Avalanche de l’Arcelle du 16 avril 2009

Dans l’après-midi du 16 avril 2009, une avalanche s’est produite dans le cirque de l’Arcelle. Elle a coupé deux pistes de ski du domaine de Val-Cenis-Vanoise. Cet article revient sur les circonstances et les conséquences de cet événement exceptionnel.

Site

Le site de l’Arcelle est un vaste versant qui s’étire du Signal du Mont-Cenis (3377 m) jusqu’à la rive gauche de l’Arc (1470 m) à Lanslevillard (Savoie). La ligne de crête longue d’environ 1,8 km dépasse les 3000 m d’altitude. L’orientation générale est au nord-ouest, mais certains panneaux du cirque sont exposés différemment. Le site est connu pour son activité avalancheuse. Des avalanches coulantes exceptionnelles comme celle de mai 1983 peuvent atteindre l’Arc ; le haut du site a également été à plusieurs reprises balayé par des aérosols plus ou moins puissants et des avalanches coulantes rapides. C’est ce caractère avalancheux qui a longtemps été un frein à l’équipement du secteur. Les responsables de la station s’étaient donné plusieurs saisons d’observation pour déterminer la meilleure façon d’aménager le secteur. Un lanceur pneumatique (avalancheur) a été installé durant l’hiver 1997-98 afin de tester les pentes de l’Arcelle. À l’automne 2000, plusieurs gazex ont été disposés dans tout le cirque pour protéger les nouvelles pistes de ski.

Conditions météorologiques

La saison 2008-09 a été particulière sur le plan nivo-météorologique. La position stable, mais anormale des centres dépressionnaire et anticyclonique sur l’Atlantique nord a

permis la succession de retours d'est, où de l'air humide venant de Méditerranée remontait vers les Alpes, où il rencontrait un courant polaire, ce qui générait des chutes de neige localement abondantes sur toute la chaîne frontalière. Les températures sont restées durablement froides, même si elles n'ont pas atteint les records enregistrés en 2006. L'enneigement a été globalement très bon, voire exceptionnel sur certains secteurs. Une activité avalancheuse de grande ampleur a été observée dans les massifs méridionaux et le long de la chaîne frontalière en décembre 2008 ; dans le cirque de l'Arcelle, une avalanche avec une composante en aérosol a causé des dommages mineurs à la gare de départ du télésiège de l'Arcelle (2320 m).

L'hiver s'est passé assez tranquillement sur Val-Cenis, avec des chutes de neige assez régulières et des températures froides. Au début du mois d'avril, des conditions anticycloniques se sont maintenues plusieurs jours sur les Alpes, avec des températures moyennes plus élevées que la normale et l'isotherme 0 °C oscillant entre 2500 et 3000 m d'altitude. Les nuits claires ont favorisé le regel de surface du manteau neigeux, tandis qu'une activité avalancheuse modérée (essentiellement des coulées de neige humide) était observée durant les fins de journée. Lors du week-end de Pâques (11-13 avril 2009), une situation de barrage s'est installée, causant parfois de fortes chutes neiges sur la chaîne frontalière. Celles-ci sont toutefois restées modérées sur Val-Cenis (voir fig. 1). Le lundi de Pâques, la situation est redevenue globalement anticyclonique sur les Alpes, mais une dépression secondaire était en train de se creuser sur la Méditerranée. Le mercredi 15 et le jeudi 16 avril, une situation de foehn concerna les chaînes frontalières ; la limite des chutes de neige se situa autour de 2000 m et descendit jusque vers 1500 m en fin d'épisode (matinée du 16 avril). Sur Val-Cenis, cet épisode a amené environ 30 cm de neige à 2000 m, sans doute 40 à 50 cm de neige en altitude. Malgré ces chutes de neige, le manteau neigeux à 2000 m avait

déjà commencé sa fonte printanière. Pour la journée du 16 avril, Météo-France annonçait un risque 3 (évoluant en 4 durant l'après-midi), ce qui est le cas le plus souvent en cette saison après des chutes de neige et des oscillations de l'isotherme 0 °C.

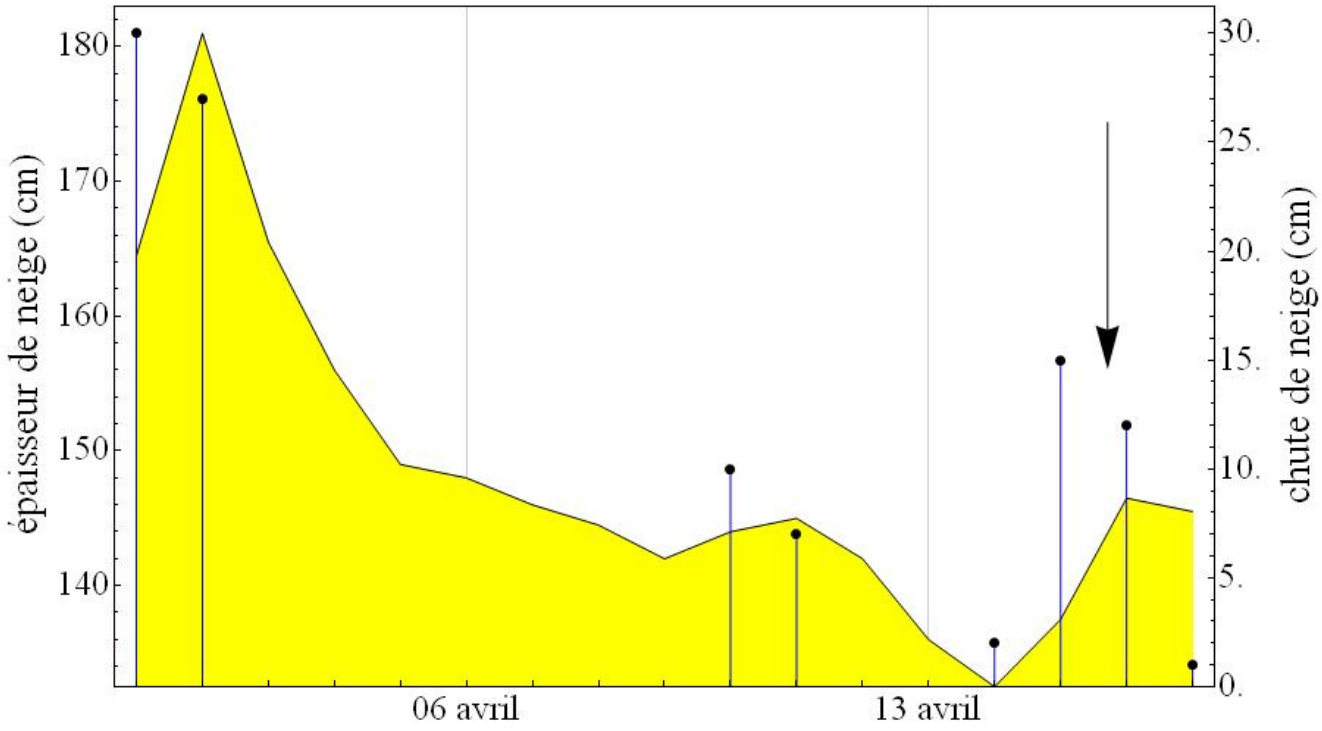

Figure 1 : chronologie des chutes de neige sur le poste du Vieux Moulin (1970 m) pendant le mois d'avril 2009. On a reporté les chutes de neige journalières (points) et l'évolution de l'épaisseur du manteau neigeux (courbe). La flèche indique la date de l'avalanche.

Circonstances de l'avalanche

Le service des pistes a conduit des opérations de déclenchement préventif dans le cadre du plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches (PIDA) après les chutes de neige du 15 et 16 avril au matin. Les artificiers ont d'abord tenté de procéder à des tirs sur tout le secteur de l'Arcelle à l'aide des gazex, mais compte tenu de la défaillance de l'un des gazex sous la pointe de la Nunda, ils ont décidé de compléter les tirs en lançant deux flèches

explosives avec l’avalancheur situé à l’entrée du cirque (2400 m). Ces flèches sont tombées dans le haut du cirque et n’ont pas donné lieu à des départs d’avalanche. Les tirs ayant été négatifs, le service des pistes a ouvert le domaine skiable et les remontées mécaniques sur tout le domaine d’altitude.

L’avalanche de la Nunda est partie naturellement en tout début d’après-midi (vers 13 h 15). C’est le seul événement survenu sur le domaine skiable d’après les artificiers ; aucune autre avalanche d’ampleur n’a été signalée ce jour-là en Maurienne ou dans les Alpes (en particulier aucun accident n’a concerné des skieurs en hors-piste ou ski de randonnée). La seule activité avalancheuse d’ampleur sur l’ensemble des Alpes françaises et suisses a eu lieu le 13 avril (plusieurs départs d’avalanche dus à des passages de skieurs se sont produits ce jour-là, avec en particulier, une avalanche à la Pointe Joanne, Queyras, faisant 3 morts et une avalanche à la pointe des Montets, Vanoise, à la limite du domaine skiable de Val d’Isère, sans faire de victime).

Dans la partie supérieure du cirque de l’Arcelle, le manteau neigeux était typique d’un manteau neigeux froid de haute altitude tel qu’on le rencontre dans les versants nord au printemps. La température était largement négative sur une grande profondeur du manteau neigeux tandis que près de la surface, la teneur en eau liquide était faible. Il ne présentait pas de structure évidente qui puisse laisser présager une quelconque instabilité (couche fragile, faible cohésion, etc.). La figure 2 montre le profil stratigraphique réalisé 5 jours après l’avalanche dans la zone de départ ; aucun sondage n’a été réalisé dans la zone de dépôt (entre 2200 et 2300 m), mais compte tenu des différences d’ensoleillement et de pente, il est clair que le manteau neigeux y était caractéristique d’un manteau neigeux printanier, composée en partie de neige humide (grains ronds).

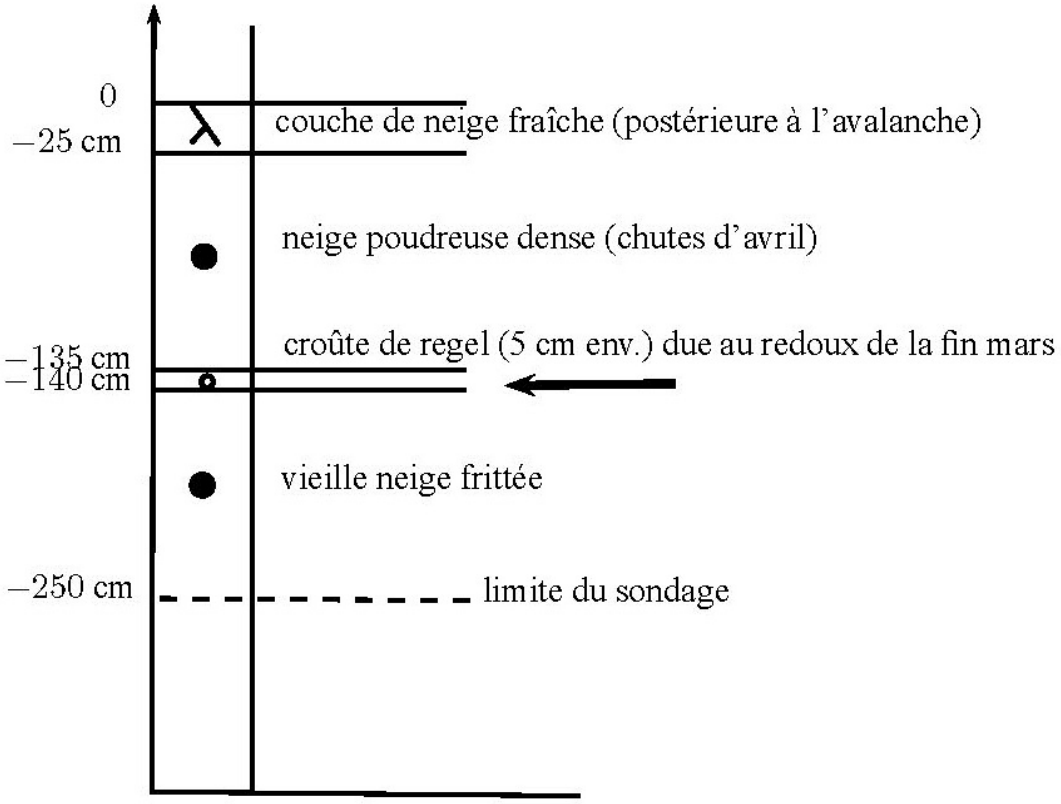

Figure 2 : sondage stratigraphique réalisé le mardi 21 avril 2009 à 2750 m, à l'amont immédiat de la ligne de fracture (vers 2700 m) de l'avalanche du 16 avril 2009.

Dans le ravin sous la pointe de la Nunda (3023 m), une plaque est partie à l'altitude approximative de 2700 m. L'épaisseur de la cassure était d'environ 1 m. L'avalanche a sans doute mobilisé toute la neige récente accumulée depuis le début du mois ; la croûte de regel a dû servir de plan de glissement. Notons que la ligne de fracture était assez complexe et torturée, ce qui tend à indiquer qu'il ne s'agissait pas d'une rupture typique de neige froide, où la fracture se propage plus ou moins linéairement et quasi instantanément sur de grandes distances. La figure 3 offre une vue d'ensemble du cirque de l'Arcelle après l'avalanche et la figure 4 montre la principale zone de départ sous la pointe de la Nunda.

Figure 3 : vue du cirque de l'Arcelle. Le départ principal s'est fait au-dessus du ravin de la Nunda, sur la droite du cliché). Photographie réalisée le 21 avril 2009.

Figure 4 : vue sur la zone de départ de l'avalanche du 16 avril 2009. Sur la droite, on voit l'un des gazex de la Nunda. Cliché pris depuis hélicoptère le 21 avril 2009.

Une explication du départ de l'avalanche pourrait être la suivante :

- des chutes de neige soutenues se produisent entre la journée du 15 et le matin du 16 avril, amenant environ 40 à 50 cm de neige fraîche en altitude (30 cm à 2000 m) ;
- le mauvais temps s'évacue doucement, mais malgré la nébulosité, le rayonnement solaire est suffisant pour provoquer un réchauffement de l'air et des couches de neige ;
- tôt dans la matinée, la neige dans le secteur de la Nunda (orienté au nord) se présente sous la forme d'une neige poudreuse avec une faible cohésion de feutrage. Les déclenchements préventifs avec l'avalancheur sont négatifs, même si vraisemblablement de petites coulées ont dû se produire. La faible cohésion ne permet pas la propagation de fracture ;
- en début d'après-midi, la poudreuse commence à s'alourdir du fait du rayonnement solaire indirect. Il est vraisemblable que compte tenu de l'altitude à laquelle se situe l'isotherme 0 °C (autour de 2500 m), une très faible quantité d'eau liquide (quelques dixièmes de pour cent) soit apparue, ce qui peut expliquer un accroissement sensible de la cohésion de la neige (nécessaire à la propagation de ruptures sur une grande distance) avec, en parallèle et assez paradoxalement, une réduction de la résistance au cisaillement ;
- une coulée (ou plusieurs) partie des panneaux raides sous la pointe de la Nunda sert de détonateur : elle grossit en mobilisant de la neige fraîche et parvient à franchir la zone en pente douce vers 2750 m d'altitude. Le flux de neige arrive alors dans les ravins sous la pointe de la Nunda et accélère tout en mobilisant de la neige récente. Une première fracture se produit vers la cote 2700 m, ce qui permet la mobilisation de toute la neige récente. Compte tenu de la forme de la cassure, on peut imaginer que la rupture s'est produite par traction du manteau neigeux, comme une couverture en glissement

qui vient à se rompre sous l'effet de la traction. La mise en mouvement de la neige de surface entraîne une seconde couche, qui correspond à toute la neige au-dessus de la croûte de regel (voir fig. 2) ;

- il est vraisemblable que le déroulement soit complexe, avec une avalanche s'écoulant en vagues successives. Dans le ravin, l'avalanche mobilise la neige récente, un peu plus humide. La première vague a dû être assez rapide et aller assez loin jusque dans le lit de l'Arcelle Neuve vers 2200 m d'altitude. Les vagues suivantes sont plus lourdes (mobilisant de grandes quantités de boules de neige) et lentes. Elles parviennent néanmoins à creuser leur chenal d'écoulement dans le dépôt meuble de la première vague.

L'avalanche a immobilisé l'essentiel de sa masse entre la piste de l'Arcelle à mi-versant (vers 2380 m) et la piste des Rhodos dans le bas du versant (vers 2250 m). Une faible partie a pu continuer son chemin dans le ravin de l'Arcelle Neuve. Sur la base des événements observés depuis les années 1980, on peut tirer les éléments suivants :

- l'avalanche du 16 avril 2009 est le plus gros phénomène naturel observé depuis 1988 ;
- il semble dépasser le phénomène de février 1988 en termes de volume mobilisé et d'emprise ;
- l'emprise des zones de départ et de dépôt est bien plus étendue que ce que le service des pistes a l'habitude d'observer sur le site depuis la mise en place du PIDA (à l'automne 2000) ;
- la superficie de la zone de dépôt est de 7 ha environ, ce qui suggère un volume déposé voisin de 200 000 m³ et des hauteurs de dépôt de plusieurs mètres.

La période de retour du phénomène est grande, de l'ordre de 20 à 30 ans. La figure 5 montre l'emprise de l'avalanche.

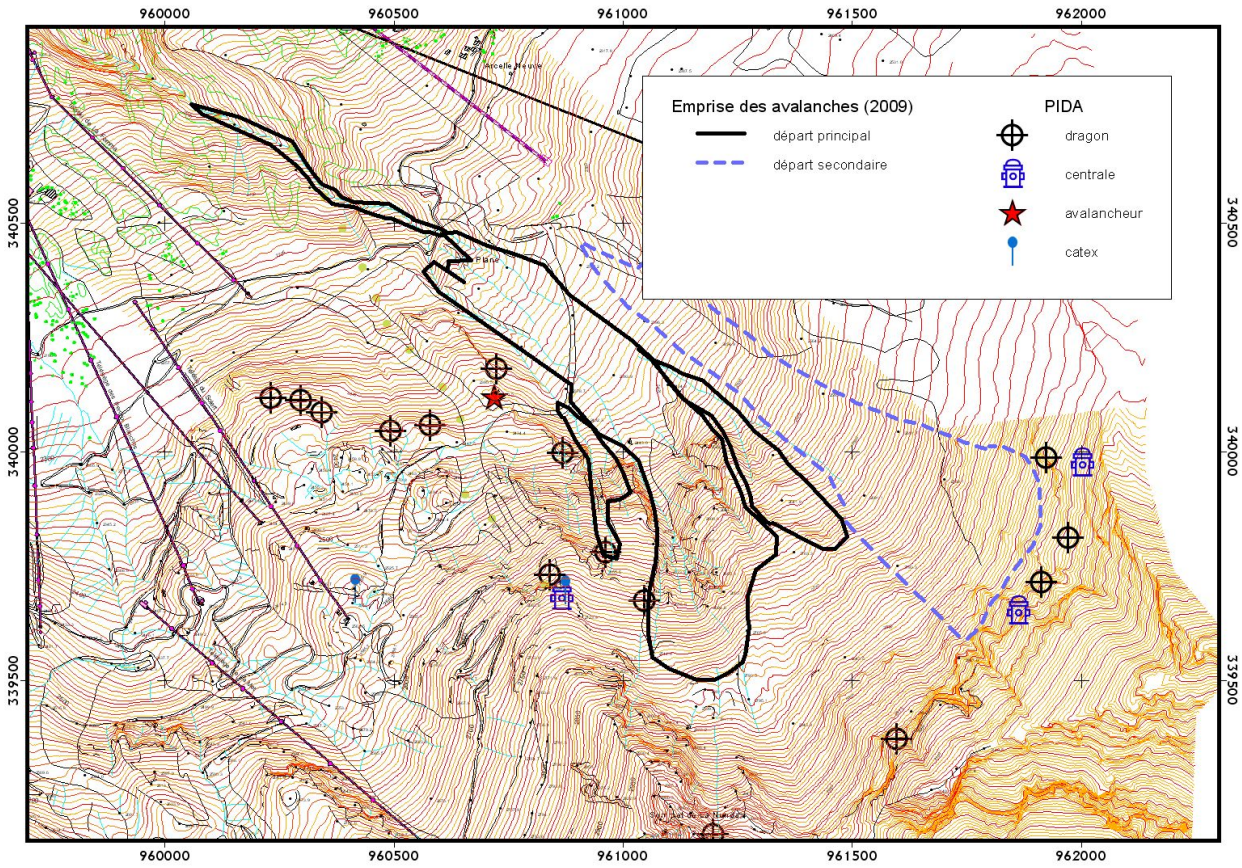

Figure 5 : emprise de l'avalanche du 16 avril 2009 d'après le relevé du 21 avril 2009.

Opérations de secours

Les opérations de secours ont été mises en œuvre avec une grande rapidité. Des pisteurs, un peloton de gendarmes, des CRS, et sept équipes cynophiles ont sondé la zone de dépôt durant tout l'après-midi (voir fig. 6). Par chance, aucun skieur n'a été emporté par l'avalanche. Les opérations de secours ont été arrêtées en fin d'après-midi.

Figure 6 : équipe cynophile en action. © Service des pistes de Valcenis.

Quelles leçons en tirer ?

Un événement exceptionnel est toujours l'occasion d'apporter des éléments nouveaux qui enrichissent notre compréhension et notre expérience des phénomènes naturels. Examinons l'avalanche de l'Arcelle sous trois éclairages différents : celui de la compréhension naturaliste, celui de la gestion du domaine skiable, et celui du niveau de sécurité sur des pistes de ski. L'avalanche de l'Arcelle du 16 avril 2009 étonne à plus d'un titre :

- le manteau neigeux était globalement stable. C'est la seule avalanche (ou coulée) qui se soit produite sur tout le domaine skiable le 16 avril 2009 et c'est le seul accident reporté ce jour-là ou les jours suivants/précédents en France ou en Suisse ;
- deux tirs préventifs à l'avalancheur avaient été réalisés dans le cadre du PIDA et n'avaient donné lieu à

aucune avalanche dans le versant nord de la Nunda ;

- le phénomène a pu gagner de l'ampleur car il y a eu un fort entraînement de neige. À bien y réfléchir, cela n'est peut-être pas aussi évident. Le versant nord de la Nunda est une zone traitée dans le cadre d'un PIDA, donc avec des avalanches régulièrement déclenchées et un tassement plus important du manteau neigeux dans le bas du versant. Même si l'isotherme 0 °C était assez haute et la fonte du manteau neigeux assez rapide en cette mi-avril, la teneur en eau du manteau neigeux en partie haute du versant de la Nunda était encore limitée et elle ne peut donc être un facteur fort d'instabilité qui aurait pu expliquer une érosion aisée du manteau neigeux dans les goulets et pentes sous la Nunda.

Des départs spontanés d'avalanche après des tirs négatifs sont nombreux au printemps lorsque la température du manteau neigeux atteint 0 °C sur toute son épaisseur ; l'augmentation de la teneur en eau liquide est un facteur significatif du risque d'avalanche au printemps. Toutefois, dans le cas présent, le manteau neigeux était encore constitué de neige froide. Quoique rares, des déclenchements de grande ampleur ont été rapportés pour des manteaux neigeux en neige froide « stabilisés ». Ainsi, l'avalanche de la combe du Pra en avril 1987 a tué un gendarme dans la combe nord de la dent du Pra. Il évoluait à skis (de randonnée) dans le bas de la combe nord du Pra. L'avalanche a vraisemblablement été déclenchée par un morceau de corniche tombé depuis la cime de la Jasse ; la rupture de corniche a mis en mouvement une énorme plaque de neige froide large de 350 m vers 2350 m d'altitude. L'enquête de Météo-France a montré l'existence d'une croûte de regel surmontée d'une fine couche de grains à faces planes située à 180 cm de la surface du manteau neigeux.

Dans le cas présent, le PIDA et la prévision locale n'ont pas complètement rempli leur mission dans la mesure où une avalanche s'est produite. Sur la base des connaissances

actuelles, il n’y a pas de moyen technique ou d’élément d’observation qui aurait pu alerter les pisteurs du danger. L’accident du 16 avril 2009 entre dans la catégorie des phénomènes exceptionnels tant par leur extension que par le caractère presque incongru de leur occurrence. L’événement a néanmoins poussé les responsables de la station à chercher à améliorer encore la sécurité sur leur domaine. Pour rendre redondants les systèmes de déclenchement et se donner plus de liberté dans le choix des points de tir, la station a acquis un système appelé Daisybell (commercialisé par le groupe MND), qui est un gazex mobile transporté par hélicoptère. Elle a également formalisé la récolte des observations réalisées par les pisteurs artificiers au cours de la journée ; l’accent est également mis sur un contrôle encore plus poussé des secteurs sensibles du domaine skiable au cours de la journée, avec à la clé une fermeture des pistes sur ces secteurs. Toutefois, avec le recul, on peut se demander si on aurait pu éviter un tel accident quels que soient les moyens employés… Il est vraisemblable qu’on approche la limite technologique de ce que nous sommes capables de faire en termes de prévision locale et de gestion du risque par déclenchement artificiel.

Enfin, beaucoup ont été frappés par la couverture médiatique de l’événement puisque l’accident est passé au journal télévisé des grandes chaînes nationales et a fait l’objet de nombreux articles dans la presse nationale et suisse. Contrairement à l’avalanche d’Anzère (Suisse) du 27 décembre 2009, où deux skieurs ont été emportés par une avalanche sur une piste de ski, il n’y a pas eu d’emballement médiatique avec une « recherche de responsabilité », sans doute parce qu’il n’y a pas eu de victimes. Les événements récents d’Anzère et de Val-Cenis permettent de réfléchir sur l’évolution de notre société : d’un côté, les responsables des pistes mettent normalement tout en œuvre pour assurer la protection des usagers contre les avalanches (ils remplissent donc leur « obligation de moyens » selon l’expression juridique consacrée). De l’autre côté, les clients des

stations considèrent qu'ils payent pour que leur sécurité soit garantie (demandant implicitement par là une « obligation de résultats »). Sur le plan technique, la problématique se pose différemment : comme pour tout système technologique, a fortiori placé dans le milieu naturel, le niveau de sécurité doit également rechercher un bon compromis entre le coût de la protection, le coût probable des dommages en cas de défaillance, et la faisabilité technique. S'il est souvent techniquement et économiquement possible d'assurer un bon niveau de protection des pistes de ski, il peut devenir très difficile techniquement de garantir un taux nul de défaillances des tirs.

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.

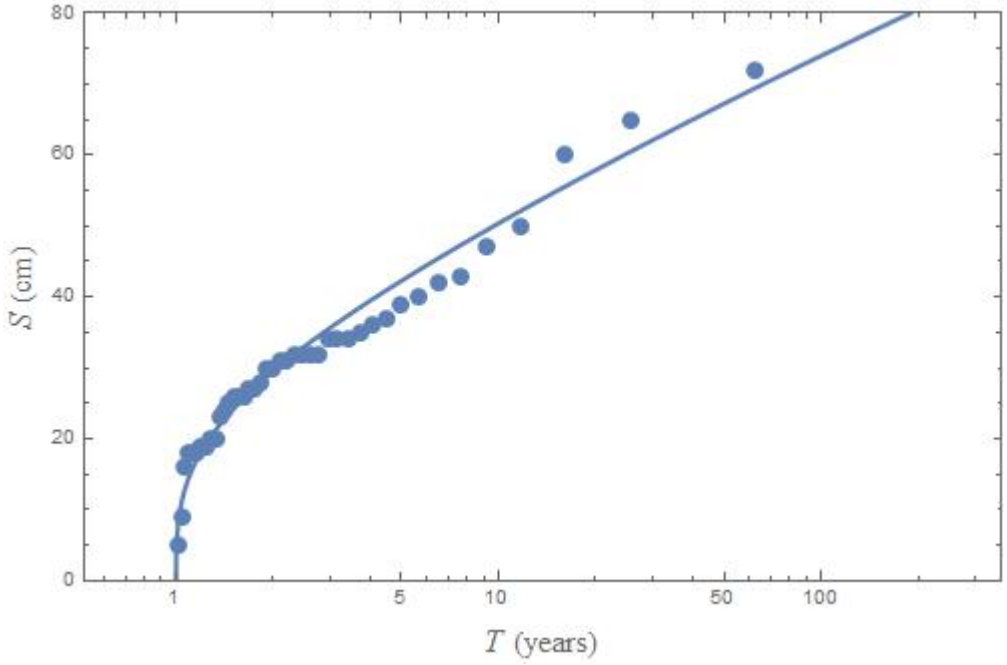

Figure 1 : variation de la neige tous les jours avec la période de retour à Chamonix (France) à une altitude de 1050 m. Les points représentent les chutes de neige mesurées (maxima annuels), tandis que la courbe continue montre la

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 3jours 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 généré, 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’infiltre 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.

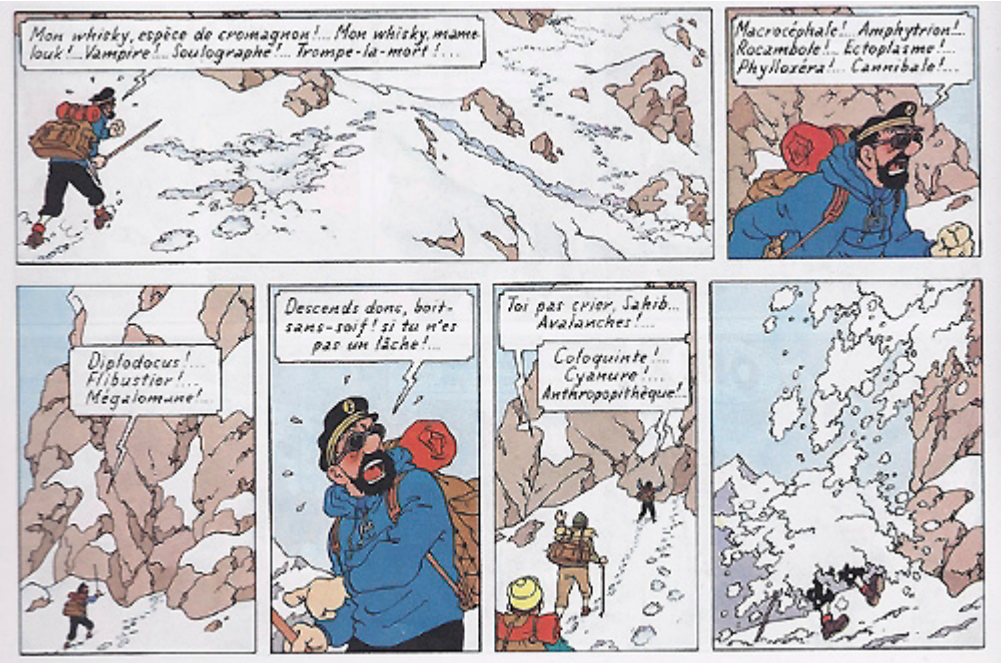

Figure 2 : Tintin au Tibet (Casterman) et l'avalanche déclenchée par le capitaine Haddock. DR.

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 trouvassent 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.