 14 cm à 5,2 m, avec une moyenne de 2,5 m, alors qu'à 1500 m, il varie de 3 m à 12 m, avec une moyenne de 5,8 m. L'effet de l'altitude sur les totaux de neige est moins marqué aux altitudes plus élevées : quand on passe de l'altitude 1500 m à 2000 m, le

cumul annuel de neige (moyenne de 6,6 m, de 3,8 à 13 m de portée) augmente de 15%. Dans les régions à climat maritime, les chaînes de montagnes côtières connaissent des niveaux plus élevés de précipitations. En 1999, le total des chutes de neige a dépassé 28 m sur le mont Baker (Californie, altitude 3286 m).

En revanche, la quantité de précipitations sur de courtes périodes dépend beaucoup de l'altitude, principalement en raison des fluctuations de l'altitude de l'isotherme 0 °C pendant les précipitations. Pour la vallée de Chamonix, le record de précipitations sur 10 jours est de 1,3 m à 1050 m, 2,6 m à 1500 m, mais 4,15 m à 2000 m. Cette tendance croissante cesse très vraisemblablement à des altitudes plus élevées en raison de la diminution des effets de l'humidité de l'air et du vent.

La détermination de précipitations extrêmes de neige est d'une grande importance car la probabilité de déclenchement d'une avalanche augmente avec la quantité de neige fraîche. Comme beaucoup d'autres variables hydrologiques, le maximum annuel des précipitations quotidiennes de neige varie de façon aléatoire et ces variations sont bien décrites par une loi des valeurs extrêmes telles que la loi Gumbel. Cette distribution de probabilité relie l'intensité des précipitations avec leur fréquence d'occurrence. La probabilité d'occurrence d'un événement P extrême est très faible et une pratique courante pour distinguer les événements rares est d'introduire la période de retour $T = 1 / P$, exprimée en années. La précipitation associée à une période de retour de 100 ans a $P = 0,01$ de chances de se produire (ou d'être dépassée) au cours d'une période d'une année. La figure 1 montre la variation du maximum annuel de chutes de neige quotidienne dans le centre-ville de Chamonix (altitude 1050 m). La distribution des valeurs extrêmes décrit assez bien les maxima enregistrés, mais l'ajustement n'est pas parfait. Une légère non-stationnarité de la série temporelle (résultant de différents régimes climatiques au cours des dernières décennies) est la

cause probable de l'inadéquation.

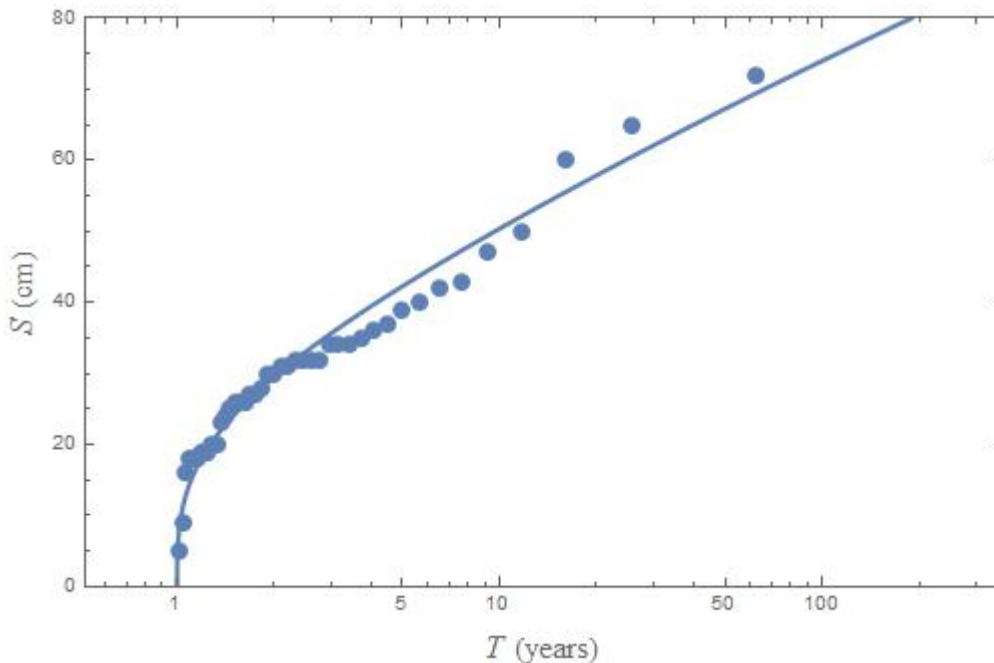


Figure 1 : variation de la neige tous les jours avec la période de retour à Chamonix (France) à une altitude de 1050 m. Les points représentent les chutes de neige mesurées (maxima annuels), tandis que la courbe continue montre la répartition de la loi des valeurs extrêmes ajustée sur les données.

Il a été très tentant d'appliquer la théorie des valeurs extrêmes aux avalanches, en particulier pour définir la période de retour d'un événement d'avalanche. Le principal problème est la détermination de la variable aléatoire qui décrit l'intensité de ce phénomène. Dans le zonage avalanche, la pression d'impact est utilisée dans la définition de la relation intensité-fréquence, mais son estimation à partir d'observations de terrain est difficile. Les scientifiques ont ainsi utilisé la distance d'arrêt (ou altitude d'arrêt), qui peut être facilement déterminée sur le terrain lorsque le dépôt d'avalanche est visible. Pour les régions avec une topographie régulière (au Canada et la Norvège), Dave McClung et Karsten Lied a montré comment la période de retour peut être définie à partir de la mesure des distances d'arrêt. Pour les chaînes de montagnes avec une topographie complexe, les

changements brutaux dans la topographie locale mènent à des changements importants dans la distribution des points d'arrêt sur de courtes distances, ce qui exclut l'utilisation de distributions des valeurs extrêmes. En l'absence de variables plus pertinentes, la période de retour est associée au volume de neige mobilisé par l'avalanche. Les chutes de neige sur 3 jours (ou l'accroissement de l'épaisseur du manteau neigeux en trois jours) sont utilisées comme « proxy » du volume d'avalanche et selon cette hypothèse, les périodes de retour de la neige et des avalanches résultant sont supposées être les identiques. C'est une approximation très grossière de la réalité, mais elle a l'avantage d'être applicable à une large gamme de problèmes en ingénierie et cartographie des risques.

Déclenchement des avalanches

Le déclenchement d'une avalanche ne dépend pas seulement de la quantité de neige fraîche, mais aussi sur d'autres paramètres météorologiques (tels que le vent et la température de l'air) et de la façon dont le manteau neigeux s'est construit à partir des chutes de neige successives. Une avalanche est principalement causée par une conspiration de facteurs plutôt que l'apparition d'un processus unique (par exemple, fortes chutes de neige). C'est pourquoi les prévisions de l'activité d'avalanche sur une zone donnée restent si difficiles. Beaucoup d'avalanches, surtout les grandes avalanches se produisent durant ou juste après une chute de neige. Avec les chutes de neige sur 3 jours qui dépassent 50 cm, le risque d'avalanche est marqué, tandis que des cumuls de neige supérieurs à 1 m sur 3 jours sont habituellement associés à une activité avalancheuse généralisée. Toutes les avalanches ne sont pas déclenchées par une surcharge de neige. Redoux et pluies peuvent également conduire à une diminution significative de la résistance de la neige, avec pour conséquence de grandes déformations du manteau neigeux, qui se finit par se rompre et former une avalanche.

Le terrain est également un facteur majeur qui explique pourquoi certaines pentes sont sujettes à des avalanches fréquentes, tandis que d'autres ne connaissent qu'une faible activité avalancheuse. Parmi les facteurs topographiques, la pente est le plus important de ces facteurs : pour les avalanches déclenchées par des skieurs, la plupart des accidents se produisent dans les zones de départ avec une pente variant de 30° à 45° . En de rares occasions, les avalanches naturelles et déclenchées par des skieurs sont observées sur des pentes « douces » (inférieures à 25°). D'autres caractéristiques topographiques (terrain de convexité, chemin de rugosité, végétation, orientation vers le soleil, l'altitude, etc.) jouent un rôle essentiel dans l'évolution du manteau neigeux. Dans la cartographie des avalanche (photo-interprétation), les zones de départ potentielles et les couloirs d'avalanche peuvent être identifiés en utilisant la photogrammétrie (maintenant remplacée par des systèmes d'information géographique) et c'est ainsi que l'inspection du terrain a longtemps été le principal outil pour obtenir une image qualitative de l'activité avalancheuse dans une région donnée.

La neige est un matériau très variable et complexe. Ses propriétés physiques montrent une grande diversité et elles sont sujettes à des variations significatives au cours de la saison. Par exemple, la masse volumique de la neige fraîche est typiquement de 100 à 200 kg/m³ gamme. Elle augmente en raison des métamorphoses et du compactage induit par son poids. La masse volumique typique d'un manteau neigeux varie de 200 à 400 kg/m³ au cours de la saison. En fin de saison, la masse volumique de la neige (névé) dépasse 600 kg/m³. La résistance au cisaillement et à la traction présente également des variations importantes au cours du temps. Par exemple, dans des conditions venteuses, une neige poudreuse (sans cohésion) acquiert rapidement de la cohésion (dite de frittage) et peut facilement supporter le poids d'un homme parce que des ponts de glace connectent les grains entre eux.

Si la température de l'air augmente suffisamment (sous l'effet du soleil ou en raison d'un redoux), de l'eau liquide apparaît et percole vers le bas. Les contacts entre les grains de neige sont ensuite lubrifiés par une mince pellicule d'eau liquide et la neige perd la majeure partie de sa cohésion.

La vie d'un manteau neigeux passe généralement par deux grandes étapes. En début de saison, la neige s'accumule couche après couche, donnant au manteau neigeux l'apparence d'un sandwich. Les propriétés physiques (masse volumique, cohésion, résistance au cisaillement) peuvent être très différentes d'une couche à l'autre. L'interface entre les couches joue également un rôle important. Par exemple, il peut être composé de neige sans cohésion (givre de profondeur, grains à faces planes), qui offre une faible résistance au cisaillement, ou au contraire de la neige dure (croûte de soleil générée, croûte gelée-neige), qui forme un plan de glissement idéal. Ces couches fragiles sont une condition nécessaire pour la formation des avalanches. Quand elles cassent (sous l'effet d'une surcharge de neige ou d'une action humaine), les couches supérieures au-dessus de la couche fragile glissent vers le bas sous la forme d'une plaque, ce qui brise rapidement en des milliers de morceaux. L'avalanche résultante est appelée une avalanche de plaque. Les lignes de fracture peuvent être très grandes, allant de 10 à 1000 fois l'épaisseur de la plaque. Une caractéristique remarquable des avalanches de plaques est que lorsque le manteau neigeux est suffisamment instable, le poids d'un seul homme est suffisant pour créer la perturbation initiale qui rompt l'équilibre de tonnes de neige. Ceci explique le nombre des décès causés chaque année par les skieurs qui déclenchent par eux-mêmes les avalanches qui les ensevelissent. La figure 2 montre la coupe zigzag typique de la fissure supérieure (couronne) d'une avalanche de plaque impliquant neige sèche.



Figure 2 : déclenchement d'une plaque sur tout le versant ouest de la Dent de Lys (Canton de Fribourg, Suisse).

Lorsque l'on approche de la fin de la saison, la structure du manteau neigeux évolue radicalement sous l'effet de l'eau liquide. En raison de la température de l'air ou des pluies, une partie des grains de neige fond. L'eau liquide a des effets différents sur la neige. En premier lieu, elle modifie les liaisons entre les grains de glace et, en particulier, elle favorise la formation de grains de glace maintenus ensemble par des forces capillaires provenant des ménisques d'eau formées au niveau des points de contact entre ces grains. Par ailleurs, lorsque la teneur en eau liquide est suffisamment élevée (supérieure à 3 %), la couche liquide recouvrant la surface des grains peut s'écouler lentement sous l'effet de la gravité vers les couches à la base du manteau neigeux, ce qui altère la structure entière du manteau neigeux. Une faible teneur en eau liquide consolide généralement une couverture neigeuse : les couches fragiles sont progressivement transformées et lors du gel nocturne, les ponts liquides entre les grains de neige gèlent de nouveau et

assurent ainsi une forte cohésion. Lorsque la teneur en eau liquide dépasse un seuil critique (de 3 % à 5 %), l'eau s'infiltré dans les couches inférieures et peut se concentrer le long du sol ou de croûtes de regel au sein du manteau neigeux. Si la température de l'air est trop élevée et la neige ne gèle plus la nuit, la neige perd sa cohésion. La plupart du temps, les avalanches partent d'un point et gagnent en volume au fur et à mesure qu'elles descendent. Ces avalanches sont appelées avalanches de neige mouillée. La figure 3 montre de tels départs ponctuels.



Figure 3 : avalanche de neige issu d'un seul point et impliquant la neige mouillée en fin de saison. L'épaisseur de la dalle de neige humide ne dépasse pas quelques dizaines de centimètres.

Moins fréquemment, l'eau liquide lubrifie l'interface entre le manteau neigeux et le sol, ce qui conduit à de grandes déformations internes. Les variations locales de la vitesse de

glissement peut générer d'importants efforts de traction au sein du manteau neigeux et une fois qu'un niveau critique de contrainte est atteint, la couverture neigeuse développe une fissure dite de glissement. Vu de dessus, ces fissures de glissement forment souvent des crevasses en forme d'arc (appelées « gueules de baleine »), qui peut s'étendre sur quelques dizaines de mètres. Le délai entre l'apparition des fissures et le départ de la plaque varie de quelques heures à quelques semaines. Il semble être fortement corrélé avec la température de l'air et le degré de consolidation du manteau neigeux. L'avalanche résultant est appelé une avalanche de glissement. La figure 4 montre l'avalanche de glissement qui a endommagé un télésiège dans la station de ski de Saint-François-Longchamp : la fissure de glissement est apparue en janvier 2012. Au début de mars 2012, lors d'un redoux, les déformations au sein de la couverture de neige ont augmenté jusqu'à l'avalanche de glissement formé et est allé descente très lentement (la vitesse typique était de 1 m/s).



Figure 4 : fissure entraînant une avalanche de glissement après un passage doux en mars 2012 (Saint-François-Longchamp, France). Le dépôt d'avalanche atteint un télésiège et des pistes de ski. L'épaisseur moyenne de la neige le long de la fissure est de 1 m.

Haddock et les avalanches

À chaque début d'hiver, on me pose des questions sur les avalanches. Cette année, un journaliste m'a demandé s'il était vrai que la voix humaine pouvait déclencher des avalanches. Je donne dans ce billet quelques indications sur le sujet. Des récits de voyageurs à l'époque héroïque de la découverte des Alpes jusqu'aux aventures de Tintin au Tibet, on s'est plu à croire que le bruit, la voix, et le vent pouvaient causer le départ d'avalanches aussi fatales qu'improbables, qui emportaient avec elles les malheureux qu'elles trouvaient sur leur chemin. Très récemment encore, on pensait qu'un avion de chasse pouvait déclencher des avalanches, notamment s'il passait le mur du son au-dessus d'une pente de neige.

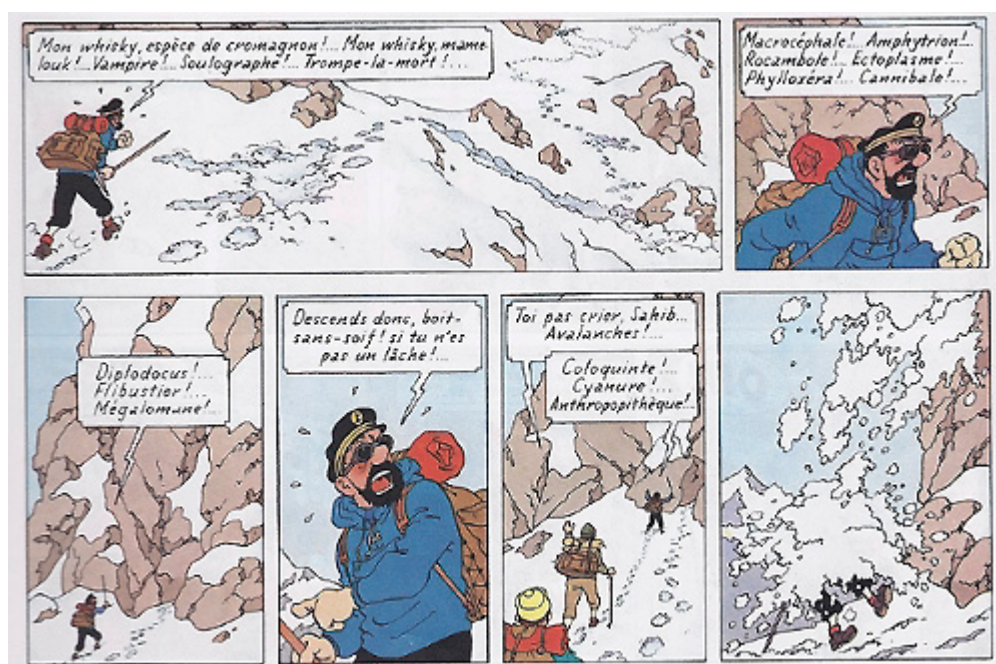


Figure 2 : Tintin au Tibet (Casterman) et l'avalanche déclenchée par le capitaine Haddock. DR.

Est-il réellement saugrenu de penser qu'une onde sonore puisse déclencher une avalanche ? Car, après tout, ce sont bien des explosifs qu'on emploie en station pour sécuriser les pistes de ski en déclenchant préventivement les avalanches. Et il existe par ailleurs de nombreux récits de randonneurs emportés par une avalanche quoiqu'ils se trouvaient loin de la zone de départ (donc qu'est-ce qui pourrait expliquer l'avalanche hormis un malheureux concours de circonstances ?).



Figure 2 : déclenchement d'une plaque au passage d'un skieur (col de l'Eglise, massif Belledonne, Isère, France).

Comme souvent en sciences, tout n'est question que d'ordre de grandeur. La voix humaine peut créer des ondes sonores, c'est-à-dire des variations de la pression atmosphérique, qui ne dépassent guère 1 Pa (Pa est l'unité de mesure de la pression en pascal : rappelons que la pression atmosphérique au niveau de la mer vaut environ 105 Pa et qu'un vent tempétueux peut générer des variations de pression pouvant atteindre 1000 Pa). Si le bruit émis par un avion à réaction est assourdissant,

les surpressions sont faibles : à peine 20 Pa quand on se situe à quelques dizaines de mètres de l'appareil. Plus intéressant est le cas de l'avion de chasse au moment où il passe le mur du son. Ce passage produit une « onde de choc », c'est-à-dire des variations brutales de pression, de masse volumique, et de température de l'air sur une distance très courte. Les sautes de pression peuvent dépasser les 500 Pa et se propager à grande vitesse (de l'ordre de 350 m/s) sur de grandes distances avec une atténuation plus faible qu'une onde sonore continue. Les ondes de choc développent aussi des profils de pression en N, avec tout d'abord une phase de dépression dans le front d'onde, puis une phase de surpression (ce qui contribue à ébranler tout objet soumis à l'onde de choc). Dans les stations de ski, on emploie des explosifs solides ou bien des mélanges détonants de gaz (comme un mélange d'oxygène et de propane) pour déclencher les avalanches. La combustion provoque une onde de choc (dite de détonation) qui se déplace à de très grandes vitesses (plus de 2000 m/s) et génère des variations significatives de pression. IAV Engineering, une spin-off de l'EPFL, arrivait à des mesures de surpression de 2500 Pa à 40 m de distance du point de tir pour un gazex (système de déclenchement, voir fig. 3).



Figure 3 : tube Gazex émergeant du manteau neigeux. La détonation du mélange propane-oxygène est réalisée dans une chambre sous terre, puis se propage dans le tube, qui dirige l'onde de choc vers le manteau neigeux.

Les études in situ, comme celles de Juerg Schweizer (SLF), ont montré que pour mettre en mouvement un manteau neigeux particulièrement instable, il suffit d'appliquer une surpression relativement faible de l'ordre de 200 à 500 Pa ; pour des manteaux neigeux plus stables, il faut exercer des surpressions importantes (plusieurs milliers de Pa). Un tel seuil disqualifie donc la voix comme moyen de déclenchement, mais montre qu'un avion militaire pourrait déclencher une avalanche s'il passe le mur du son au-dessus de pentes de neige instable.

Comment expliquer alors le déclenchement à distance d'avalanches par des randonneurs ? Tout simplement, parce que les ondes ne se propagent pas uniquement dans l'atmosphère sous forme d'onde sonore, mais également dans le manteau neigeux sous forme d'onde mécanique. Ces ondes, un peu comme

la vibration d'une corde de guitare, se déplacent également à très grande vitesse et sur de grandes distances, ce qui permet de mettre en mouvement tout un pan de montagne (voir fig. 2). C'est ainsi qu'un skieur, même évoluant sur des pentes douces, perturbe l'équilibre mécanique du manteau neigeux et crée des ondes qui se propagent de proche en proche sur des distances pouvant dépasser plusieurs centaines de mètres pour certains manteaux neigeux pulvérulents. Arrivant dans des pentes plus raides, ces ondes peuvent causer la rupture d'un manteau neigeux instable et créer une avalanche, qui ensevelira le randonneur perturbateur.

Si le départ d'une avalanche ne pas être produit par la voix humaine, on retiendra que ce sont quand même les ondes qui en sont la cause.

Aller plus loin :

- Benjamin Reuter and Jürg Schweizer : Avalanche triggering by sound: myth and truth, International Snow Science Workshop, Davos 2009, Proceedings 330
International Snow Science Workshop Davos, pp. 330-333.
- Schweizer, J., J.B. Jamieson, and M. Schneebeli, Snow avalanche formation, Reviews of Geophysics, 41, 1016, 2003.