

Chapitre 5

Les avalanches

Christophe ANCEY

DANS L'IMAGERIE POPULAIRE , l'avalanche est intimement liée à la montagne ; elle est peinte par les uns comme un danger omniprésent, redoutable et destructeur et par les autres comme un phénomène spectaculaire et pittoresque. Au fil des siècles, l'avalanche a endeuillé et isolé des familles, a englouti des villages, a emporté d'imprudents voyageurs et actuellement encore, la « mort blanche » continue de tuer skieurs, randonneurs et alpinistes. Et même si pour l'ensemble de la société, elle est de loin le danger le moins meurtrier et le moins destructeur en comparaison avec les tremblements de terre ou les éruptions volcaniques, elle hante l'imaginaire collectif. Mais au juste qu'est-ce qu'une avalanche? Quelles en sont les causes? Les effets? L'objet de ce chapitre est de répondre à ces questions en décrivant le phénomène, les causes et les processus impliqués.

5.1 Définitions

Il est difficile de prime abord de donner une définition simple et acceptée de tous du terme « avalanche ». La plupart s'entendront néanmoins pour dire que c'est un phénomène naturel, complexe et varié, durant lequel une masse de neige dévale la pente d'une montagne. Si l'on fouillait un peu plus dans le détail et que l'on interrogeait toutes les catégories de personnes qui manient le terme « avalanche », force serait de constater que bien des notions différentes se cachent plus ou moins implicitement derrière ce mot. L'avalanche peut être vue comme un événement donné, c'est-à-dire qu'un éventuel observateur peut le décrire, lui attribuer une durée et une date, et préciser quels lieux ont été concernés. Un esprit curieux ne manquera pas de faire remarquer qu'un événement similaire a eu lieu l'année

dernière au même endroit ou dans une localité voisine. Ainsi, de fil en aiguille, on peut généraliser une série de données événementielles et définir l'avalanche comme phénomène physique pouvant prendre différentes formes selon la neige mobilisée, la nature du terrain, etc. Ce faisant, on s'aperçoit également que la taille des avalanches sur un même site est très variable; il en est un peu de même des crues d'un cours d'eau, pour lesquels on est amené à distinguer les crues annuelles, décennales, centennales, etc. Cette distinction est essentielle lorsqu'on doit prévoir un aménagement sur un site donné pour ne pas risquer la ruine de l'ouvrage et une fin prématurée de ses occupants. Pour éviter un sort si fâcheux, on fait appel dans le projet d'aménagement à un expert, dont le rôle est, entre autres, de caractériser l'avalanche exceptionnelle possible sur ce site. L'avalanche exceptionnelle dont parle l'expert, est une avalanche conceptuelle¹.

Ces quelques remarques illustrent bien la difficulté d'offrir une définition satisfaisante du terme « avalanche » et on comprend que cette difficulté soit accentuée lorsqu'on s'attaquera à la terminologie relative aux avalanches. C'est pourquoi à l'heure actuelle encore, il n'y a pas de nomenclature ou de classification universellement reconnue pour les avalanches. Dès lors, il y a nécessairement dans cet ouvrage un parti-pris dans le choix de la présentation et du vocabulaire. Dans la mesure du possible, nous avons choisi de rester fidèles à l'atlas des avalanches présenté par l'UNESCO en 1981 [1], mais nous avons également apporté quelques modifications pour prendre en compte l'expérience acquise au Cemagref depuis plus de vingt ans, pour intégrer les conclusions des nombreuses discussions menées récemment au sein de l'ANENA et pour assurer à l'ouvrage une certaine unité.

5.1.1 L'avalanche

Une première définition

Dans un premier temps, on peut se contenter de l'acception scientifique du terme « avalanche », un peu sèche certes, mais qui a l'avantage d'offrir une définition succincte sans trop entrer dans les détails : pour le scientifique, une avalanche est un écoulement gravitaire rapide de neige. Le terme « rapide » présuppose qu'il existe par ailleurs un écoulement lent, que nous avons précédemment vu sous le nom de reptation ; l'adjectif « gravitaire » rappelle que la gravité est le moteur de ces écoulements. En comparaison avec un écoulement d'eau dans un canal ou d'air dans une soufflerie, l'avalanche est un écoulement bref, dont l'échelle de temps est la minute voire la seconde. L'étape suivante est la description du phénomène, ce qui passe par la proposition d'une classification basée sur la notion de zones et de phases. Comme dans toute classification, un certain nombre de problèmes taxinomiques ne manquent pas de surgir et il faut beaucoup de temps avant d'arriver à proposer un vocabulaire adéquat et universellement admis [2]. Les avalanches ne dérogent pas à ce constat. Un grand nombre de termes tels qu'avalanches de plaques, de neige récente, de poudreuse, de fonte, de neige sans cohésion, de printemps, de neige mouillée sont encore couramment usités... mais malheureusement, il y a parfois inadéquation voire confusion entre le terme et l'objet. Pour qui est déjà habitué à employer ce vocabulaire, les paragraphes présentent une manière différente d'aborder le sujet. Pour le néophyte, la discussion suivante sur ces classifications ne

1. Elle est le pendant de la notion de *crue de projet* pour un aménagement hydraulique.

sera que de peu d'intérêt et il pourra sereinement attaquer les paragraphes suivants (à partir de § 5.1.2).

Les avalanches dans la tradition alpine

Ce sont les habitants (dès la période historique) des vallées alpines qui ont forgé les premiers termes relatifs aux avalanches (voir chap. 1). La terminologie change d'une vallée à l'autre d'une part parce que l'activité avalancheuse a une ampleur, une fréquence, un degré de danger qui varient géographiquement entre les parties septentrionales et méridionales des Alpes et d'autre part parce que le cloisonnement et les spécificités idiomatiques des vallées alpines favorisent le foisonnement de termes descriptifs (et qui restent parfois difficilement traduisibles en français moderne) comme *cui*, *volante*, *pourbier*, *matésine*, *avalanche terrière*, *de poudre*, *de fond*, etc. Une des étymologies du mot « avalanche » semble venir du verbe latin *labi* (glisser). La toponymie locale fait souvent référence à cette racine : les Lanches, le Lavancher, Lauenen, etc. En France, les premières études² sur le sujet sont dues aux forestiers (P. Mouglin, V. Hulin, etc.) dès la fin du XIX^e siècle, puis aux géographes et aux glaciologues (E. Bénévent, F. Gex, A. Allix, etc.) au début du XX^e siècle. Une contribution importante a été apportée par les skieurs et les alpinistes [3].

Le parcours de la montagne hivernale n'a en effet réellement commencé qu'avec l'avènement et le développement du ski. Les avalanches, dès lors, touchèrent non seulement les villages ou les voies d'accès mais également des skieurs. Le développement de la montagne a amené l'introduction de termes qui traduisaient la vision des phénomènes par ses nouveaux pratiquants [3, 4]. Ainsi, à l'heure actuelle, on entend couramment parler d'avalanches de poudreuse, de plaque ou de neige humide selon la qualité de la neige mobilisée. Par ailleurs, on associe souvent la dynamique de l'avalanche à cette qualité de neige : respectivement dans chacun des cas, l'avalanche s'écoule sous forme d'une poudre, d'un solide friable ou d'une pâte [5]. D'autres personnes parlent principalement d'avalanches de fonte ou de neige récente [6] et d'autres qualificatifs existent pour décrire la configuration du terrain (avalanches de couloir, de versant, etc.), la forme du départ, etc.

Néanmoins, ce vocabulaire a induit un certain nombre de confusions dangereuses. Ainsi, que désigne réellement une avalanche de poudreuse ? Est-ce une avalanche composée de neige poudreuse ou une avalanche s'écoulant sous la forme d'un puissant aérosol (nuage de poussières de neige) ? Est-ce que cela sous-tend que toute avalanche en aérosol est composée de neige poudreuse ou que réciproquement la neige sèche ne forme que des avalanches sous forme d'aérosol ? De même, que signifie une avalanche de plaque ? Est-ce une avalanche composée de blocs (compacts) qui glissent le long d'une pente ou s'agit-il seulement d'un mode de départ ? Tout départ avec une cassure de forme linéaire est-il synonyme de décrochement de plaque (au sens donné pour un profil stratigraphique) ? À quoi renvoie exactement le terme « plaque » ? Est-ce une couche de neige dure et froide, compacte et dense ou un ensemble de couches possédant des caractéristiques mécaniques permettant de le différencier du reste du manteau ou bien encore le résultat d'une accumulation

2. Il faut toutefois noter que des travaux antérieurs ont été réalisés par l'administration cadastrale et fiscale sarde, qui en particulier s'est beaucoup intéressée à l'estimation des parcelles forestières (jusqu'à ce que la Savoie devienne française en 1860).

de neige? Une avalanche de neige mouillée part-elle sous forme ponctuelle (forme en *poire*) par suite d'une perte locale de la cohésion, puis glisse-t-elle le long du sol?

Contre-exemple

Un exemple intéressant illustre bien la confusion engendrée quelquefois par ces termes. Dans le massif du Mont-Blanc, le 16 mai 1983, vers 14 heures, une avalanche est partie spontanément vers 2500 mètres d'altitude dans la zone des glaciers à l'aval des escarpements de la face nord de l'aiguille du Midi [7, 8]. La masse mobilisée a été estimée à 800 000 m³ et a emprunté le couloir formé par le torrent des Favrands. Le dépôt s'est fait au niveau de l'entrée du tunnel du Mont-Blanc et une partie de la forêt (sur une largeur de 250 m) ainsi que le parking et les bâtiments de la STMB³ ont été touchés par un important effet de souffle. L'activité avalancheuse a été particulièrement intense ce jour là puisque trois autres avalanches d'ampleur ont été signalées dans la vallée de Chamonix. Le décrochement à la rupture a concerné un ensemble de couches de neige humidifiées par les dernières chutes de pluie (19 mm) jusqu'à 2500 mètres d'altitude. L'épaisseur de la plaque à la rupture variait de 1,5 à 2,5 mètres et s'étendait sur 1000 mètres de long. L'avalanche s'est scindée en deux écoulements distincts comme le rapportaient les témoins et l'indiquait la nature des dégâts : un *aérosol* (de couleur terreuse) qui a rasé la forêt sur 250 mètres de large (et dont les témoins ont rapporté la très grande vitesse) et une *avalanche coulante* qui a suivi le thalweg en érodant fortement le sol et s'est arrêtée vers 1200 m. Il faut signaler qu'une partie de cette dernière avalanche est passée par-dessus le mur déflecteur pour s'arrêter à l'entrée du tunnel du Mont-Blanc. On a donc un exemple de neige lourde et humide qui est partie sous forme d'une plaque et a formé un aérosol. Quelle devrait être alors sa désignation? Est-ce une avalanche de plaque, de neige mouillée, de « poudreuse »? Le nuage de neige a paru tellement incongru compte tenu de la nature de la neige mobilisée que l'on a recherché la cause de ce phénomène, tant l'apparition d'un aérosol semblait être conditionnée par la présence de neige poudreuse; plusieurs hypothèses ont été émises pour tenter de résoudre cette énigme. On a donc ici un exemple qui illustre comment un vocabulaire mal adapté peut fausser la vision des phénomènes : c'est l'erreur qui consiste à vouloir conformer le réel à son vocabulaire alors que la logique impose le contraire. Ceci amène deux commentaires :

1. l'existence d'un aérosol n'est pas dépendante de la nature de la neige (même s'il est vrai que de manière préférentielle les aérosols sont constitués de neige poudreuse). À cet égard, Evans rapportait qu'au Canada, au mont Cayley en Colombie britannique, un éboulement rocheux avait provoqué un aérosol (semblable à un nuage de neige) qui avait détruit une partie de la forêt par son effet de souffle [9]! Cet exemple est riche en enseignement et il n'est pas l'unique exception à la règle ;
2. une remarque plus générale et d'ordre taxinomique met en lumière les défauts de la classification usuelle⁴. L'erreur fondamentale est que la désigna-

3. Société du Tunnel du Mont-Blanc.

4. Parler d'une « classification usuelle » est un peu abusif, puisque depuis que la nivologie existe, chaque ouvrage alimente le débat. Comme le souligne André Allix, « on a proposé déjà plusieurs classifications, ce qui tend à prouver qu'aucune est satisfaisante » [4].

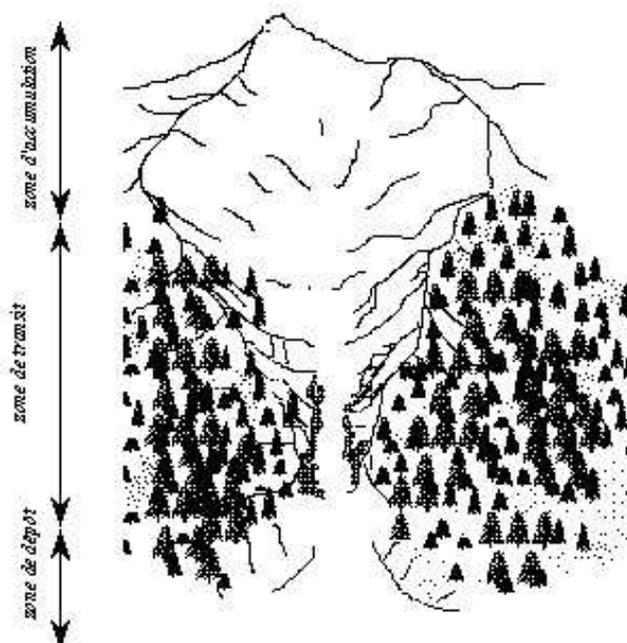


Figure 5.1 Les 3 zones du site. Dans ce cas-ci la troncature est aisée : le cirque constitue la zone d'accumulation, sa forme en entonnoir permet de canaliser l'écoulement dans la zone de transit ; les différentes crêtes découpent des panneaux d'exposition variée. La zone de transit est formée par le ravin d'érosion entre la forêt tandis que la zone de dépôt commence dès que la pente s'affaiblit. Il faudrait préciser également qu'après la description zonale, le spécialiste est amené à introduire des points particuliers tels que des points de rupture de pente, des singularités (ressaut, plateforme, goulot, évasement, obstacle), des lieux remarquables. Mais cela devient une tout autre affaire !

tion courante fait appel à des critères hétérogènes et variables : critères de neige (avalanche de neige poudreuse, humide, pulvérulente, sans cohésion, récente, etc.), de départ (en/de plaque), de saison (avalanches de printemps), d'écoulement (de fond, superficielle, de versant, de couloir, etc.), génétiques (naturelles, de skieur, de fonte, etc.) [2]. Pour corriger ceci, il s'avère nécessaire d'établir des critères homogènes et fixes : dans la suite, on se propose de classer les avalanches selon leur mode d'écoulement.

5.1.2 Site et zones

Pour rendre compte de tout l'éventail des phénomènes observés, on introduit des critères spatiaux et temporels : zones d'un site et phases d'une avalanche. Il faut bien garder en mémoire que les deux notions sont indépendantes, même si elles semblent parfois se recouper⁵.

Un *site avalancheux* est l'unité géographique la plus petite dans laquelle s'écoulent toutes les avalanches d'un secteur donné, quelle que soit leur taille. Un site est composé de sous-unités indépendantes que l'on nomme ici *zones*. Le zonage d'un site se fait, entre autres, à partir d'une « lecture du terrain », par exemple à partir

5. Comme on l'a souligné en introduction, la prise en compte de toutes les facettes du terme « avalanche » (l'avalanche comme événement, phénomène physique ou scénario) oblige à définir le plus clairement possible un certain nombre de notions, au risque de complexifier l'ensemble.

d'une carte topographique détaillée ou de photographies aériennes (prises l'été). Il est important de noter que le zonage ne se fait pas à partir de quelques événements avalancheux particuliers mais doit intégrer l'ensemble des événements passés ou susceptibles de se produire sur le secteur. Ces événements avalancheux ont une taille variable : on appelle *avalanche majeure* une avalanche qui affecte toutes les zones du site ; dans le cas contraire, on parle, selon la taille, d'*avalanche* ou de *coulée*⁶. Un site se subdivise en trois zones :

- la *zone d'accumulation* : c'est dans cette zone que la neige s'accumule. Généralement, elle est constituée d'un cirque, d'un bassin ou d'un large versant. L'avalanche (majeure) y mobilise l'essentiel de sa masse de neige. Par ailleurs, afin de détailler les particularités⁷ orographiques et nivologiques de la zone, les spécialistes la tronquent en panneaux. Chaque panneau est supposé pouvoir se décrocher indépendamment ;
- la *zone de transit* : c'est le lieu par lequel transitent toutes les avalanches majeures du site. Généralement, cette zone est délimitée par le relief du site : la zone de transit peut être formée par un chenal, un couloir ou un versant. Sa géométrie est parfois plus complexe : existence de ressauts (barres rocheuses), de goulets d'étranglement, etc. Dans le cas où tout le site se présente sous la forme d'un versant, la délimitation de la zone de transit est délicate⁸ ;
- la *zone de dépôt* : c'est le lieu sur lequel s'arrêtent toutes les avalanches majeures du site en y déposant la neige transportée. Généralement, ce sont des critères de pente qui fixent la frontière entre la zone de transit et la zone de dépôt. La notion de dépôt est évidente dans le cas des avalanches coulantes mais devient floue dans le cas des aérosols où le dépôt correspond à une « sédimentation » du nuage de neige, s'étend sur des distances nettement plus importantes et ne correspond pas nécessairement à la limite des dégâts occasionnés (effet de souffle). Dans ce cas-là, on préfère une carte où la limite de la zone de dépôt est déterminée par une isobare⁹.

5.1.3 Phases d'une avalanche

Après le site, on décrit l'avalanche proprement dite. À cet effet, on utilisera des critères morphologiques, c'est-à-dire des *critères visuels basés sur la forme de l'écoulement*. Mais tout d'abord, il est important de découper la vie de l'avalanche en différents stades : on parle de *phases* de l'avalanches. Plus ou moins arbitrairement, on scinde le déroulement de l'avalanche en 3 phases, qui correspondent à la mise en mouvement de la neige, à son écoulement, et à son arrêt¹⁰. Ainsi, on est

6. Il faut se méfier du terme « coulée », dont l'emploi n'est jamais totalement innocent (voir plus loin).

7. Ainsi sur un cirque, certains panneaux sont soumis à l'activité du vent ou du soleil, ce qui diversifie les causes possibles de départ.

8. Dans ce cas, pour parvenir à déterminer la zone de transit, d'aucuns ont tendance à considérer que les variations de masse sont nulles, c'est-à-dire que le gain ou la perte de masse de l'avalanche est nulle ; d'autres préfèrent opter pour des critères de pente.

9. C'est une courbe le long de laquelle la surpression due à l'avalanche (ou son souffle) est constante.

10. Pour une avalanche majeure, cela correspond grosso modo à son passage dans chacune des 3 zones du sites.

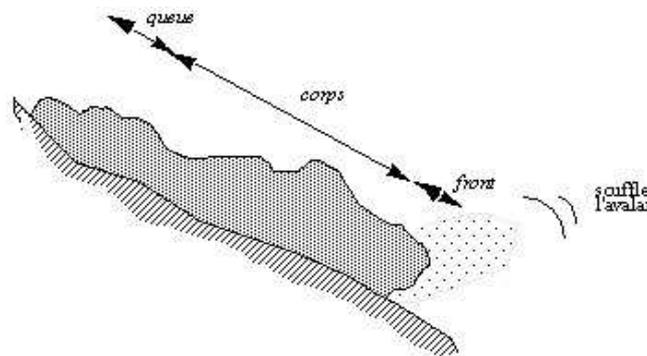


Figure 5.2 L'avalanche est l'écoulement d'une masse de neige, qui possède une longueur donnée. On la scinde en trois parties : le front, le corps et la queue. Les phénomènes d'ampleur sont accompagnés d'un effet de souffle, semblable à un important coup de vent.

amené à considérer :

- la *phase de départ* : c'est le premier stade de mise en mouvement de la neige dans la zone d'accumulation. La surface concernée est appelée *aire de départ*. Les causes sont diverses et font l'objet d'un prochain chapitre. La neige ainsi mobilisée commence à s'accélérer et à s'écouler le long de la pente ;
- la *phase d'écoulement* : durant ce stade le plus important, on peut parler d'écoulement. On admet couramment qu'il n'y a ni gain ni perte de masse¹¹ durant cette phase et qu'elle ne dépend pas de la phase initiale. Il s'agit là d'une hypothèse simplificatrice, même si elle semble souvent corroborée par l'expérience. Néanmoins, il n'est pas exclu que certains phénomènes échappent à cette règle, c'est notamment le cas pour des coulées ou certaines avalanches de versant pour lesquelles la longueur d'écoulement serait plus petite que leur largeur. En outre, on parle de *front*, de *corps* et de la *queue* d'une avalanche pour désigner les différentes parties ;
- la *phase d'arrêt* : c'est le troisième stade durant lequel la neige décélère puis s'arrête. La surface occupée par la masse de neige de l'avalanche est appelée *aire d'arrêt*. Dans le cas d'un aérosol, comme cette aire est difficile à délimiter, on peut parler d'*aire de sédimentation* ; cette aire est parfois délimitée par des isobares de surpression. On introduit aussi la *distance d'arrêt*, qui est la distance moyenne parcourue¹² par le front de l'avalanche depuis la fin de la phase d'écoulement jusqu'à son arrêt définitif.

Lorsqu'il s'agit de coulées ou de petites avalanches, la détermination de ces trois phases est plus délicate voire impossible à faire. Dans ce cas, on assiste généralement à une seule phase réunissant sur une même zone départ, écoulement et arrêt. Il faut ouvrir ici une parenthèse sur ce qu'on entend par coulée. Contrairement à une avalanche qui est essentiellement l'écoulement d'un point à un autre,

11. On parle de reprise de neige pour désigner le phénomène d'incorporation de neige au sein de l'avalanche au cours de son mouvement.

12. Pour les avalanches majeures, le point de référence pour l'estimation de la distance d'arrêt est fixé à la frontière amont de la zone de dépôt ; parfois, certains préfèrent le déterminer à l'aide d'un critère d'inclinaison de la pente (voir par exemple [10]).

une coulée s'apparenterait plutôt à un glissement d'une quantité de neige, mobilisant une faible masse (en comparaison avec la quantité de neige en place aux alentours). Il y a donc surtout une notion de « faible ampleur » (relativement au site considéré) derrière le mot *coulée*. D'un point de vue physique, la distinction entre avalanche (majeure) et coulée est motivée par le fait que chacune d'elles possède une dynamique qui lui est propre (du moins on le présume). D'un point de vue humain, l'utilité d'une telle différenciation dépend des personnes concernées et des circonstances. Ainsi, elle a son importance en justice lorsqu'on cherche les responsabilités : parler de coulée plutôt que d'avalanche, c'est vouloir minimiser la taille du phénomène.

5.1.4 Modes d'écoulement d'une avalanche

Un critère de classification commode est de regarder comment s'écoulent les avalanches, car la forme de l'écoulement est le reflet du type de dynamique. Ainsi, on peut observer trois classes distinctes de comportement mécanique correspondant à trois modes d'écoulement. On distingue :

- l'*avalanche en aérosol* : c'est un écoulement très rapide (d'après certains, la vitesse peut dépasser 400 km/h) sous la forme d'un nuage résultant du mélange de l'air et des particules de neige, et composé de grandes bouffées turbulentes qui dévalent la pente (voir § 5.5.2). L'écoulement n'est pas astreint à suivre le relief et il n'est pas rare de voir un aérosol remonter une pente adverse. D'aucuns pensent que l'effet destructeur est lié au *souffle* provoqué par l'onde de pression (semblable à une explosion) précédant l'avalanche ; d'autres, au contraire, l'attribuent à l'aérosol lui-même. La puissance de l'aérosol est extrêmement variable : dans certains cas, on est en présence d'un écoulement d'une violence exceptionnelle, capable de raser une forêt entière, dans d'autre cas, l'aérosol (même d'apparence spectaculaire) ne cause aucun dégât. Les avalanches purement sous forme d'aérosol sont peu fréquentes sous nos latitudes mais ne sont pas des phénomènes rares (voir § 5.5.2) ;
- l'*avalanche coulante*¹³ : c'est un écoulement de neige coulant le long du sol en suivant le relief (couloir ou versant). La vitesse est nettement moindre que dans le cas précédent et dépasse rarement les 100 km/h. La majeure partie des avalanches appartient à cette classe d'écoulement (voir § 5.5.1) ;
- l'*avalanche mixte* : il s'agit de la combinaison des deux modes précédents. En effet, dans certains cas, il peut arriver que l'écoulement se scinde en un aérosol et une avalanche coulante. Ces écoulements peuvent devenir autonomes (c'est-à-dire acquérir une vie propre) ou rester liés. On parlera alors d'*avalanche mixte*. L'avalanche du 16 mai 1983 à Chamonix en est un exemple. Il est à noter qu'une avalanche coulante développe fréquemment un petit panache de neige, surtout au niveau de son front, mais dont la contribution à la dynamique de l'ensemble reste négligeable. Inversement, un aérosol peut traîner de la neige au niveau du sol, sans que cet entraînement prenne réellement de l'importance (voir § ??). L'avalanche mixte est un phénomène fréquent ; de plus, les phénomènes d'ampleur sont souvent des écoulements mixtes.

13. On emploie également *avalanche dense*, mais *avalanche coulante* nous semble préférable.



Figure 5.3 avalanche en aérosol dans la face nord du K2. (Himalaya). Cliché P. BÉGHIN.

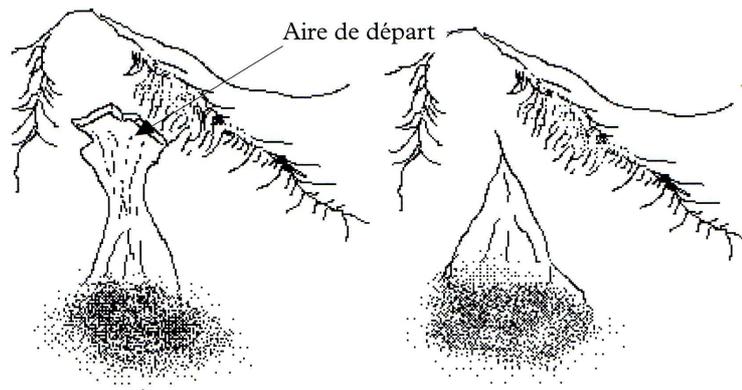


Figure 5.4 Modes de départ : départ en plaque ou ponctuel. L'aire de départ dans le cas d'avalanches avec départ en plaque est assez facile à délimiter.

5.2 Critères morphologiques et génétiques

La description peut être génétique (c'est-à-dire qu'elle se fonde sur les facteurs ayant contribué au départ) ou bien morphologique (description des différentes phases) [1, 2].

5.2.1 Critères morphologiques : examen des phases

Phase de départ

Juste après que le départ de l'avalanche ait eu lieu, on peut observer principalement deux formes de décrochement possibles :

- *départ en plaque* : il s'agit d'une *cassure linéaire* qui fracture le manteau neigeux sur une largeur et une épaisseur données et délimite l'aire de départ ; on parle alors de départ en plaque ou de décrochement de plaques. La notion de plaque est parfois confuse et fera l'objet d'une explication ultérieure (voir § 5.4.2) ;
- *départ ponctuel* : il s'agit d'une *cassure en forme de poire* partant d'un point. Un tel mode est de manière générale caractéristique de neige de très faible cohésion (neige fraîche ou très humide).

Une combinaison des deux est parfois observable : un départ ponctuel a immédiatement provoqué une fissuration linéaire et un départ en plaque. Négligeant le départ ponctuel, on ne considère que le décrochement, sinon on parle de *départ mixte*. Il faut signaler que, dans une zone de reptation et dans un climat humide, des fissures du manteau neigeux peuvent se développer pendant de longues périodes (plusieurs jours) et être à l'origine d'avalanches (accident du Schmalzberg, Vorarlberg, le 31 décembre 1974 qui causa 12 morts) [11]. Ces *avalanches de glissement* sont des phénomènes rares dans les Alpes mais fréquents, par exemple, au Japon ou plus généralement dans les pays avec un climat océanique.

On indique également parfois la position de la surface de glissement dans l'aire de départ. On parle de « cassure dans la neige fraîche » lorsque la plus grande partie de la neige mobilisée est constituée de *neige fraîche*, c'est-à-dire de neige accumulée

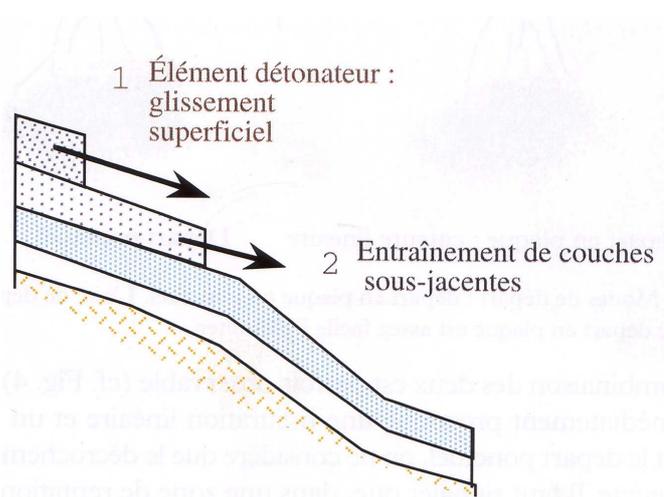


Figure 5.5 Départ en marche d'escalier. La caractérisation de la phase de départ peut être délicate notamment dans le cas de décrochement de plusieurs panneaux (de nature variée) ou si le plan de glissement est en « marche d'escalier » : la première strate entraîne dans son mouvement la (les) strate(s) inférieure(s). Dans ce cas-ci, l'élément « détonateur » est le glissement de la couche superficielle. On peut également concevoir d'autres types de détonateur aptes à provoquer un départ en plaque : passage d'un aérosol, coulée, etc.

dans les cinq jours qui précèdent la date de l'avalanche. À l'opposé, on parle de « cassure dans la vieille neige » lorsque le plan de glissement au niveau de la fracture se trouve à l'intérieur de couches de *vieille neige* (accumulée depuis plus de cinq jours environ). En dernier lieu, on peut indiquer si de l'eau liquide était présente ou non au sein des couches mobilisées. Si la TEL est nulle, on parle d'avalanche de neige sèche et dans le cas contraire, on dit qu'il s'agit d'une avalanche de neige humide.

Phase d'écoulement

Comme on l'a vu précédemment, on classe les avalanches selon leur mode d'écoulement : avalanches coulantes, en aérosol ou mixtes. Pour les avalanches majeures, on peut par ailleurs préciser la forme de l'écoulement imposée par la zone de transit : s'il est confiné, on parlera d'*avalanche de couloir*, et s'il a lieu sur une pente ouverte, on parlera d'*avalanche de versant*. Une telle désignation perd de l'intérêt avec les avalanches en aérosol car la trajectoire de celles-ci s'affranchit plus ou moins des contraintes imposées par le relief (écoulement aérien). Lors de l'écoulement, le manteau neigeux (de la zone de départ ou d'écoulement) peut être entraîné sur toute sa hauteur, c'est-à-dire que le plan de glissement est le sol lui-même : c'est l'*avalanche de fond*¹⁴. Dans le cas contraire, seule la surface du manteau neigeux est concernée et on parle d'*avalanche superficielle*.

14. Il faut noter que dans certains ouvrages, cette définition ne s'applique que lorsque la cassure concerne le manteau neigeux jusqu'au sol, mais cela nous semble un peu trop restrictif.



Figure 5.6 Départ en plaque (col du Palet, Tignes). La fracture est en marche d'escalier et on voit distinctement les deux surfaces de glissement. Cliché C. Ancey.



Figure 5.7 Départ ponctuel de neige très humide provoquée par le virage d'un skieur. Cliché C. Ancey.



Figure 5.8 Fissuration lente du manteau neigeux, souvent visible à la fin du printemps ou lors d'importants redoux (glacier des sources de l'Isère, Savoie). Cliché C. Ancey.

Phase d'arrêt

À cause des frottements (internes, dus à l'air, au relief, au sol, etc.), l'énergie cinétique de l'avalanche diminue jusqu'à devenir nulle. La nature du dépôt dépend du mode d'écoulement. Dans le cas d'avalanches en aérosol, le dépôt correspond à la sédimentation du nuage de neige. L'effet de souffle peut plaquer la neige contre les obstacles rencontrés. Dans le cas d'avalanches coulantes, le dépôt est consécutif à l'immobilisation de la masse de neige, qui dépend plus ou moins du relief : langues, doigts, cônes ou tas sont les formes couramment observées dans la zone de dépôt. Il est d'usage, toujours dans le cas des avalanches coulantes, de continuer la description du dépôt en caractérisant la neige le constituant.

Tableau 5.1 Tableau synoptique de description d'un événement avalancheux (adapté de l'Atlas des Avalanches [1]).

| Aire | Critères | Critères distinctifs |
|-----------------------|---|---|
| Aire de départ | A. Mode de départ | A1. partant d'un point (départ ponctuel) A2. partant d'une ligne (départ en plaque) A3. partant d'un point puis cassure linéaire (départ mixte) A4. partant d'une cassure en forme de crevasse |
| | B. Position du plan de glissement | B1. à l'intérieur du manteau neigeux B2. cassure dans la neige fraîche B3. cassure dans la vieille neige B4. jusqu'au sol |
| | C. Eau liquide dans la neige | C1. absente C2. présente |
| | D. Tracé du parcours | D1. parcours sur une pente ouverte (avalanche de versant) D2. parcours dans un couloir ou une gorge (avalanche de couloir) |
| Aire d'écoulement | E. Type de mouvement | E1. nuage de neige (avalanche en aérosol) E2. coulant le long du sol (avalanche coulante) E3. critères E1 et E2 simultanément (avalanche mixte) |
| | F. Position de la surface de glissement | F1. écoulement sur un manteau neige (avalanche superficielle) F2. écoulement sur le sol (avalanche de fond) |
| | G. Rugosité de la surface du dépôt | G1. grossière (dépôt grossier) G2. blocs anguleux G3. boules arrondies G4. fine (dépôt fin) |
| | H. Eau liquide | H1. absente (dépôt sec) H2. présente (dépôt humide) |
| I. Souillure du dépôt | I1. pas d'autres matériaux visibles (dépôt propre) I2. souillure visible (dépôt souillé) I3. rochers, cailloux, sols I4. branches, arbres I5. débris d'ouvrages | |

- La surface du dépôt peut être encombrée de blocs anguleux, de boules arrondies ou simplement constituée de neige (pas de blocs de diamètre supérieure à 30 cm). Dans les deux premiers cas, on parlera de *dépôt grossier* tandis que le terme *dépôt fin* recouvre le dernier cas. La structure interne des dépôts est peu connue (existence d’une granulométrie, caractéristiques des boules, etc.).
- La présence d’eau liquide est typique des dépôts grossiers : elle peut résulter de la mobilisation de neige humide ou de l’humidification de la neige durant son trajet. Ceci est particulièrement vrai pour des avalanches d’ampleur qui parcourent des dénivellations importantes : ainsi, l’avalanche du mont Cook (Nouvelle-Zélande), à la suite d’une énorme chute de séracs et de rochers, a parcouru 2700 mètres de dénivelée et une dizaine de kilomètres en distance (cf. § 5.3.1) ; l’humidification progressive de la neige a rendu de plus en plus pâteux l’écoulement, qui est devenu boueux du fait de l’érosion. L’eau liquide présente dans les dépôts contribue à densifier considérablement les blocs de neige, qui deviennent très durs et ont des masses volumiques importantes (souvent comprises entre 500 et 650 kg/m³) [12].
- Le dépôt peut être souillé par des éléments étrangers (rochers, arbres, débris d’ouvrages, terre, etc.) car les grosses avalanches (denses) ont un grand pouvoir d’érosion. On qualifie le dépôt de *souillé*.

5.2.2 Critères génétiques : examen général des causes

Difficultés d’établir une classification génétique

S’il est assez facile d’établir des critères morphologiques pour décrire une avalanche, il s’avère beaucoup plus difficile de proposer une classification des facteurs d’avalanche car la cause du départ est rarement unique. Le plus souvent, il n’y a pas un simple processus de cause à effet dans le départ d’une avalanche, mais au contraire, c’est plutôt le résultat d’un concours de circonstances (histoire météorologique, qualité de neige, forme du relief, intervention extérieure, etc.). Il est également assez difficile d’identifier tous les facteurs contribuant à ce faisceau de circonstances, même si on arrive à apprécier qualitativement l’influence de chaque facteur pris séparément. Enfin, une notion qui nous semble importante mais complexe est celle de « détonateur » (que nous avons introduite au § 5.2.1) : dans certains cas, on peut attribuer à un élément donné (passage d’un skieur, chute d’un sérac, etc.) le rôle d’élément perturbateur ayant entraîné la rupture d’équilibre du manteau neigeux.

Problématique générale liée à la stabilité du manteau neigeux

Le départ d’une avalanche est le résultat d’une instabilité ou d’un manque de *stabilité* du manteau neigeux, car comme n’importe quel matériau, la neige ne supporte pas indéfiniment toutes les contraintes imposées. Rechercher les causes d’une avalanche revient dès lors à s’interroger sur la stabilité d’un manteau neigeux. Cependant, la neige est très loin de constituer un matériau simple et homogène (cf. chap. 2) et son étude expérimentale bute contre de nombreuses difficultés [13, 14]. Localement, le manteau neigeux est un ensemble stratifié de couches aux propriétés mécaniques distinctes ; globalement il est fortement hétérogène à cause des

variations du relief ou des conditions météorologiques (panneaux plus ou moins exposés au vent et au soleil par exemple). De plus ses propriétés mécaniques sont en perpétuelle interaction (avec le milieu extérieur ou à la suite de changements internes) et sont susceptibles d'évoluer très rapidement. Ceci explique que la stabilité d'un manteau neigeux est un problème d'une extrême complexité du point de vue théorique, de telle sorte que l'on est à l'heure actuelle incapable de déterminer les critères d'instabilité.

La prochaine section donne un rapide panorama des facteurs influant sur la stabilité du manteau neigeux. Il faut rappeler, au risque de se répéter, que l'on examine chaque facteur comme s'il agissait séparément des autres, ce qui n'est sans doute qu'une vue simplifiée de la réalité. Comme les facteurs amenant au départ d'une avalanche sont multiples, on distingue, pour les ordonner, ceux liés au site (qui sont *fixes*) et ceux inhérents aux conditions nivo-météorologiques (*variables*). Il faudrait noter au passage que, dans les bulletins de prévision du risque d'avalanche (BRA, cf. chap. 6), il est d'usage de différencier les avalanches accidentelles des avalanches naturelles. Dans ce cadre-là, on nomme *avalanche accidentelle* une avalanche provoquée par une intervention extérieure (passage de skieur(s), d'animaux, chute de rochers, de sérac, explosion, détonation, etc.) qui va ébranler le manteau neigeux en limite de stabilité. On parle de *déclenchement* pour bien mettre en lumière le facteur extérieur intervenant dans la mise en mouvement de la neige [15]. Inversement, on parle d'*avalanche naturelle* si elle part d'elle-même. Il y a alors rupture due à une instabilité du manteau neigeux. Dans ce cas-ci, on parle de *départ*. Il faut prendre garde, lorsque l'on utilise ou rencontre cette terminologie, d'éviter certains amalgames. Ainsi, il ne faut pas confondre avalanche *accidentelle* (au sens précédemment donné) et avalanche *occasionnant un accident* (personnes entraînées, dégâts matériels, etc.) ou bien avalanche *fortuite*. De même, lorsque la chute d'une corniche provoque une avalanche, certains parlent d'avalanche accidentelle (car le déclenchement est dû à un facteur extérieur) tandis que d'autres parlent d'avalanche naturelle (puisque la cause du déclenchement est un phénomène naturel). Dans la suite du texte, afin de ne pas induire le lecteur dans l'erreur, on évitera dans la mesure du possible les termes précédents (hormis dans les sections consacrées au BRA) et on emploiera les termes suivants :

- une avalanche est *spontanée* lorsque la cause du départ est interne au manteau neigeux ;
- une avalanche est *déclenchée* lorsqu'un élément extérieur en est l'élément détonateur ;
- elle est *déclenchée artificiellement*, lorsqu'il y a volonté (humaine) de la faire partir (passage d'un skieur, explosif, etc.).

5.2.3 Facteurs fixes influant sur la stabilité du manteau

Topographie

La forme du relief, sa disposition, ses caractéristiques ont une influence sur la formation des avalanches ; une « lecture » du terrain (par exemple durant l'été) permet de déterminer les zones sensibles. Examinons maintenant comment chacune

des caractéristiques constitue un facteur favorable ou non au départ des avalanches.

- L'altitude n'est pas à proprement parler un facteur déterminant car des avalanches se forment à toute altitude. En revanche, elle a une influence indirecte car elle conditionne les caractéristiques nivo-météorologiques (enneigement, température, métamorphoses du manteau, etc.).
- La configuration du relief joue un rôle important quoique parfois mal appréhendé. On distingue ainsi :
 - les *zones de crêtes* : une crête est la séparation de deux versants. En modifiant l'action du vent, les crêtes peuvent favoriser des accumulations de neige. La présence d'accumulations importantes augmente localement le danger dans le versant chargé ;
 - les *bassins, cirques et versants* : ils constituent les zones d'accumulation des sites ; ce sont les zones privilégiées de départ d'avalanches majeures ou de coulées ;
 - les *plateaux* : ce sont en général des zones d'érosion ou de dépôt de la neige. La pente est insuffisante à provoquer des départs d'ampleur et le danger vient des zones dominant le plateau ;
 - *combes, couloirs, thalwegs* : ce sont les zones de transit empruntées par les avalanches coulantes. De plus, un danger local de coulées ou d'avalanches mineures est souvent présent car la neige peut s'y accumuler, entre autres à cause du vent.

Déclivité

L'inclinaison joue le rôle moteur, par l'intermédiaire de la gravité, dans un écoulement avalancheux, car c'est à cause de la gravité qu'il y a écoulement. Plus la pente est forte, plus l'aléa devient probable. Toutefois, on observe le plus souvent que les pentes supérieures à 45° (c'est un ordre de grandeur) se déchargent naturellement de leur neige lors des chutes de neige : on dit que les pentes se *purgent*. Inversement, les pentes faibles (inférieures à 20°) ont une activité avalancheuse faible (en terme de départ). Néanmoins, il faut garder à l'esprit que des aérosols peuvent parcourir des distances horizontales et même des contre-pentes, que des *avalanches pâteuses* (composées de neige très humide) peuvent également transiter par des zones de pente faible et qu'il ne faut jamais négliger un risque de coulée. De même, des écoulements d'un mélange d'eau et de neige¹⁵ peuvent concerner des pentes de faible inclinaison.

La plage sensible de danger est donc composée des pentes comprises entre 25° et 45° , qui constituent aussi la majorité des pentes parcourues par les skieurs. Le changement de pente est toujours à examiner avec attention car il est à l'origine de tensions de traction (ou de compression) assez importantes. En effet, le poids de la couche qui plonge dans la pente a tendance à « tendre » le manteau un peu comme un ressort. Une augmentation du poids (chute de neige, passage d'un skieur, etc.) ou une diminution de la cohésion (qui va diminuer la résistance à la traction du manteau) peut entraîner la rupture. C'est pourquoi de nombreuses

15. Les anglo-saxons appellent cela des *shlushflows* : ces phénomènes sont fréquents dans les pays nordiques au moment du dégel (influence océanique). Ce ne sont pas réellement des avalanches [16].

avalanches déclenchées sont provoquées par le passage de skieurs au voisinage d'un changement de pente.

Exposition

On entend par *exposition* l'orientation au soleil. C'est l'un des éléments essentiels qui influent sur l'évolution de la neige. Les versants à l'ombre (*ubac* ou encore envers) bénéficient moins de l'action du soleil que les versants exposés (*adret* ou *soulane*) ; la neige évolue différemment d'un versant à l'autre. De manière générale, versants chauds et froids connaissent une activité¹⁶ avalancheuse, qui à l'échelle de la saison est similaire en nombre et intensité.

Végétation

La forêt est réputée avoir un rôle de protection contre les avalanches. Ce rôle de protection est à nuancer : il semble efficace lorsque la forêt est située sur la zone d'accumulation du site mais il est illusoire lorsque la forêt est plantée sur la zone de transit [12]. Ainsi, il n'est pas rare que des avalanches rasant des forêts ou s'écoulent à travers elles (comme l'avalanche de l'Aiguillette du Lauzet en janvier 1984 ou l'avalanche de Saint-Étienne-de-Cuines qui à deux reprises, en février 1978 et janvier 1981, a entaillé une forêt plusieurs fois centenaire). On explique le rôle de protection de la forêt par sa capacité à « fixer » le manteau neigeux. Cette capacité de fixation est très liée à la nature des essences et des structures du peuplement. Seule une forêt dense d'arbres à aiguilles persistantes (épicéa, sapin) permet de fixer le manteau neigeux d'une part en retenant la neige lors de sa chute (fonction du houppier, qui accélère la métamorphose de la neige accumulée sur les branches) et d'autre part parce que la neige tombant en masse des branches agit sur le manteau neigeux comme un poinçon [12]. La micro-ambiance existant au sein d'une forêt dense implique une évolution tout différente du manteau neigeux par rapport à une zone à découvert : il est par exemple rare de trouver du givre de surface. Si la forêt est composée d'arbres à feuilles ou à aiguilles caduques (comme les mélèzes) ou si elle est clairsemée, le risque existe toujours même s'il demeure faible (il reste suffisant pour tuer des skieurs comme l'ont prouvé plusieurs accidents).

La végétation basse (vernes, arbustes, etc.) dans une zone à découvert contribue d'un côté à augmenter la rugosité, de l'autre à faciliter « l'aération » du manteau neigeux (formation de neige sans cohésion près des arbustes). Il n'est dès lors pas toujours facile de cerner son action sur la neige. L'herbe non fauchée favorise la reptation et le départ des avalanches de fond.

5.2.4 Facteurs variables influant sur la stabilité du manteau

Chutes récentes de neige

L'activité avalancheuse augmente pendant et après des chutes de neige ; le plus souvent, c'est l'instabilité de la dernière couche qui en est à l'origine. Deux para-

16. Des études récentes montrent que les versants nord sont plus dangereux que les versants ensoleillés : 70 % des accidents concernant des skieurs auraient lieu dans des versants nord [6].

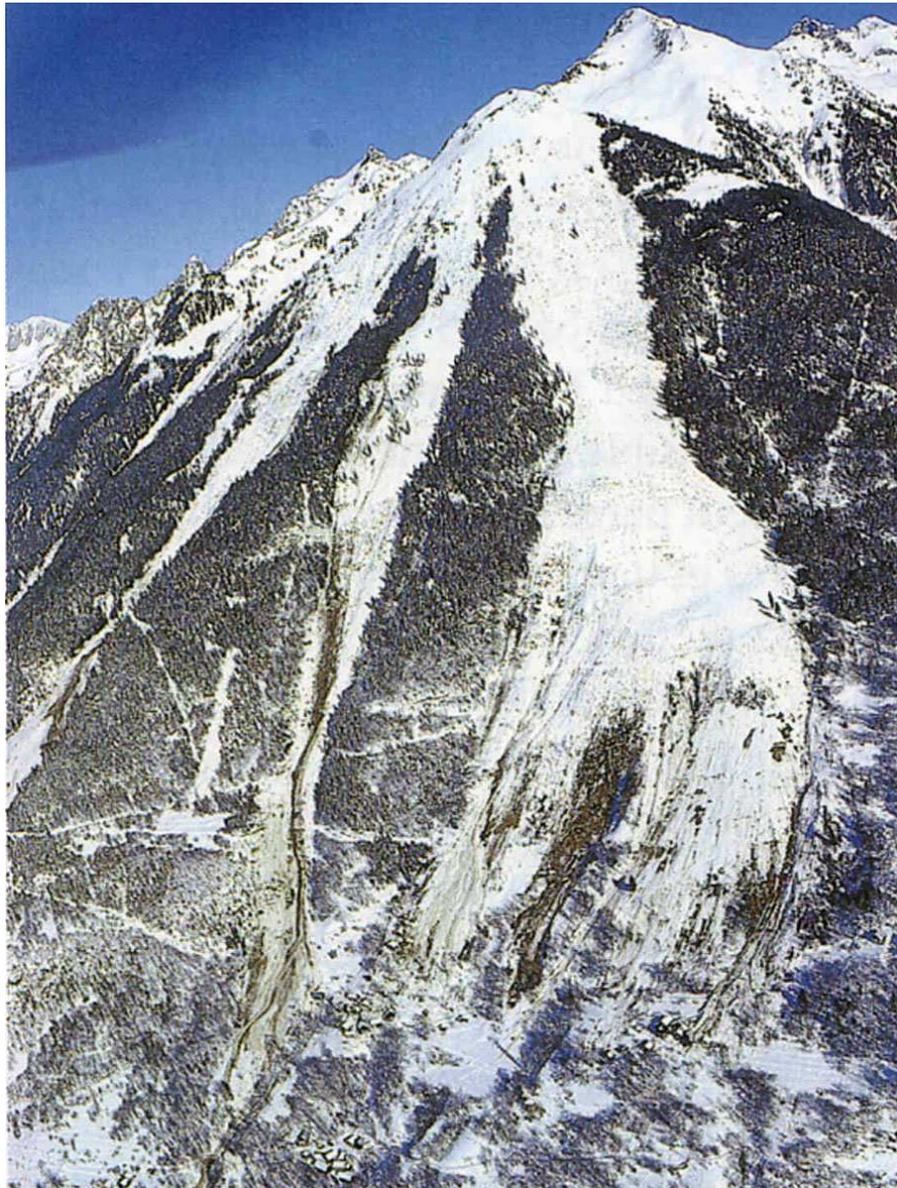


Figure 5.9 Vue du site de Saint-Étienne-de-Cuines (Savoie) après l’avalanche de janvier 1981. Avant 1978, le versant était entièrement boisé jusque vers 2000 m. Cliché C. Charlier.

mètres caractérisent une chute de neige :

- la *hauteur cumulée* : c’est un paramètre délicat à déterminer car la neige se tasse rapidement (environ 20 % de diminution de hauteur dans les premières heures) et l’action du vent provoque des variations importantes de hauteur. C’est pour cette raison qu’il faudrait lui préférer une hauteur d’eau équivalente ou bien encore un poids par unité de surface. Néanmoins, l’usage du cumul de neige en terme de hauteur est encore de nos jours le plus fréquent ;
- l’*intensité de la chute de neige* : c’est la quantité de neige tombée par unité de temps. 50 cm de neige tombée en 12 ou en 48 heures ne produisent pas le même résultat. En effet, plus l’intensité diminue, plus la métamorphose et le tassement du manteau (donc sa consolidation) ont le temps de se réaliser ; le risque s’en trouve alors diminué à terme plus ou moins long. Une chute de neige est supposée devenir critique lorsque l’intensité dépasse les 5 cm



Figure 5.10 Le départ d'avalanche en clairière ou à la sortie d'une forêt n'est pas à négliger (Gresse-en-Versors, Isère). Cliché C. Ancey.

par heure (l'intensité maximale enregistrée est de l'ordre de 15 cm/h lors de violentes tempêtes). La signification de ce chiffre est à nuancer car il faudrait également tenir compte des effets du vent et de la température de l'air. On peut néanmoins conclure que des hauteurs importantes de neige déposée rapidement sont généralement instables.

De très fortes chutes de neige sont des événements isolés mais ne sont pas rares. Quelques exemples fixent des ordres d'idée de chutes « record » : le cumul de neige¹⁷ atteint 276 cm du 10 au 16 février 1990 à Tignes (2100 m). Les zones de basses altitudes sont aussi concernées : il est tombé 110 cm de neige sur les Terres Froides du plateau de Chambaran du 12 au 13 décembre 1990 [17] ! Des chutes dépassant 30 cm entraînent un risque sensible d'avalanche, mais il ne faut pas oublier que même une très faible couche peut partir en coulée : 10 cm de neige fraîche partant sur une longueur de 50 mètres et une largeur de 10 mètres suffisent à tuer un skieur ; cela représente quand même 50 m^3 (soit en moyenne 10 tonnes) ! De même, ce n'est pas seulement le volume de neige engagé qui rend une avalanche catastrophique, mais également une qualité de neige exceptionnelle pour le site (par exemple, neige très humide ou au contraire très froide) ou un scénario météorologique inhabituel (voir à ce propos, le cas de l'accident du col du Brenner en Autriche en 1974 [18]). En conclusion, le danger d'avalanche n'est pas toujours proportionnel à la quantité de neige tombée.

Une grande partie des avalanches (spontanées et déclenchées) concernent la couche de surface. Ce n'est pas tellement la quantité cumulée qui est la cause principale d'avalanche, mais surtout les propriétés mécaniques du manteau neigeux et son évolution qui conditionnent l'activité avalancheuse. En revanche, la quantité

17. Les chiffres suivants sont donnés en cm de neige, mais en toute rigueur, il faudrait employer l'équivalent en mm d'eau.

de neige récente influe considérablement sur la taille des avalanches. Ainsi, c'est en général pendant d'importantes chutes de neige ou juste après, que sont à redouter des avalanches majeures (et donc les catastrophes) dans les sites concernés. A l'opposé, la corrélation entre importance du cumul de neige récente et déclenchement d'avalanches (par des skieurs par exemple) est moins évidente. Dans le cas de chutes moyennes (moins de 40 cm de neige), la stabilité dépend fortement de la structure mécanique du manteau neigeux.

Pluie

La pluie modifie le manteau, du moins les strates superficielles, en l'humidifiant : dans un premier temps, la présence d'eau liquide en faible quantité contribue à stabiliser le manteau neigeux en accélérant le tassement et en augmentant la cohésion (dans le cas de neige pulvérulente). Si elle devient trop importante, elle rend le manteau instable en diminuant sa cohésion ; celui-ci a tendance à se « liquéfier ». L'apport d'eau liquide a alors un triple effet : alourdissement, réchauffement, et changement de nature des liens entre grains. Lorsqu'une chute de pluie suit une chute de neige, on note le cycle suivant [19] :

- dès le début de la pluie (moins de 1 mm de pluie tombée), on observe quelques avalanches avec départ en plaque, le plus souvent de faible épaisseur (20 à 30 cm) et concernant la neige récente : on parle d'*avalanche immédiate* ;
- au bout de quelques heures (de 10 à 15 heures), on observe des avalanches plus importantes, avec départ en plaque et pouvant concerner des couches de neige anciennes : on parle d'*avalanche retardée*. Le délai nécessaire entre avalanches immédiates et retardées est lié à la structure du manteau neigeux et surtout à la vitesse de percolation. Celle-ci est d'autant plus efficace et rapide qu'elle concerne de la neige fraîche peu ou pas humidifiée ;
- au-delà de 40 mm de pluie, l'activité avalancheuse diminue pour devenir quasiment nulle.

Si la pluie intervient sans chute de neige, il semble que cela soit seulement la teneur en eau liquide (liée à la percolation et au drainage du manteau) qui conditionne l'activité avalancheuse. La *teneur en eau liquide* (TEL) est la mesure qui permet d'avoir une idée précise de l'humidité de la neige (voir chap. 4). C'est donc un paramètre important caractérisant les strates du manteau. De manière générale, l'augmentation de la TEL de 0,5 % à 6 % n'entraîne pas de variation de la résistance au cisaillement. Néanmoins, entre 0 et 0,5 %, on observe qu'une neige humide, pour avoir la même résistance qu'une neige sèche, doit avoir une masse volumique plus importante [20]. Il s'ensuit que le passage d'une neige sèche à une neige humide induit une baisse importante de la résistance au cisaillement car ce passage se fait sans perte notable de densité, ce qui peut expliquer le départ des avalanches immédiates. Par la suite, l'augmentation de la TEL n'entraîne que peu d'évolution de la résistance. Une neige normalement drainée ne présente pas de valeur de TEL supérieure à 7 ou 8 %. On peut penser toutefois qu'une teneur en eau importante ($TEL > 8\%$) favorise le départ d'avalanches de neige humide, dont les facteurs sont réunis quand :

- il y a présence d'une couche imperméable (croûte de regel) freinant la percolation et le drainage de l'eau en favorisant ainsi une forte saturation ;

- il y a forte saturation du sol (fonte au printemps) ;
- il y a des précipitations importantes dépassant la capacité de drainage du manteau. Cette neige gorgée d'eau peut être responsable d'avalanches exceptionnelles et catastrophiques, car ces dernières sont capables de parcourir de grandes distances du fait de leur fluidité (comme l'avalanche de Chamechaude en Chartreuse, en février 1979). Pour donner une image grossière de ce type de phénomènes, on parle parfois d'avalanches « yaourt » : lorsque l'on remue avec une cuillère un pot de yaourt, celui-ci se fluidifie et peut s'écouler.

La TEL importante est alors responsable de la disparition des ponts de glace reliant les grains et de la diminution des forces de capillarité (cohésion capillaire) [20]. Ce changement de texture par humidification accompagné d'un alourdissement de la neige peut expliquer l'apparition des avalanches retardées.

Vent

Le vent a deux effets bien distincts sur la neige :

- il transporte la neige durant un épisode météorologique (neigeux) ou après. D'importantes accumulations de neige vont ainsi se former dans les zones soumises à une moindre influence du vent (voir chap. 2) ;
- il accélère ou retarde les phénomènes thermiques et la « respiration » du manteau neigeux (échange de vapeur d'eau air/manteau). Ainsi, le foehn peut accélérer le processus de fonte du manteau (voir chap. 3).

Dans l'évaluation (temporelle) du risque, notamment du risque accidentel, le vent est souvent cité comme un facteur favorisant l'instabilité superficielle du manteau neigeux (formation d'accumulation, influence sur le frittage, etc., voir également § 5.2.4). Dans une analyse spatiale du risque, il est important de localiser et d'estimer les principaux dépôts de neige dus au vent dans la zone d'accumulation, car le volume de ces panneaux est à prendre en compte dans l'étude des phénomènes majeurs.

Facteurs thermiques

La neige est généralement sensible à un changement de température en son sein ou à sa surface et des modifications importantes du comportement mécanique ont lieu, surtout lorsque sa température est proche de 0°C. Un réchauffement peut être le résultat :

- d'une augmentation de la température (élévation de l'isotherme 0°C, effet de serre dû à la nébulosité, etc.) ; toutes les pentes sont alors concernées et l'intensité du réchauffement décroît en général avec l'altitude ;
- du rayonnement solaire ; seules les pentes exposées au soleil sont concernées. Sur ces versants, la déclivité accentue l'effet dû au rayonnement car le flux pour une surface inclinée est plus important que pour une même surface horizontale (ceci explique que les routes restent plus longtemps enneigées que les pentes qui la dominent) ;
- du rayonnement thermique ; les échanges neige/atmosphère qui, normalement, sont importants la nuit peuvent être fortement influencés par la nébu-

losité (voir chap. 3).

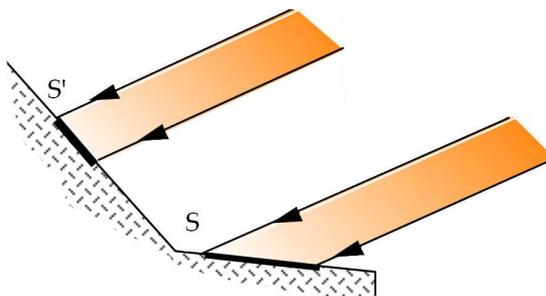


Figure 5.11 Le flux est la quantité de chaleur reçue par unité de surface ; il dépend de l'orientation de la surface par rapport à la direction du rayonnement solaire : le flux est maximal lorsque la surface est perpendiculaire à cette direction.

L'effet d'un réchauffement dépend de son intensité, de sa soudaineté, de sa durée, et des événements météorologiques qui l'ont précédé. Il est admis qu'un faible réchauffement (réchauffement diurne accompagné d'un refroidissement nocturne) entraîne une augmentation de la stabilité en favorisant le tassement et les métamorphoses (changement de cohésion, déformation accrue du manteau qui rééquilibre les contraintes en son sein). En revanche, l'incidence sur le risque accidentel est plus difficile à estimer : la majorité des accidents ayant causé la mort de skieurs ont eu lieu l'après-midi (entre 12 h et 16 h) ; ceci semble être dû, entre autres, à une prise de cohésion dans le cas de neige dite poudreuse (que certains suspectent être à l'origine du déclenchement de plaques friables) ou bien à une diminution locale de la cohésion sur les pentes ensoleillées (c'est pour cela qu'il est à la fois fort désagréable et imprudent de skier dans de telles conditions au printemps l'après-midi). Un fort réchauffement (*redoux*) ou réchauffement moyen mais prolongé provoque une instabilité marquée. L'activité avalancheuse spontanée est augmentée : les pentes raides (au-dessus de 25°) se purgent et des avalanches importantes sont à redouter ; le pourrissement du manteau neigeux (caractérisé par une grande TEL) est ainsi souvent la cause d'avalanches de fond. Au fil des jours même s'il y a persistance du redoux, le risque naturel faiblit en général mais un risque accidentel peut rester marqué. Si, de plus, le réchauffement est accompagné ou précédé de chutes de neige (c'est un cas fréquent au printemps), la neige tombée se consolide mal et l'activité avalancheuse devient maximale sur toutes les pentes (le 13 février 1991, neuf randonneurs trouvèrent ainsi la mort dans le Queyras au-dessus d'Aiguilles après de fortes chutes de neige suivies d'un important redoux).

État du manteau neigeux

Le risque d'avalanche dépend, entre autres, de la structure du manteau neigeux : la résistance mécanique de chaque strate et la nature des interfaces (c'est-à-dire des liaisons entre couches) jouent un rôle prépondérant dans la stabilité du couvert neigeux, cela revient donc à dire que toute l'histoire du manteau neigeux influe sur sa stabilité à un moment donné.

Néanmoins si on se limite aux avalanches superficielles (qui constituent la majorité des avalanches impliquant des skieurs), seule la nature de la couche supérieure

et de son interface conditionne la stabilité de la neige. Il serait extrêmement difficile de donner toutes les configurations favorables au déclenchement et en outre, il serait osé de prétendre à un tableau exhaustif! Toutefois, une attention particulière doit être apportée lorsque l'interface est constituée d'une croûte dure ou lisse (grains fins ou grains ronds) ou d'une couche fragile favorisant le glissement (givre de surface, gobelets, faces planes, neige roulée, etc.) surmontée d'une couche de neige fraîche (voir également chap. 9).

La stratification du manteau intervient dans sa stabilité mais son influence est complexe. De manière schématique, la nature intrinsèque de chaque couche (cohésion, masse volumique, résistance mécanique, etc.), le type d'interface et l'existence de couches fragiles sont les facteurs essentiels de la stabilité. Par exemple, si l'on ne tient pas compte de la position des plans de glissement potentiels et des conditions météorologiques, on déduit de l'observation (sur 50 années) du type du profil moyen de battage la tendance générale de l'activité avalancheuse (naturelle, accidentelle, etc.) comme suit [21] :

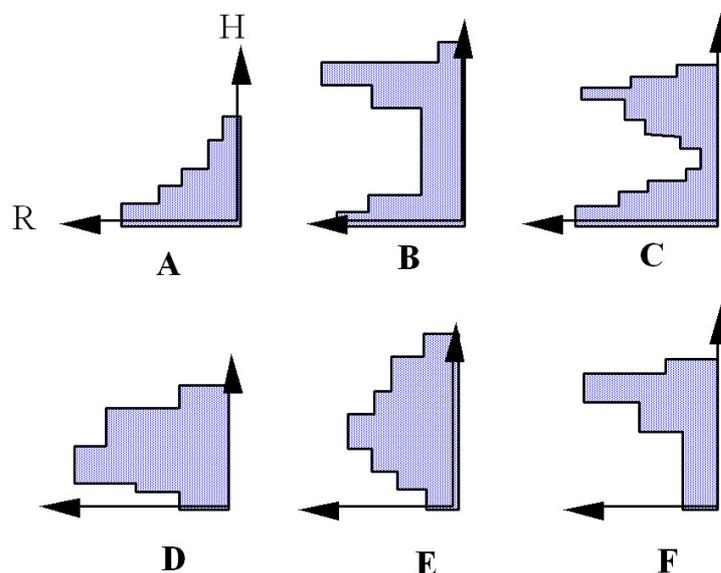


Figure 5.12 Les six familles d'histogramme de battage d'après [21].

- Profil A : il est régulièrement croissant vers sa base. Il présente peu de discontinuités (profil régulier de la courbe de résistance au battage, peu de couches minces) et il indique un manteau globalement stable, où seules de petites avalanches de surface sont à craindre.
- Profil B : la partie centrale présente une faible résistance au battage, et en général les effets de givrage (métamorphose de moyen ou fort gradient) y sont prédominants. Cette couche épaisse peut parfois être entraînée par le déclenchement des couches superficielles (passage d'un skieur par exemple) et augmenter ainsi considérablement la masse mobilisée par l'avalanche.
- Profil C : il résulte de la superposition de deux profils de type A, séparés par une couche fragile et peu épaisse (moins de 20 cm). Cette couche intermédiaire fragilise le manteau et favorise une activité avalancheuse importante.
- Profil D : il a une forme de ventre. Près du sol, il y a le plus souvent une couche de gobelets. C'est un profil dont les caractéristiques évoluent souvent

Tableau 5.2 Le tableau ci-dessus résume, selon le type de profil observé au 1^{er} avril, la fréquence de la famille sur 50 ans (%), la résistance moyenne au battage au 1^{er} janvier (R_1), celle au 1^{er} avril (R_2), le nombre d'avalanches durant les cinq épisodes les plus importants de l'hiver (I , entre parenthèses la plage de valeurs) dans la région autour de Davos (Suisse), la cause prépondérante de déclenchement classée en 6 familles : chute de neige $H > 50$ cm et vent de vitesse $V > 8$ m/s (1), chute de neige $H > 50$ cm (2), vent $V > 8$ m/s (3), température à la fin de la période (température supérieure à 0°C ou accroissement supérieur à 7°C) (4), épisode de plus de cinq jours (5), divers (6).

| Type | % | R_1 | R_2 | I | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|------|----|-------|-------|------------|----|----|----|----|----|----|
| A | 12 | 22,7 | 50,7 | 7,0 (6–8) | 23 | 13 | 17 | 23 | 1 | 23 |
| B | 16 | 10,9 | 16,4 | 7,8 (6–10) | 8 | 0 | 28 | 20 | 4 | 40 |
| C | 16 | 15,4 | 33,4 | 9,9 (7–13) | 25 | 10 | 28 | 7 | 7 | 23 |
| D | 14 | 10,1 | 28,0 | 8,6 (7–10) | 14 | 23 | 23 | 11 | 3 | 26 |
| E | 28 | 6,2 | 28,4 | 9,7 (7–18) | 19 | 10 | 23 | 25 | 0 | 23 |
| F | 14 | 2,6 | 22,1 | 8,8 (6–18) | 8 | 17 | 17 | 20 | 10 | 26 |

beaucoup entre un terrain plat et une pente. L'activité avalancheuse (en terme de départ) est en général modérée et limitée aux couches de surface.

- Profil E: de forme identique au précédent et plus fréquente. Néanmoins, l'épaisseur des couches fragiles près du sol augmente. On y rencontre essentiellement des grains à faces planes et des gobelets, ce qui semble accroître l'activité avalancheuse avec des phénomènes d'ampleur.
- Profil F: forme inversée du type D. Des surcharges importantes peuvent favoriser de grosses avalanches de fond.

On ne peut pas néanmoins résumer l'importance d'une activité avalancheuse au seul examen du profil de battage ; il faut, entre autres, tenir compte des couches fragiles. Il faut noter qu'une couche fragile joue un double rôle : elle a une faible résistance mécanique (qui se répercute dans la distribution des contraintes) et elle facilite le glissement (comme un lubrifiant dans une machine). À ce titre, elle constitue une condition *nécessaire* (ou favorable) au déclenchement mais pas *suffisante*, tout comme un lubrifiant est nécessaire au fonctionnement d'une machine mais ne suffit pas tout seul à la faire fonctionner. C'est pour cela que l'existence de couches fragiles au sein d'un manteau n'est pas forcément synonyme d'un danger d'avalanche : ainsi, des couches de gobelets se trouvent fréquemment dans les sondages sans induire de dangers particuliers.

5.3 Quelques exemples d'avalanches

5.3.1 Avalanche catastrophique au mont Cook

Déroulement de l'accident

Le mont Cook (3764 m), point culminant de la Nouvelle-Zélande, a été le théâtre le 14 décembre 1991 de l'une des plus gigantesques avalanches connues de mémoire d'homme. Une énorme masse de rocher et de glace (sérac sommital) se détache du sommet principal qui perd 20 m d'altitude d'un seul coup ! Comme la face est

du mont Cook offre un versant raide (entre 50 et 57°) haut de plus de 700 m, l'écoulement du mélange de pierres, de glace et de neige accélère considérablement du fait de la pente: la vitesse du front a été estimée entre 400 et 600 km/h. Un aérosol se forme et dévale sur plus de 2700 m. Durant la première phase, l'écoulement a un effet comparable à un tremblement de terre de magnitude 3 (d'après la signature sismique recueillie pendant une minute). On estime la masse ainsi mobilisée à 14 millions de m³ de matériaux divers. À l'aval de la face est se trouve un vaste plateau glaciaire (de pente moyenne égale à 17°), où l'écoulement s'élargit sur environ 2 km et comporte une partie dense qui a complètement raboté la surface du glacier. Sa vitesse s'affaiblit nettement par la suite mais l'écoulement dure au moins deux heures et parcourt plusieurs kilomètres (environ 7 km) tandis que le souffle de l'aérosol se fait sentir encore plus loin. Le gros de l'écoulement s'arrête sur le glacier de Tasman sous la forme d'un dépôt de boue, de glace pilée et de pierre brisée (environ la moitié de la masse initiale a été réduite en poussières).

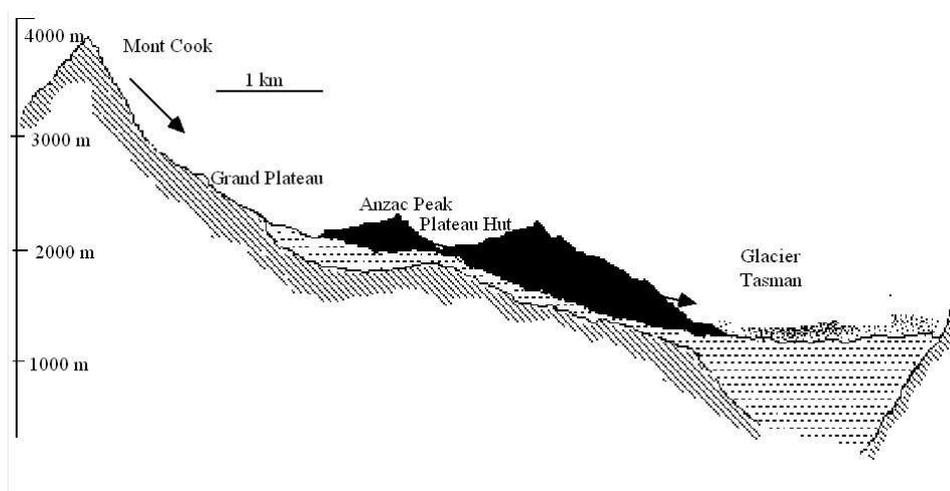


Figure 5.13 Profil de terrain du mont Cook (3764 m).

L'avalanche et ses causes présumées

On est ici en présence d'un phénomène complexe; l'éboulement (ou la chute de sérac) du sommet du mont Cook a donné naissance à une avalanche mixte, dont la partie dense a fortement érodé le glacier de Tasman. Cette avalanche n'est pas l'unique exemple d'avalanches catastrophiques liées à d'autres phénomènes qui en accroissent l'ampleur: chutes de séracs, laves torrentielles, lahars, éboulements, etc. Ainsi les catastrophes du Huascarán (Pérou) le 10 janvier 1962, de Mattmark le 30 août 1965, etc. causèrent des dégâts considérables et la mort de nombreuses personnes (près de 4000 victimes pour le Huascarán).

5.3.2 Avalanche accidentelle au Moriond

Déroulement de l'accident

Le dimanche 29 mars 1992, il fait grand beau sur les Alpes. En fin de matinée, trois skieurs anglais empruntent un itinéraire hors-piste du domaine de Courchevel,

itinéraire régulièrement parcouru dans les escarpements nord du col de Chanrossa (2544 m) et à proximité immédiate des remontées mécaniques. Ils s'engagent dans le petit cirque orienté au nord et dominant le plan Mugnier. La veille, deux surfeurs y sont passés et leur trace dans la poudreuse y est encore visible.

Un premier skieur (A) s'engage droit dans la pente; sa godille est hésitante, sans doute à cause d'une neige irrégulière. Après avoir descendu une cinquantaine de mètres, il traverse vers sa droite. Un deuxième skieur (B) s'engage alors, traverse en longeant une ligne de crête située à moins d'une dizaine de mètres au-dessus de lui. Puis il s'élanche dans la pente. Le troisième skieur (C) le suit à quelques mètres, mais sa faible technique le fait zigzaguer à travers tout l'épaulement. Après une nouvelle traversée sur sa droite, le skieur (B) attaque une nouvelle godille qui doit le conduire à la position du skieur (A). Au moment où il atteint son compagnon, une fracture se développe et remonte la pente sur plus de cinquante mètres, au-dessus du skieur (C). Il faut 80 centièmes de seconde pour que toute la plaque se mette en mouvement. Le skieur (B) en mouvement a le temps de s'échapper du piège qu'il vient de déclencher. Ses deux camarades sont emportés et sautent une petite barre rocheuse. 4"80 après le déclenchement de la première plaque, une deuxième part au niveau des traces sous l'arête. Par chance, les secours sont lancés immédiatement par le service des pistes et les deux skieurs seront dégagés indemnes.

L'avalanche et ses causes présumées

Les skieurs ont déclenché une avalanche coulante de neige poudreuse avec départ en plaque. Une deuxième avalanche est partie, probablement par ébranlement du manteau neigeux. Le mois de mars 1992 a vu la succession d'importantes chutes de neige et de périodes de beau temps. L'activité avalancheuse a été particulièrement marquée et de nombreux accidents ont eu lieu : on déplore 7 morts pour le mois de mars (entre le 14 et le 24).

5.3.3 Chute de corniche dans la combe du Pra

Déroulement de l'accident

Le matin du 17 avril 1987, deux gendarmes empruntent les remontées mécaniques de la station de Prapoutel (Isère) afin d'effectuer l'ascension de la cime de la Jasse (2478 m) à skis. Il fait très beau; le BRA annonce un risque local modéré (sur la nouvelle échelle, cela correspondrait au degré 2). Ils atteignent le sommet par son versant ouest à 10h45 et redescendent en direction du col du Pra (2463 m). Une fois arrivés au col, ils continuent leur descente par le versant nord dominant la station du Pleyne, d'où ils comptent reprendre les remontées pour rejoindre Prapoutel. Au cours de cette descente, alors qu'ils sont vers 2300 m, 150 mètres au-dessous de la crête sommitale, les deux gendarmes entendent le bruit sourd d'une corniche qui est en train de s'effondrer : vers 11h00, un randonneur qui a réalisé la cime de la Jasse par son versant sud (itinéraire classique depuis Prapoutel) s'approchant imprudemment du bord de l'arête sommitale a en effet cassé un morceau de corniche. Aussitôt les deux gendarmes traversent vers leur gauche afin d'éviter la trajectoire de la masse de neige. Malheureusement, l'arrivée de cette coulée dans le versant supérieur de la combe du Pra déclenche une avalanche, dont



Figure 5.14 l'avalanche du Moriond (29/03/92) environ 2 secondes après le départ. Le skieur B parvient à fuir devant le front et à rejoindre un petit éperon. Les deux autres skieurs sont emportés. Cliché C. Etchelecou.



Figure 5.15 : l'avalanche environ 5 secondes après le début. Une seconde avalanche part des traces juste sous les crêtes. Cliché C. Etchelecou.

la fracture au départ s'étend sur 350 mètres. C'est une avalanche gigantesque qui prend naissance : l'épaisseur des couches déclenchées dépasse les deux mètres. Les deux skieurs sont alors happés par la neige en mouvement. Ils sont emportés sur plusieurs centaines de mètres. Par chance, l'un des deux skieurs, qui a juste eu le

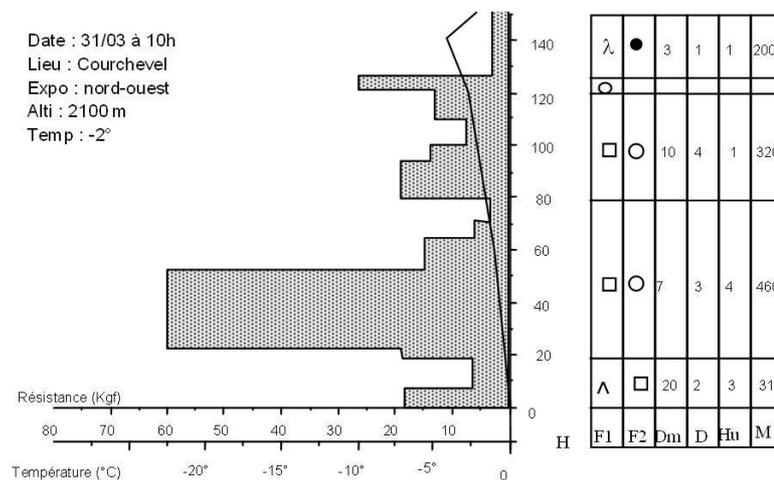


Figure 5.16 Profil simplifié du battage d'après le poste d'observation nivométéorologique de Biolley-Verdons (Courchevel) du 31 mars 1992. D'après document CEN.

temps d'ôter les lanières de ses skis avant d'être fauché, se retrouve seulement à moitié enseveli. Après s'être rapidement dégagé, il alerte les secours par radio. Malgré l'importance des moyens mis en œuvre (230 sauveteurs), le corps du deuxième gendarme sera trouvé sans vie sous plusieurs mètres de neige le lendemain. Il ne porte pas d'ARVA. Ses skis sont encore attachés à ses lanières [22].

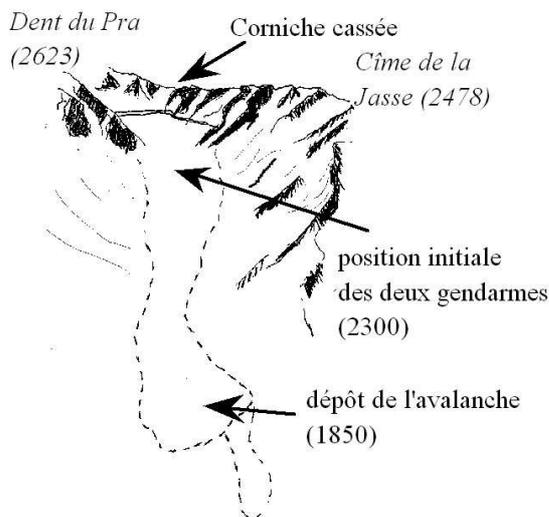


Figure 5.17 Vue schématique de la combe du Pra.

L'avalanche et ses causes présumées

L'avalanche du Pra est une avalanche coulante exceptionnelle avec départ en plaque. La fracture est haute d'environ 2,80 mètres, s'étend sur 300 m à une altitude voisine de 2350 m. La pente moyenne de la zone d'accumulation est environ de 40°. Le plan de glissement (en trait noir gras dans le tableau) est constitué d'une couche mince de gobelets et de grains à faces planes située à 1,8 m du sol. L'avalanche a suivi le thalweg parcouru par le torrent du Pra et s'est immobilisé sur un replat



Figure 5.18 Cassure linéaire. Cliché Météo-France.



Figure 5.19 Vue de la zone de dépôt et de la zone de départ.

(appelé le Fond du Pra) vers une altitude de 1850 m. La hauteur du dépôt dépassait par endroit 12 mètres. La figure 5.18 montre le profil de battage du sondage réalisé le lendemain sur les lieux du décrochement. L'épaisseur de la couche mince y a été exagérée. Les couche de neige déclenchées, constituées essentiellement de grains fins, étaient bien consolidées. La strate superficielle (une trentaine de centimètres) résulte des chutes de neige du début du mois.

À la lecture du sondage, on peut dire que le manteau neigeux, soumis au poids

de un ou plusieurs skieurs, est dans son ensemble « stable » ; néanmoins, sollicité brusquement par une coulée due à la chute de corniche (plusieurs tonnes), il a cédé et s'est rompu selon sa couche de plus faible résistance (au battage). Cette couche résultant des faibles précipitations du début février a servi de « lubrifiant » (go-belets et faces planes). Ce tragique accident montre que la stabilité d'un manteau neigeux est indissociable de la charge qui le sollicite. C'est un fait, à notre avis, totalement imprévisible.

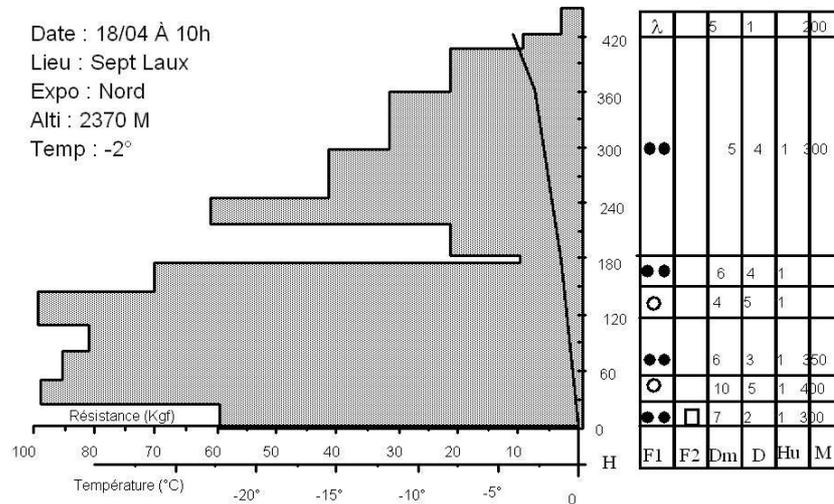


Figure 5.20 Histogramme de résistance au battage et profil stratigraphique d'après un sondage du CEN réalisé le lendemain à l'endroit du décrochement.

5.4 Stabilité d'un manteau

5.4.1 Quelques définitions utiles

L'objet de ce chapitre est de donner quelques notions sur les mécanismes du départ. Étant donné la complexité du phénomène, il est hors de question de dresser un tableau exhaustif des causes physiques du déclenchement et on se contentera de donner quelques notions générales et des explications spéculatives d'un phénomène, qui reste dans son ensemble encore à l'heure actuelle peu compris.

Définition de la stabilité

Une avalanche part quand le manteau neigeux ne parvient plus à maintenir son équilibre mécanique et/ou à l'ajuster en fonction de ses propres transformations (métamorphose, reptation) ou des conditions extérieures qui lui sont imposées (surcharge, conditions météorologiques, etc.). Après la rupture du manteau neigeux, l'écoulement ne peut prendre naissance que sous l'action de la gravité. C'est pour cela qu'une avalanche ne peut se déclencher que sur une pente suffisamment raide¹⁸.

¹⁸. À noter par parenthèse que cela n'est pas vrai pour les avalanches dites sous-marines (turbidites) qui partent même sur terrain horizontal, car dans ce cas, c'est la poussée d'Archimède qui est l'élément moteur de l'écoulement.

Une avalanche traduit donc une *rupture d'équilibre* d'une partie ou de l'ensemble du manteau neigeux sur une pente. Couramment, on parle d'instabilité du manteau neigeux. Pour étudier les causes mécaniques du déclenchement des avalanches, le scientifique est donc amené à s'interroger sur la stabilité d'un manteau neigeux.

Il convient toutefois de noter que, de manière générale en mécanique, la *stabilité* est un concept associé à l'état (équilibre, écoulement, etc.) d'un système. Par exemple, on dit qu'un corps est en équilibre lorsque les forces, auxquelles il est soumis, se contrebalancent ; cet état est dit stable si toute légère perturbation du système est amortie, c'est-à-dire que le corps retrouve rapidement son état premier. En nivologie, par extension ou par dérive, la stabilité est synonyme d'état d'équilibre du manteau : un manteau neigeux est stable tant que l'équilibre en son sein est maintenu ou bien que toute rupture est immédiatement amortie. Par ailleurs, il faut noter que si l'analyse d'une stabilité intrinsèque du manteau est intéressante pour l'étude du déclenchement spontanée des avalanches, elle devient insuffisante dès lors que l'on s'intéresse à un manteau neigeux sollicité par un skieur, un engin mécanisé, etc. Il est donc utile de définir la stabilité par rapport à la charge imposée [23]. Le domaine de stabilité est alors la plage des charges que peut supporter de manière certaine le manteau neigeux. En dernier lieu, il faut noter qu'en toute rigueur les critères de stabilité devraient se définir par rapport non seulement à la charge mais également à la vitesse de déformation, car on a vu que la résistance de la neige dépend fortement de sa vitesse de déformation (cf. chap. 3).

Surface de glissement

La rupture d'un matériau peut se faire de différentes manières : fissures, dislocation, glissement, etc. Dans le cas du manteau neigeux, qui se présente comme un matériau stratifié, le passage d'une couche à une autre présente une discontinuité dans le comportement mécanique : c'est ce clivage existant qui à la fois joue un très grand rôle dans la stabilité d'un manteau neigeux et constitue un lieu privilégié pour la rupture, contrairement à un matériau homogène. On constate en effet qu'une avalanche, dans son aire de départ, concerne le plus souvent un ensemble de couches en surface, qui glisse sur une autre strate (plus rarement sur le sol) : la surface de contact entre la couche déclenchée et la couche fixe s'appelle le *plan de glissement*. Le mécanisme de rupture est très grossièrement assimilable à la rupture d'une pile de livres posée sur un plan incliné.

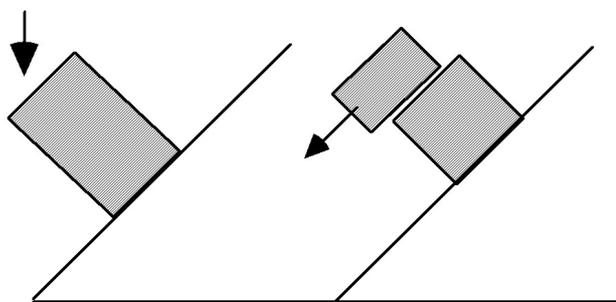


Figure 5.21 Si l'on place une pile de livres sur un plan, il peut rester en équilibre si la pente n'est pas trop forte. Si l'on exerce une force verticale, on amène la pile à la rupture, qui se fera le long de la surface de contact de deux livres.

Pour comprendre le mécanisme de départ des couches superficielles, on considère le bilan des forces qui, juste avant la rupture, s'exercent sur la couche déclenchée. C'est l'objet du prochain paragraphe. Par parenthèse, il faut faire remarquer que la surface de glissement de l'avalanche, visible dans l'aire de départ, n'est pas nécessairement le lieu de la première rupture. Il se peut, dans certains cas, que seule la première couche superficielle soit instable, et que sa mise en mouvement puisse entraîner par frottement la rupture de la couche sous-jacente. Ceci est particulièrement visible dans le cas de départ en marche d'escalier. Dans ce cas-ci, l'instabilité a gagné instantanément des couches plus en profondeur. Quelquefois, la mise en mouvement provoque à son passage l'entraînement de nouvelles couches de neige en périphérie de l'écoulement ou au-dessous de la surface de glissement : on parle alors de *reprise*. L'analyse du mécanisme du départ n'en ressort que plus complexe.

5.4.2 Une première approximation

Bilan local

Afin de comprendre les mécanismes du déclenchement, envisageons en premier lieu un cas idéal : considérons un manteau reposant sur un plan incliné et constitué de plusieurs couches possédant des propriétés mécaniques propres.

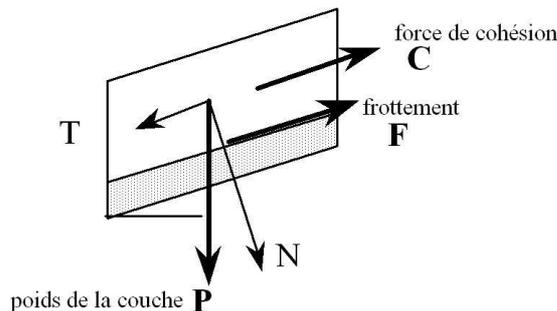


Figure 5.22 La strate supérieure est soumise à trois forces : le poids P , les forces de cohésion et le frottement F . Elle est en équilibre si le frottement F et la cohésion C contrebalancent la composante tangentielle T du poids.

Considérons une tranche de ce manteau et faisons un bilan des forces pour l'une de ces strates : par exemple, la couche supérieure est soumise à son propre poids P (effet de la gravité), aux frottements F exercés par la strate inférieure (ainsi qu'à une force de réaction non représentée ici) et à une force de cohésion C qui lie le bloc au reste du manteau neigeux. De manière grossière, on comprendra que si les frottements F entre strates et la cohésion C compensent la composante tangentielle du poids T , il y aura équilibre stable de cette strate : il faut que $T < F + C$. Le rôle de la résistance au cisaillement et de la cohésion ressort clairement de cette analyse. On s'aperçoit aussi que plus la pente est raide, plus la composante tangentielle T est grande et plus l'équilibre est compromis. De même si la cohésion diminue, l'équilibre peut être rompu. On peut renouveler ce bilan pour chacune des strates et vérifier s'il y a équilibre ou non. Examinons maintenant la conséquence du passage d'un skieur. Son poids S se rajoute à celui de la couche. La composante

tangentielle T est donc plus importante, et si ce surcroît de charge est supérieur aux forces de maintien $F + C$, il y a rupture d'équilibre.

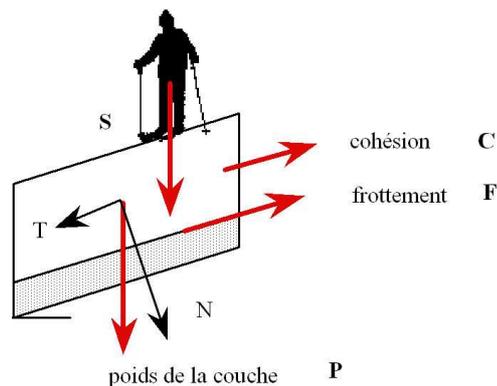


Figure 5.23 Lors du passage d'un skieur, le frottement F et la cohésion C doivent compenser l'augmentation de la composante tangentielle du poids pour que l'équilibre persiste.

Si cette analyse permet de mettre en lumière le rôle du frottement entre strates et de la déclivité, elle reste très grossière et insuffisante à expliquer le départ d'une avalanche et doit être considérée avec précaution : elle ne tient pas compte de l'hétérogénéité¹⁹ du manteau neigeux, de la répartition des contraintes au sein du manteau neigeux, du déroulement et du mode de rupture(s), etc. [24]. En effet, la neige est un matériau aux propriétés mécaniques fortement variables (cf. chap. 3) et hétérogènes d'une strate à l'autre. Entre autres, la distribution des contraintes dans la neige d'un côté rend l'analyse de la stabilité du manteau difficile à établir [11, 23, 25] et d'un autre côté pourrait expliquer certains phénomènes catastrophiques comme les départs en plaque, qui restent encore peu compris.

Étude globale : notion de plaque

Qu'il soit spontané ou artificiel, le départ d'une avalanche est le plus souvent en plaque. Le terme de *plaque* renvoie ici au fait qu'au moment du départ, la fracture découpe une superficie fermée, autrement dit, une plaque de neige qui se met en mouvement. Ainsi, il n'y a pas de lien direct avec une plaque (stratigraphique) définie dans un sondage comme étant un ensemble de couches individualisé du reste du manteau neigeux.

Un départ en plaque peut concerner n'importe quel type de couche ou de configuration stratigraphique du manteau comme le rapporte la figure 5.25. Deux élé-

¹⁹ Il faut noter que pour certains matériaux, l'analyse ci-dessus est fautive : en effet, dans certains cas, ce ne sont pas les caractéristiques moyennes du matériau qui conditionnent la rupture mais la présence d'hétérogénéités (par exemple dislocations dans les métaux). Dans la suite, on donne deux exemples fondés sur une mécanique de la rupture différente : la théorie de la couche fragile met l'accent sur l'existence d'hétérogénéités susceptibles de se propager le long d'une couche fragile. Au contraire, la notion d'état critique émet l'hypothèse que c'est toute une couche qui est en moyenne le siège de la rupture. Notons au passage l'importance de cette question théorique, car sa résolution nous permet d'affirmer ou d'infirmer notre capacité à prévoir la rupture d'un manteau neigeux.

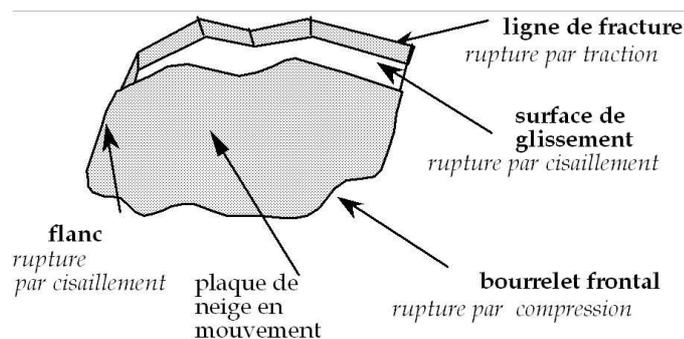


Figure 5.24 Terminologie des ruptures. Les frontières de la plaque de neige sont définies par la rupture de la couche déclenchée, qui se fait en une succession d'étapes dont l'ordre dépend du mécanisme.

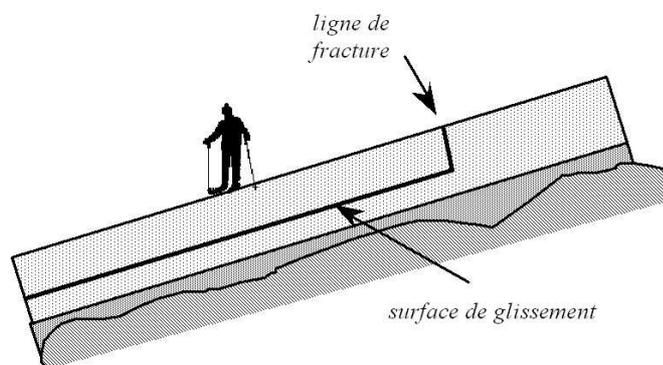


Figure 5.25 La plaque est mise en mouvement après la rupture par traction le long de la ligne de fracture et par cisaillement sur la surface de glissement. La rupture initiale (primaire) peut être selon les mécanismes l'un ou l'autre de ces processus.

ments importants servent à caractériser un départ en plaque (voir figure 5.24) :

- la *ligne de fracture*, en forme de V à l'envers, ou bien en fermeture-éclair, marque la frontière amont de la plaque. La fracture est perpendiculaire au plan des strates et est due à une rupture par traction au sein de la couche déclenchée ;
- le *plan de glissement*, est la surface sur laquelle glisse la plaque. Son état peut être altéré par l'écoulement de neige.

La nature du plan de glissement est variée comme l'indique le tableau suivant (on indique en % la fréquence observée sur le déclenchement en plaques pour les différentes catégories et sous-catégories d'après un échantillon de 30 accidents concernant des skieurs et survenus ces cinq dernières années [26]) :

Les caractéristiques nivologiques de la couche déclenchée et des surfaces de glissements sont également variées lors des déclenchements artificiels (passage de skieur) ; on note toutefois que la couche déclenchée concerne très souvent de la neige fraîche (particules reconnaissables) glissant sur une couche de faible cohésion (gobelets, faces planes, givre, etc.). En ce qui concerne des avalanches spontanées, il faut rajouter également dans les diverses configurations les couches de neige humide (grains ronds). Il n'existe en revanche aucune étude pertinente sur les

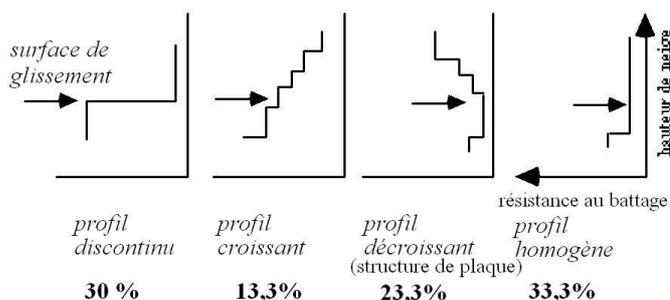


Figure 5.26 On rapporte les configurations du manteau neigeux définies à partir d'un sondage par battage. La flèche indique la surface de glissement. On indique par ailleurs la fréquence de chaque famille estimée d'après un échantillon de 30 avalanches ayant causé un accident entre 1987 et 1993.

| Catégories d'interface | Types de surface | % | Total % |
|------------------------|--------------------------|------|---------|
| Surface dure | Croûte de grains fins | 10 | 33,3 |
| | Croûte de regel | 16,6 | |
| | Croûte de faces planes | 6,6 | |
| Couche de glissement | Couche de givre | 13,3 | 56,7 |
| | Couche de faces planes | 16,6 | |
| | Couche de gobelets | 26,6 | |
| Autre | Couche de grains fins | 6,6 | 10 |
| | Givre et croûte de regel | 3,3 | |

statistiques concernant les avalanches spontanées. Le départ en plaque nécessite la succession d'un certain nombre d'étapes : ruptures par traction, par cisaillement et par compression. L'ordre de ces étapes dépend du mécanisme de la rupture, et même si pour l'observateur la ligne de fracture est le premier signe visible d'un départ en plaque, cela ne signifie ni que la rupture ait eu lieu tout d'abord par traction précisément à cet endroit-là, ni que la surface de glissement soit la surface de rupture par cisaillement. Ce qui se passe n'est pas nécessairement ce que l'on voit.

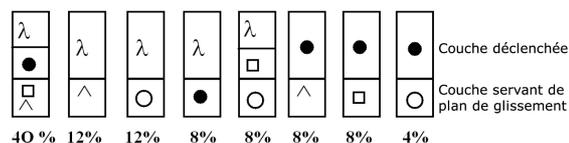


Figure 5.27 Les différents types de neige dans la couche déclenchée et la nature de la couche de glissement lors d'accidents concernant des skieurs (avalanches non spontanées). La configuration de loin la plus dangereuse semble être une couche de neige en cours de métamorphose (particules reconnaissables puis grains fins) sur une couche de gobelets ou de faces planes. Analyse réalisée sur un échantillon de 25 avalanches accidentelles [26].

La grande variabilité des configurations du manteau neigeux à l'endroit de la rupture suffit à montrer qu'il doit exister sans doute plusieurs mécanismes de formation des avalanches spontanées ou déclenchées. On propose par la suite trois mécanismes différents de rupture au sein du manteau neigeux. Il s'agit d'analyses spéculatives plausibles qui essaient d'expliquer le déroulement des événements pré-

cédant l'avalanche (spontanée ou déclenchée). On aborde ici uniquement des phénomènes observés couramment dans les Alpes. Dans d'autres régions, l'influence du climat (climat maritime prépondérant dans le cas de chaînes de montagne près de la côte comme au Japon, en Norvège, etc.) ou les effets de l'altitude (en Himalaya, etc.) donnent naissance à d'autres phénomènes comme les avalanches de glissement, dont le départ est causé par une lente fissuration d'un manteau neigeux très humidifié (la ligne de fracture est similaire à une crevasse).

5.4.3 Surcharge

La surcharge (précipitation, passage d'un skieur, chute de corniche, etc.) est l'une des principales causes de déclenchement car elle peut induire une importante augmentation (générale ou locale) des contraintes au sein des couches du manteau neigeux. Le mécanisme conduisant à la rupture au sein du manteau neigeux peut faire intervenir les mécanismes décrits juste après, et dans ce cas-là, la surcharge joue le rôle de détonateur, d'agent perturbateur ou amplificateur dans un processus latent d'instabilité. C'est le cas le plus fréquent dans les avalanches déclenchées par des skieurs. Mais ce mécanisme de rupture peut également être dû à la seule surcharge. L'avalanche de la combe du Pra (cf. § 5.3.3) donne un exemple d'accident dû à une chute de corniche malgré un manteau neigeux de très bonne constitution.

5.4.4 Redistribution des contraintes

Cisaillement d'une mince couche fragile

L'examen du manteau neigeux dans le voisinage immédiat d'une aire de départ d'une avalanche en plaque montre souvent l'existence d'une *couche fragile mince* (gobelet, neige roulée, givre de surface enfoui, faces planes, etc.) qui a servi de plan de glissement. D'aucuns pensent que, dans bien des cas, c'est cette couche de faible épaisseur qui est responsable de la rupture [27, 30], de même que dans un métal les impuretés sont les sites initiaux de la rupture. En effet, lorsque la charge de la neige au-dessus de cette strate augmente (par exemple, à cause de chutes de neige récentes), cette couche fragile se déforme et les contraintes deviennent plus importantes en son sein. De plus comme elle est composée de neige de faible cohésion, elle subit une concentration des contraintes : en effet, le nombre de contacts entre grains est peu élevé et les ponts entre grains doivent alors transmettre des contraintes plus importantes [24]. En même temps, du fait de ce faible nombre de contacts, la résistance au cisaillement est moindre [31]. À partir d'un certain seuil de déformation, cette couche se fracture suffisamment doucement pour qu'il n'y ait pas rupture (fracture ductile), mais suffisamment vite pour qu'une réorganisation de la structure ne soit pas possible (le frittage n'a pas le temps de se réaliser). Cette première étape constitue la fracture initiale ; elle est invisible car elle concerne uniquement une couche enfouie. Cette fracture se fait lentement (en plusieurs dizaines d'heures) selon des plans le long de la couche fragile. Les zones affectées sont dites super-fragiles. Leur existence au sein de la couche fragile va induire une concentration supplémentaire de contraintes (tension et cisaillement).

Une propagation de ces zones particulièrement fragiles est possible si la neige s'y prête, c'est-à-dire si les déformations et les contraintes sont suffisantes. Si l'éten-

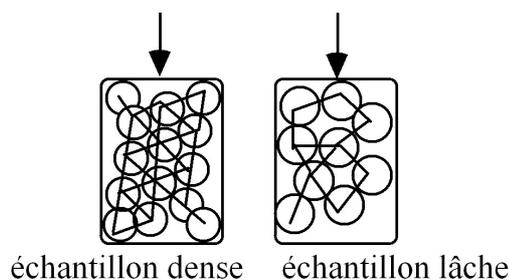


Figure 5.28 Si l'on applique la même force sur un échantillon de neige dense de bonne cohésion (grains fins par exemple) et un autre lâche et de faible cohésion (comme des gobelets), la distribution de contraintes n'est pas identique : dans le premier, les grains sont petits, rapprochés avec de nombreux contacts entre eux tandis que dans le second cas, les grains sont plus gros et ont moins de points de contact, donc les contraintes sont plus importantes car la surface de contact est bien moindre.

due de la couche super-fragile est suffisante (la longueur doit dépasser une dizaine de fois l'épaisseur de la couche supérieure), il y a alors rupture de la couche fragile qui conduit la fracture sur une surface importante (*ondes de contrainte* et de *déformation*) : c'est la *rupture dite primaire*, qui peut, étant donné sa vitesse de déformation, concerner des zones initialement de plus grande stabilité, car la résistance décroît avec la vitesse de déformation (cf. chap. 3). À ce moment-là on peut considérer que la couche fragile n'exerce plus aucun frottement sur la couche supérieure. Dès lors pour compenser la disparition du frottement à la base de la couche, la tension doit augmenter en proportion. Plus l'épaisseur de la strate est petite, plus la tension est grande. Cette redistribution est brutale et s'étend rapidement sur une vaste superficie. Lorsque cette contrainte devient supérieure à la résistance, il y a fissuration du manteau neigeux. C'est justement parce que la rupture est due à une tension excessive que la fracture se développe toujours perpendiculairement à la pente et c'est seulement à ce moment-là que la rupture devient visible pour un observateur.

L'aire de départ est limitée par l'extension de la zone fragile. Plus la couche fragile est mince, plus le développement de zones fragiles est favorisé. Par ailleurs, les modélisations ont montré l'influence complexe de la température de surface et de la vitesse de métamorphose sur la probabilité de déclenchement en fonction de l'épaisseur de la couche supérieure. Pour des couches supérieures rigides (neige dure), la longueur minimale de la zone super-fragile doit être bien plus importante.

En outre, ces zones super-fragiles peuvent fusionner. De même, des ondes peuvent se propager d'une zone à l'autre, ce qui peut expliquer des décrochements de plaques quasi simultanés sans contact des aires de départ (voir exemple § 5.3.2). La théorie des zones super-fragiles est séduisante et permet d'expliquer un certain nombre de départs spontanés en plaques, la rupture de l'équilibre, l'extension limitée de l'aire de départ même sur une pente uniforme *a priori* de stabilité homogène, le décalage observé entre la fin des précipitations et l'activité avalancheuse et des phénomènes de propagation²⁰. Cependant, elle concerne uniquement des couches

20. On entend ici des phénomènes pour lesquels le déclenchement semble consécutif au passage d'un skieur, mais avec un décrochement bien loin du skieur. Voir par exemple les accidents du ruisseau d'Arrondaz (Valfréjus, Savoie) [32] ou bien de Purcell Mountains (Rocheuses, Canada) [33].

de neige sèche (plus ou moins récentes) reposant sur une couche fragile, ce qui n'est pas la configuration stratigraphique la plus communément trouvée dans les départs en plaque. De plus, cette théorie accorde une place privilégiée aux couches fragiles minces²¹ (de l'ordre de quelques millimètres d'épaisseur), dont la détection dans les sondages stratigraphiques est difficile. À ce jour, rien ne permet de confirmer ou d'infirmer la validité ou la portée de la théorie des couches fragiles [33].

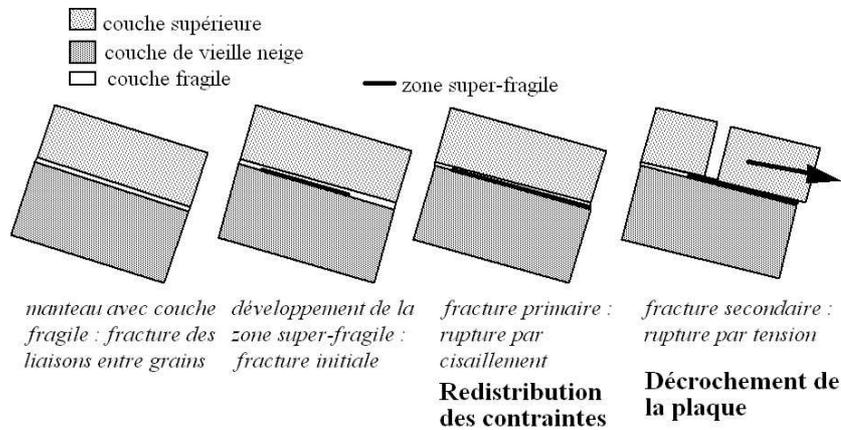


Figure 5.29 Les différentes étapes d'une rupture amenant à un départ en plaque : la rupture de la surface de frottement au niveau de la couche fragile provoque une redistribution soudaine des contraintes.

Rupture par compression

La compression (poids de la couche supérieure) d'une couche épaisse de neige de faible cohésion (gobelets, faces planes) peut entraîner une rupture par cisaillement à l'intérieur de cette couche fragile. La déformation de la strate est accompagnée d'une diminution de volume, car le cisaillement d'un assemblage lâche de grains provoque une réorganisation de la structure. Dès lors, sur une certaine surface, la couche supérieure n'est plus en contact avec la couche fragile. Le déficit des forces de frottement doit être alors compensé par un surcroît de tension. Cette redistribution de contraintes peut être suivie de la rupture par traction, comme on l'a vu dans le mécanisme précédent.

Ce scénario peut expliquer l'instabilité liée à la présence de gobelets en grande quantité, surtout durant les hivers caractérisés par un faible enneigement (comme en 1987/88). Il faut par ailleurs noter que la couche de faible cohésion sert le plus souvent uniquement de plan de glissement mais n'est pas entraînée par l'avalanche malgré sa faible résistance, ce qui incite à penser que la distribution de contraintes au sein de cette couche est différente.

Choc thermique

Des variations de température peuvent être la cause d'avalanches superficielles dans des couches de neige sensible (neige fraîche, etc.) [34]. Par exemple, des chutes

21. À l'heure actuelle, il n'existe aucune preuve in situ confirmant ou infirmant le modèle des zones super-fragiles ; voir la thèse de Jamieson [33] p. 40.

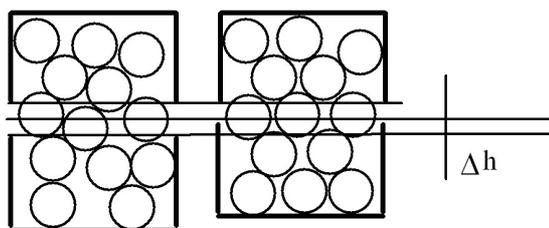


Figure 5.30 Le cisaillement d'un échantillon granulaire lâche provoque une réorganisation des particules et donc une légère diminution de volume (mais pas un affaissement). Dans le cas de gobelets, cette diminution de volume peut être accrue par l'écrasement des cristaux.

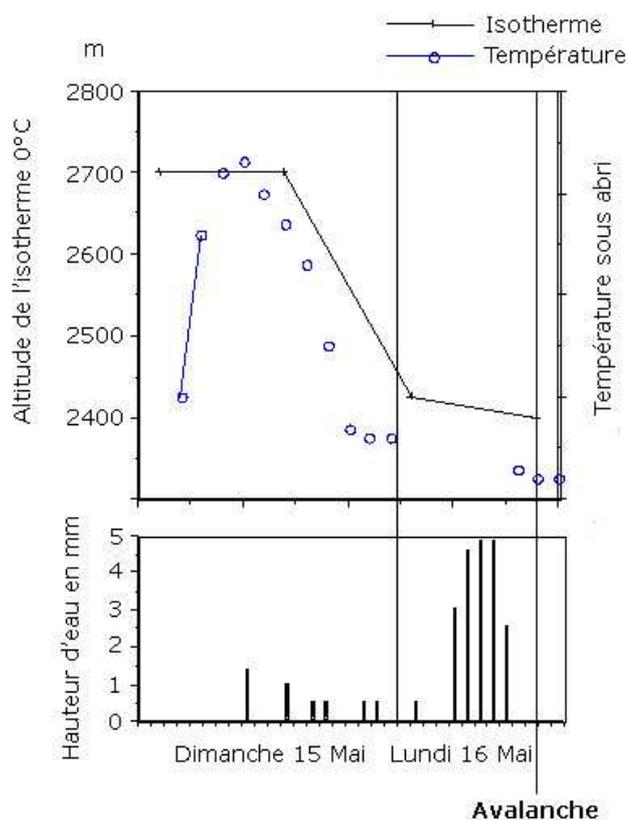


Figure 5.31 Résumé des conditions météorologiques précédant l'avalanche du tunnel du Mont-Blanc (cf. § 5.1.1) : isotherme 0°C (d'après radiosondages de Lyon et Payerne), température (station Nivoise des Aiguilles-Rouges, 2330 m), précipitations (recueillies à Chamonix). L'avalanche a eu lieu le 16 mai 1983 à 14h10.

de pluie succédant à des chutes de neige provoquent immédiatement des avalanches le plus souvent avec départ en plaque d'épaisseur voisine de 40 cm. La quantité de pluie (1 mm) ne cause pas une surcharge suffisante pour expliquer cette activité spontanée immédiate tandis que le faible délai entre le début de la pluie et les premières avalanches ne permet pas une humidification en profondeur. Les expériences ont même montré que seuls les 5–10 premiers centimètres étaient affectés [19]. L'hypothèse avancée est une redistribution des contraintes en surface : l'augmentation de température provoque une diminution importante de la résistance à la tension dans la partie supérieure et les contraintes (la reptation induit une tension au sein

de la couche) se concentrent à la base de la couche ou bien alors le changement de cohésion (frittage remplacé par capillarité) induit localement une augmentation des tensions (contraction de surface) [19]. L'avalanche du 16 mai 1983 (voir § 5.1.1) est peut-être un exemple d'*avalanche retardée*. Le choc thermique (couplé à la percolation?) est une hypothèse plausible pour expliquer le phénomène : la ligne de fracture se situe juste à l'altitude de regel.

Effet de lubrification

L'eau liquide dans le manteau neigeux cause un certain nombre d'effets néfastes à la stabilité du manteau dès qu'elle est présente en quantité trop importante ($TEL > 8\%$) :

- l'eau provoque une fonte des liaisons entre grains. Les ponts de glace restants sont à une température de 0°C et sont de faible résistance mécanique ; - des ondes de déformation dues à la percolation se propagent dans le manteau neigeux [19] ;
- la densité de la neige humidifiée augmente ;
- la percolation crée des chenaux verticaux, mais l'eau peut être déviée de ces canaux pour s'écouler le long de couches plus imperméables [19]. La texture à l'interface de cette couche change rapidement et le frottement à la base commence à diminuer, car la pellicule d'eau ne peut être mise sous pression du fait de la porosité de la neige : l'eau agit alors comme un lubrifiant en réduisant les frottements entre couche. La disparition des contraintes de cisaillement entraîne une redistribution des contraintes au sein du manteau. Comme précédemment, la rupture est alors possible.

5.4.5 Un état critique

Apparition de la cohésion

Le départ d'avalanches en plaque, qu'elles soient spontanées ou déclenchées, semble assez limité dans le temps et dans l'espace : après un délai plus ou moins court à la suite d'une précipitation suffisante de neige ou d'une activité éolienne marquée, on observe des départs en plaque (et entre autres des accidents) pendant une certaine période et sur certaines pentes. Pour expliquer ces déclenchements dans certains cas (qui ne peuvent pas toujours être mis en rapport avec l'existence de couches fragiles), certains avancent l'idée d'une *qualité critique* de neige « poudreuse » en surface.

Pour fixer les idées, donnons un exemple souvent observé : une pente recouverte de neige poudreuse semble stable le matin, en ce sens que des skieurs l'ont parcourue sans incident, tandis que l'après-midi, elle peut devenir le lieu de départ (spontané ou non) en plaque. Le lendemain, le risque semble avoir nettement diminué. Que s'est-il passé ? Entre ces trois temps, un observateur attentif aura remarqué un changement de texture de la neige de surface, même si elle garde toujours un aspect de poudreuse (aux yeux des skieurs) [6, 35, 36] : le matin, la poudreuse est pulvérulente, tandis qu'elle commence à devenir liée durant l'après-midi. Des signes tels que le développement de fissures juste au devant des skis sont des signes de ce

changement de qualité [35]. Par la suite, la consolidation due à la métamorphose se poursuivant, la neige devient progressivement plus frittée et l'instabilité diminue.

On peut tenter de généraliser cet exemple et d'expliquer un plus qualitativement ce qui se passe. Lorsque la neige fraîche est suffisamment poudreuse, seule une très faible cohésion de feutrage existe au sein de la nouvelle couche. Les contraintes y sont alors très dispersées car l'accumulation de neige est une structure granulaire très souple, les cristaux enchevêtrés entre eux présentent à leurs contacts de grandes surfaces de frottement (qui plus est, mobiles) qui « diffusent » considérablement les contraintes. Puis, la neige subit une métamorphose qui casse les branches des cristaux et crée des ponts de glace par frittage (cf. chap. 3). La structure se rigidifie progressivement et se transforme en réseau fragile de grains en contact avec des ponts de faibles dimensions. La neige acquiert une texture dite *liée* particulièrement propice à la propagation des contraintes (voir le test de la pelle de Munter au chap. 4). Enfin, à la fin de cette première étape de métamorphose, la neige s'est nettement consolidée ; les particules deviennent au fur et à mesure des grains fins. Pour illustrer cette capacité de propagation de la rupture dans la neige liée, on considère l'image suivante [37] : on aligne des morceaux de sucre à intervalles réguliers. Plus la métamorphose est à un stade avancé, plus la densité est élevée. On représente cela en diminuant la distance entre les morceaux de sucre. Lorsque la densité est faible, si on fait tomber un morceau, rien ne se passe. Par la suite, si l'on augmente la densité, la chute d'un morceau entraîne toute la rangée : c'est la propagation catastrophique qui amène à la rupture d'équilibre de toute la colonne. Si la densité continue à croître, la chute d'un sucre provoque au pire la culbute de quelques morceaux, mais le mouvement est rapidement amorti et n'est pas transmis au reste de la colonne.

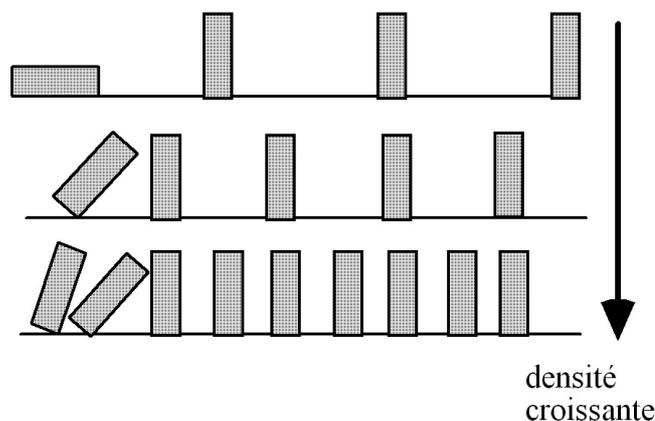


Figure 5.32 Possibilité de propagation de la rupture en fonction de la densité linéique de la rangée de morceaux de sucre : aux densités extrêmes, l'instabilité d'un bloc ne se transmet pas à la colonne, mais il existe une valeur critique de la densité à partir de laquelle, cette propagation est possible.

Des expériences *in situ* ont justement montré récemment que la masse volumique joue un rôle important pour ce type de neige : les mesures sur la neige de surface concernée par des déclenchements accidentels en plaque donnent des plages de masse volumique comprise entre 140 et 160 kg/m³. Ce n'est évidemment pas le seul paramètre à prendre en compte et il est certain que la température, la vitesse de métamorphose, la cohésion influent sur cette qualité de neige critique [38]. Le

tableau suivant donne les mesures concernant la neige de surface prises entre le 2 et 3 avril 1993, date à laquelle le passage de l'opérateur à pied a déclenché une plaque de 40 cm d'épaisseur (à la fracture). Le plan de glissement était constitué par une croûte de regel. On remarque que la masse volumique et la résistance au cisaillement croissent au fil des heures, indiquant une évolution rapide de la neige, qui garde néanmoins une consistance poudreuse (faible résistance au battage).

| Date | Heure | Température | Résistance au cisaillement | Résistance au battage | Masse volumique |
|----------|-------|-------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 02/04/93 | 10h30 | - 4,7°C | 0,2 kgf/dm ² | 0,4 kgf | 120 kg/m ³ |
| 02/04/93 | 14h30 | - 3,2°C | 0,4 kgf/dm ² | 0,5 kgf | 140 kg/m ³ |
| 03/04/94 | 12h15 | - 3,3°C | 0,6 kgf/dm ² | 0,45 kgf | 160 kg/m ³ |

Dans ce type de mécanisme, on s'attend à un rôle prépondérant de la température, car elle commande l'efficacité et la rapidité de la métamorphose : plus elle s'approche de 0°C, plus la métamorphose est rapide. Beaucoup rapportent en effet des déclenchements de plaque l'après-midi ou inversement une activité avalancheuse moindre (pour les avalanches en plaque) par temps très froid ($T < -10^{\circ}\text{C}$) [25, 32, 34]. L'influence de la température extérieure sur le développement de couches fragiles est suffisamment lente pour qu'on écarte ce type de mécanisme au profit du processus d'état critique : en effet, une augmentation de la température de l'air favorise un frittage rapide donc l'apparition d'un état critique momentané. Inversement, une température basse retarde cette apparition. Cela expliquerait peut-être la croyance commune selon laquelle que le froid maintient longtemps la stabilité du manteau neigeux, alors qu'il ne fait que retarder ou bien prolonger l'instabilité en ralentissant la vitesse de métamorphose (dans ce cas-ci).

Dans le cas d'accumulations de neige transportée par le vent, le processus d'apparition de l'état critique diffère un peu : le vent a pour effet de casser les grains et de réduire leur taille. Les grains déposés sont très proches (le vent « compacte » les grains) et le frittage apparaît très rapidement. Dans les premières heures, le dépôt peut garder un aspect friable, mais rapidement la neige se consolide. On observe (voir chap. 9) que le risque accidentel est maximal juste après l'épisode venteux²². La température influe également beaucoup sur la persistance des instabilités.

La compréhension du mode de rupture est moins claire que dans le cas d'une rupture par cisaillement le long d'une couche fragile. Il est probable qu'il s'agisse en tout premier lieu d'une propagation des contraintes de tension avec rupture au sein du manteau, suivie ensuite d'une rupture par cisaillement à la base de la plaque. Si cette dernière étape est impossible, la plaque se fissure sur le pourtour mais ne se met pas en mouvement. Des témoins ont en effet rapporté de telles fissurations sans déclenchement [26].

Dans le cas de départs spontanés, il semble que la reptation est suffisante pour mettre en tension la couche de neige critique. Dans le cas d'avalanche déclenchée, le passage d'un skieur est suffisant pour provoquer une tension qui se propage au

22. En janvier 1994, après le passage d'une courte dépression entraînant peu de précipitations (mercredi 27) sur le nord des Alpes mais caractérisée par des vents tempétueux en Savoie, le beau temps revient le jeudi (28 janvier). Le vendredi 29, un vent de nord-ouest commence à se lever avec violence et continue à souffler toute la journée du samedi 30 ; il cesse dès le lendemain et laisse place à un beau temps. Le samedi et le dimanche, on signale un certain nombre d'accidents mortels (10 morts en Savoie). Aucune avalanche n'a été signalée par la suite.

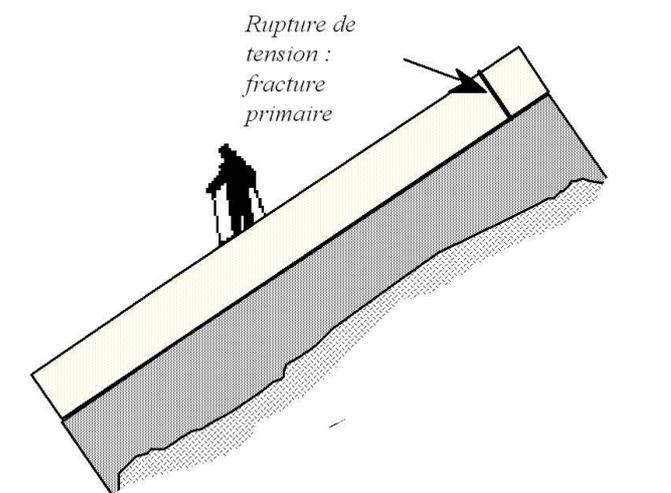


Figure 5.33 Le passage d'un skieur (composante tangentielle du poids) provoque une augmentation des tensions au sein de la couche superficielle, qui se tend (un peu à la manière d'un ressort). Pour contrebalancer la force imposée, la tension doit se propager sur de grandes distances.

travers du manteau neigeux : la couche superficielle est alors mise en tension comme un ressort. Si cette contrainte est localement trop grande, la strate se rompt à cet endroit. La fracture est perpendiculaire à la ligne de pente et peut être éloignée du skieur.

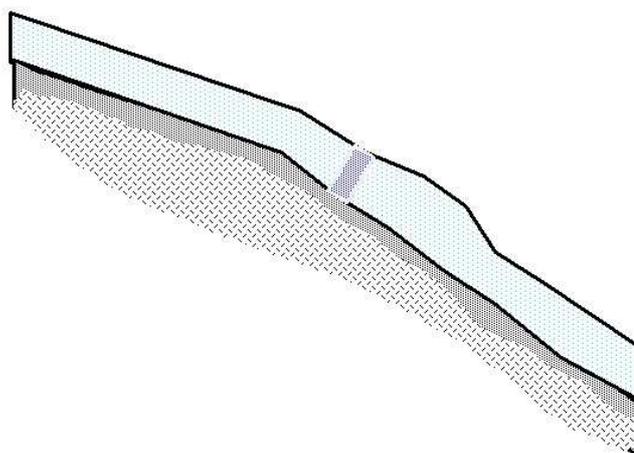


Figure 5.34 Un changement de pente implique une concentration de contraintes (tension) au sein de la couche superficielle ; préférentiellement ces zones sont des lieux de fracture. De plus associées à des dépôts de neige soufflée, elles sont souvent caractérisées par une variation de l'épaisseur des accumulations. La diminution d'épaisseur provoque également une augmentation locale de la tension. La concomitance de ces deux phénomènes explique le rôle important joué par les ruptures de pente dans les déclenchements d'avalanches.

Disparition de la cohésion

Une neige fraîche pulvérulente ou une neige détremnée (forte teneur en eau liquide) peuvent former des avalanches avec départ ponctuel. Le plus souvent, il s'agit de coulées de peu d'ampleur. Ainsi, dans les pentes soutenues, les skieurs déclenchent souvent de petites coulées superficielles sans importance. C'est la faiblesse de la cohésion qui limite l'extension de ces mouvements de neige. Sur une pente de déclivité suffisante (plus de 20°), une légère perturbation (chute d'une pierre, passage d'un skieur, pluie, etc.) met en mouvement un peu de neige, qui à son tour en glissant entraîne la neige dans le voisinage. Il y a ensuite réaction en chaîne (ou « effet boule de neige »). Ce type de mécanisme est similaire aux avalanches sur les tas de sable [39]. La coulée peut par la suite déclencher durant son écoulement une avalanche avec départ en plaque à cause de la surcharge qu'elle impose.

5.5 Dynamique de l'écoulement

On commence à parler d'écoulement dès que la phase de mise en mouvement de la neige s'achève. Cet écoulement peut prendre plusieurs formes : écoulement au sol (avalanche coulante), aérien (aérosol) ou un aérosol et une avalanche coulante (avalanche mixte). Les conditions de développement de l'une de ces formes résultent de l'interaction de plusieurs éléments :

- volume de neige engagée : l'ordre de grandeur varie de la centaine au million de m^3 ;
- nature de la neige : ce sont surtout la présence d'eau liquide et la température (air et neige) qui influent sur le comportement mécanique de la neige en mouvement ;
- configuration du terrain : forme, longueur de la zone de transit, nature de la surface de glissement (pour les avalanches de fond), déclivité sont les principaux facteurs à prendre en compte.

5.5.1 Avalanche coulante

Les qualités de neige rencontrées dans ce type d'écoulement sont très variables : neige sèche, neige légèrement humide ou très humidifiée, etc. Ainsi, la neige en mouvement peut se présenter sous la forme de grains, de pâte, de boules ou de mottes de neige. De plus le type de neige peut évoluer, surtout si la zone de transit présente une grande dénivellation (plus de 1000 m) ; une humidification de la neige en cours d'écoulement peut modifier son comportement.

On observe deux familles d'écoulements denses [40] :

- *écoulement partiellement fluidifié* : si l'on analyse le profil de vitesse au sein de l'écoulement, on remarque près de la surface de glissement une zone de cisaillement intense (au moins 10 cm d'épaisseur) où la vitesse augmente rapidement, puis au-dessus de laquelle la vitesse s'uniformise bien que l'on enregistre d'importantes fluctuations ;

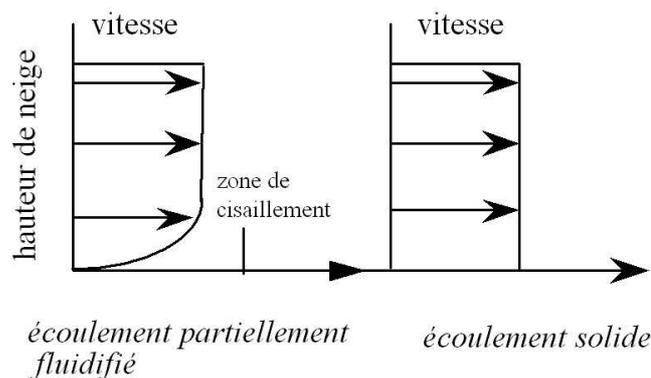


Figure 5.35 Les deux familles d'écoulements denses classés selon leur profil de vitesse.

- *écoulement « solide »* : l'écoulement ressemble au glissement d'un solide sur une pente ; le profil de vitesse est uniforme et sans trop de fluctuations.

De nombreux phénomènes, souvent encore mal compris, rendent particulièrement complexe l'étude mécanique de ce type d'avalanche : turbulence au sein de l'écoulement, transfert de neige entre le front, le corps et la queue de l'avalanche, transfert vertical (ségrégation entre grosses et petites particules), incorporation d'air dans le cas de neige sèche qui augmente la hauteur d'écoulement, etc. [40, 41, 42]. La hauteur et la vitesse maximales sont enregistrées au niveau du front, qui présente parfois un petit panache de neige en suspension. La vitesse dépasse rarement 30 m/s. La pression d'impact sur un obstacle dépend de la masse volumique et de la vitesse et on enregistre des pics de l'ordre de 1000 kPa (soit près de 100 tonnes par m²) [43, 44]. Elle atteint des valeurs encore plus fortes pour des phénomènes d'ampleur. L'arrêt de l'écoulement dense est surtout lié à la déclivité du terrain : au-dessous de 20°, l'écoulement ralentit considérablement et s'arrête. Il faut noter néanmoins que des écoulements pâteux (composés essentiellement de neige très humide dont la consistance rappelle celle du yaourt) peuvent parcourir des distances surprenantes. Si la masse de neige est insuffisante (coulée, petite avalanches), les frottements peuvent dissiper plus rapidement l'énergie cinétique et l'avalanche s'arrête rapidement même sur une pente soutenue (plus de 25°).

5.5.2 Aérosol

Une avalanche en aérosol est un écoulement turbulent résultant de la suspension de particules de neige dans l'air, il ressemble à un gros nuage de neige se déplaçant à très grande vitesse [45]. Il est précédé d'environ une centaine de mètres par un écoulement d'air (sans entraînement de cristaux) appelé *vent* ou *souffle* de l'avalanche. La pression de ce souffle est faible, de l'ordre 5 kN/m², mais peut être suffisant pour provoquer des dégâts (arbres, toitures, etc.). L'aérosol naît du brassage d'un écoulement dense, qui permet une mise en suspension des cristaux de glace. Dans le cas de neige poudreuse (particules reconnaissables), la plupart des auteurs pensent d'après leurs observations que l'avalanche doit atteindre une vitesse de 10 m/s pour que l'air puisse former un nuage de neige [42, 45]. D'autres estiment qu'un écoulement dense peut donner naissance à un aérosol, car sa surface libre peut être instable et parcourue par des *trains d'ondes* (roll waves) [42]. L'aérosol



Figure 5.36 Écoulement dense sur le site expérimental du col du Lautaret (Hautes Alpes). Cliché O. Marco.

est composé de plusieurs structures tourbillonnaires turbulentes qui se déplacent très rapidement (vitesse entre 30 et 100 m/s, voire plus) et croissent en volume (hauteur de plusieurs dizaines de mètres). La densité de neige au sein de l'aérosol est très variable. Il semble maintenant établi que la densité est d'autant plus forte qu'on s'approche du sol [45] ; on parle alors de *partie dense* de l'aérosol. C'est cette partie qu'on cherche à freiner, à dévier ou à arrêter lorsqu'on construit une digue de protection [46].

Le nuage de neige descend la pente tout en continuant son expansion aérienne sans être astreint à suivre le relief. Il peut même parcourir des distances horizontales ou remonter des pentes adverses. L'effet destructeur est lié à la violence et à l'étendue de l'aérosol (pression de l'ordre de 100 kN/m^2). Le processus d'arrêt n'est pas encore bien compris. Les étapes semblent être : la pente vient à faiblir (diminution des effets de gravité), l'aérosol n'est plus alimenté en neige (diffusion de neige entre le nuage et l'air ambiant), les particules en suspension commencent à sédimenter. Ce processus de sédimentation est très lent (plusieurs dizaines de minutes) et les témoins rapportent une impression de brouillard. Dans la phase d'arrêt, malgré un aspect spectaculaire, l'effet destructeur est très faible.

5.5.3 Avalanche mixte

Il s'agit d'un écoulement composé d'une partie dense sur laquelle se développe un aérosol. C'est une forme fréquente dans des avalanches d'ampleur, où la vitesse de l'importante masse de neige mobilisée autorise la mise en suspension d'une partie de la neige en mouvement. Les effets peuvent être alors particulièrement destructeurs.

Bibliographie

- [1] R. de Quervain, *Avalanche Atlas* (1981, Unesco, Paris) 265 p.
- [2] C. Ancey et C. Charlier, « Quelques réflexions autour d'une classification des avalanches », *Revue de Géographie Alpine* **84** (1996) 9–21.
- [3] A. Lunn, *Le ski en hiver, au printemps, sur les glaciers* (1924, Librairie Dardel, Chambéry).
- [4] A. Allix, « Les avalanches », *Revue de Géographie Alpine* **13** (1925) 359–419.
- [5] F. Valla, *Ski et Sécurité* (1991, Glénat, Grenoble) 128 p.
- [6] W. Munter, *Le risque d'avalanche* (1992, Club Alpin Suisse, Bern) 200 p.
- [7] C. Ancey et M. Naaim, « Modelisation of dense avalanches », *Comptes rendus Université européenne d'été sur les risques naturels*, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 173–182.
- [8] P. Cogoluenhes, « L'avalanche des Favrandes du 16 mai 1983 », Rapport interne (1983, Direction Départementale de l'Agriculture (Savoie), Services RTM, 282/PC/MM).
- [9] S. G. Evans, « The field documentation of highly mobile rock and debris avalanches in the Canadian Cordillera » *Comptes rendus International workshop on rapid gravitational mass movements*, Grenoble, coordonné par L. Buisson et G. Brugnot (1993, Cemagref, Grenoble), pp. 73–76.
- [10] B. Salm, A. Burkard et H. Gübler, « Berechnung von Fließlawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen », Rapport interne 47 (1990, Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos).
- [11] B. Lackinger, « Stability and fracture of the snow pack for glide avalanches » *Comptes rendus Avalanche formation, movement and effects*, Davos, (1987, IAHS) 229-241.
- [12] F. Berger, *Rôle de protection des forêts*, Thèse de doctorat ENGREF (1997) à soutenir.
- [13] V. de Montmollin, *Introduction à la rhéologie de la neige*, Thèse de doctorat Joseph Fourier (1978)
- [14] B. Salm, « Mechanical properties of snow », *Reviews of Geophysics and Space Physics* **20** (1982) 1–19.
- [15] J. Martzolf et E. Pahaut, « Attention... L'échelle de risque d'avalanche a changé », *Neige et Avalanche* **64** (1993) 11–13.
- [16] D. M. Mc Clung et P. A. Schaerer, *The avalanche handbook* (1993, The Mountaineers, Seattle).
- [17] L. Rey, « Les chutes de neige catastrophiques et leurs conséquences », *Neige et Avalanches* **59** (1992) 10–16.

- [18] C. Charlier, « Le risque en montagne, définir le risque, le risque négocié » Comptes rendus *Séminaire Futur Antérieur* du 21 avril 1994, Paris.
- [19] H. Conway et C.F. Raymond, « Snow stability during rain », *Journal of Glaciology* **39** (1993) 635–642.
- [20] E. Brun et L. Rey, « bilan de la campagne de mesures mécaniques de la neige effectuée sur le terrain durant l’hiver 1984-85 », Rapport interne 199 (1985, Centre d’Étude de la neige, Grenoble).
- [21] M. De Quervain et R. Meister, « 50 years of snow profiles on the Weissfluhjoch et relations to the surrounding avalanche activity », in *Avalanche formation, movement and effects*, Davos, (1987, IAHS) 161–183.
- [22] Gendarmerie nationale, procès verbal 17 (1987, PGHM de Grenoble).
- [23] P. M. B. Föhn, « The stability index and various triggering mechanisms » Comptes rendus *Avalanche formation, movement and effects*, Davos, (1987, IAHS) 195–206.
- [24] K. F. Voitkovskiy, « Snow cover stability on slopes et avalanches dynamics » Comptes rendus *Avalanche formation, movement and effects*, Davos, (1987, IAHS) 337–351.
- [25] J. B. Jamieson et C. D. Johnston, « Shear frame stability parameters for large-scale avalanche forecasting », *Annals of Glaciology* **18** (1993) 268–273.
- [26] IFENA, « Schnee und Lawinen in der Schweizern Alpen », Rapport interne 52–56 (1988-93, Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos).
- [27] D. M. Mc Clung, « Mechanics of snow slab failure from a geotechnical perspective » Comptes rendus *Avalanche formation, movement and effects*, Davos, (1987, IAHS) 475–507.
- [28] H. Gubler, « Measurements and modelling to improve our understating of avalanche formation » Comptes rendus *Université européenne d’été sur les risques naturels*, Chamonix, coordonné par G. Brugnot (1992, Cemagref) 89–98.
- [29] H. P. Bader et B. Salm, « On the mechanics of snow slab release », *Cold Regions Science et Technology* **17** (1990) 287–300.
- [30] B. Lackinger, « Supporting forces and stability of snow-slab avalanches, a parameter study », *Annals of Glaciology* **13** (1989) 140-1-45.
- [31] H. Gubler, « Determination of the mean number of bond per snow grain and of the dependence of the tensile strain of snow on stereological parameters », *Journal of Glaciology* **20** (1978) 329–341.
- [32] A. Duclos, *Contribution à l’étude de la localisation des plaques de neige sur un domaine skiable, conception d’un protocole d’observations et exploitation des résultats sur la saison 1992-93*, DEA Joseph Fourier (IGA) (1993).
- [33] B. Jamieson, *Avalanche prediction for persistent slabs*, Thèse de doctorat, Calgary (1995) Department of Civil Engineering.
- [34] R. I. Perla et M. Martinelli, *Avalanche Handbook* (1976, Department of Agriculture US, Fort Collins).
- [35] T. Daffern, *Avalanche Safety for Skiers & Climbers* (1992, Rocky Mountain Books, Calgary).
- [36] C. Rey, « La prévision du risque et les plaques », *Neige et Avalanches* **62** (1993) 24–27.
- [37] C. Ancey, « Avalanches, dangers réels et dangers perçus par le skieur », *Sommet* **2** (1994) 29–35.

- [38] A. Duclos, « Neige, vent et avalanches, quelques observations pour un meilleur diagnostic », *Neige et Avalanche* **64** (1993) 21–27.
- [39] P. Evesque et P. Porion, « Les avalanches », *Pour la Science*, (1993) 54–61.
- [40] H. Gubler, « Dense-flow avalanches, a discussion of experimental results and basic processes » Comptes rendus *International Workshop on rapid gravitational mass movements*, Grenoble, coordonné par L. Buisson et Gérard Brugnol(1993, Cemagref, Grenoble) 127–126.
- [41] P. A. Schaerer, « Friction coefficients and speed of flowing avalanches » Comptes rendus *Symposium Mécanique de la Neige*, Grindelwald (1974, IAHS) 425–432.
- [42] E. J. Hopfinger, « Snow avalanche motion and related phenomena », *Annual Review of Fluid Mechanics* **15** (1983) 45–76.
- [43] V. M. Koklyakov, B. N. Rzhevskii et V. A. Smoilov, « The dynamics of avalanches in the Khibins », *Journal of Glaciology* **19** (1977) 431–439.
- [44] E. R. La Chapelle, « Snow avalanches: a review of current research and applications », *Journal of Glaciology* **19** (1977) 313–324.
- [45] P. Beghin et X. Olagne, « Experimental and theoretical study of the dynamics of powder snow avalanches », *Cold Regions Science et Technology* **19** (1991) 317–326.
- [46] A. Auge, F. Ousset et O. Marco, « Effet d’une digue sur l’écoulement d’un aérosol » Comptes rendus *Les apports de la recherche scientifique à la sécurité neige, glace et avalanche*, Chamonix, coordonné par F. Sivardière (1995, Cemagref) 235–240.

