

LE DÉCLENCHEMENT DES AVALANCHES DE PLAQUE

Pascal HAGENMULLER ;

Météo-France - CNRS, CNRM/Centre d'Etudes de la Neige

L'immense majorité des accidents d'avalanche en randonnée et hors-piste est causée par des avalanches de type plaque. Ce dossier présente diverses contributions pour mieux comprendre et caractériser ce type de déclenchement et évaluer sa probabilité d'occurrence. Pour comprendre comment un skieur peut déclencher le mouvement de plusieurs dizaines à centaines de tonnes de neige, nous nous intéressons d'abord au mécanisme de rupture entraînant le départ d'une plaque et aux "ingrédients" nivologiques nécessaires à sa formation. Nous voyons ensuite comment exploiter les tests de stabilité pour évaluer localement le degré d'instabilité du manteau neigeux. Enfin, des clés de lecture du bulletin d'estimation du risque d'avalanche sont proposées via un glossaire. Des idées fausses sur les plaques sont également passées en revue. Pour finir, des statistiques sur l'accidentologie des avalanches de plaque apporte des éléments concrets sur ce risque bien réel. Dossier coordonné par Pascal Hagenmuller, avec les contributions de J. Gaume, A. van Herwijnen, D. Goetz et F. Jarry.

I. MÉCANISMES DE DÉCLENCHEMENT

Notre connaissance des processus menant au déclenchement d'une avalanche de plaque s'est améliorée durant la dernière décennie. Nous présentons ici des éléments clés pour comprendre ce phénomène, tels ceux proposés par la communauté scientifique internationale, notamment lors du dernier colloque de l'ISSW (International Snow Science Workshop, Colorado, USA, 2016). Cet article n'est pas un traité de nivologie pratique (voir revue n°147 d'octobre 2014) mais une explication mécanique du déclenchement.

Le déclenchement d'une avalanche de plaque de neige résulte de la perte d'équilibre du manteau neigeux sur une pente. Cet équilibre est instable car une petite perturbation mécanique, comme une surcharge ponctuelle et brutale (par ex. skieur) ou distribuée et progressive (par ex. chute de neige), peut entraîner le glissement d'une masse de neige très importante. Le déclenchement résulte d'une série de ruptures mécaniques dans le manteau neigeux (Schweizer et al., 2016) :

- l'initiation d'une rupture dans une couche fragile sous une plaque relativement cohésive (Fig. 1),
- la propagation de cette rupture dans la couche fragile (Fig. 2),
- la rupture en traction de la plaque et le glissement de la plaque dans la pente (Fig. 4).

A) INITIATION DE LA RUPTURE

Général. La rupture de ponts entre grains de neige dans la couche fragile constitue la première étape du déclenchement d'une avalanche de plaque (Fig. 1a et 1b). Un pont rompt si la contrainte (force/surface) appliquée excède sa résistance mécanique. Une fois rompu, il ne supporte plus la contrainte due au poids

de la plaque qui est alors répartie sur les ponts voisins intacts. Ces ruptures à l'échelle du dixième de millimètre peuvent éventuellement « s'organiser » pour former une fissure de taille macroscopique dans la couche fragile, à l'échelle de dizaines de centimètres (Fig. 1c). Si cette fissure est suffisamment grande, elle se propagera ensuite d'elle-même.

Vitesse de déformation. L'initiation de la rupture diffère selon que le déclenchement est spontané ou provoqué, car les vitesses de déformation impliquées sont distinctes. Dans le cas d'un déclenchement spontané lié à une augmentation progressive de la charge (par ex. chute de neige, transport de neige par le vent) et/ou la modification des propriétés physiques internes du manteau neigeux (par ex. métamorphisme), les déformations sont lentes et le passage d'une rupture diffuse (Fig. 1b) à une fissure macroscopique (Fig. 1c) peut prendre de quelques minutes à plusieurs heures (Schweizer et al., 2016). Un chargement lent entraîne une déformation plastique de la glace qui n'est pas systématiquement suivie d'une rupture. Par ailleurs, les ponts cassés peuvent se ressouder par frittage (Narita, 1983). Même endommagée, la couche fragile peut donc toujours supporter une certaine contrainte, ce qui rend la formation d'une fissure macroscopique plus difficile. Dans le cas d'un déclenchement provoqué, par exemple par le passage d'un skieur, l'incrément de chargement est rapide et entraîne une rupture soudaine : les ponts cassent et ne supportent plus aucune contrainte. De plus, les ruptures se concentrent sous le skieur et sont donc rapidement « organisées » en une fissure macroscopique.

Direction de chargement. L'initiation de la rupture est liée au poids de la plaque auquel s'ajoute éventuellement une surcharge ponctuelle. La contrainte



supportée par la couche fragile est mixte, c'est-à-dire constituée d'une composante en compression et d'une composante en cisaillement (Fig. 1a). L'écrasement vertical de la couche fragile (Fig. 1c) est aujourd'hui perçu comme une conséquence d'une rupture en mode mixte (Schweizer et al., 2016) et non pas comme un mode de rupture (Heierli et al., 2008). En effet, la composante en cisaillement est le plus souvent responsable de la rupture car la résistance au cisaillement des types de neige composant les couches fragiles (par ex. faces planes) est significativement plus faible que celle en compression (Reiweger et al., 2015). Ainsi, même si une initiation de la rupture en compression sur le plat est possible, elle est généralement plus facile en cisaillement dans une pente.

B) PROPAGATION DE LA FISSURE

Général. La fissure macroscopique, si elle atteint une taille suffisamment importante, appelée taille critique, peut se propager parallèlement à la pente dans la couche fragile. C'est la deuxième étape du processus de déclenchement. La contrainte de cisaillement/compression induite par le poids des couches de neige ne peut être supportée par la couche fragile rompue, elle est par conséquent « transférée » à la partie intacte de la couche fragile à proximité, qui casse à son tour, et ainsi de suite (Fig. 2). Cette propagation est pilotée par le poids de la plaque et est indépendante du phénomène ayant entraîné l'initiation locale de la rupture. Les deux ingrédients indispensables de ce système mécanique sont : une couche fragile de faible résistance, qui peut rompre, et une plaque relativement cohésive, qui transmet la contrainte ne pouvant plus être supportée par la couche fragile endommagée.

Pour illustrer ce concept, on peut comparer ce phénomène à une chute de dominos placés les uns derrière les autres. Dans ce cas, la couche fragile est le fait qu'un domino placé à la verticale peut basculer facilement, la plaque correspond au fait que les dominos sont suffisamment proches les uns des autres pour que lors de leur chute, chacun d'eux touche son voisin. Si les domi-

nos sont collés à la table (= pas de couche fragile) ou s'ils sont trop éloignés les uns des autres (= pas de plaque), le phénomène en cascade n'a plus lieu.

Taille critique. Il est impossible de mesurer quelle taille critique de fissure a effectivement entraîné le départ d'une avalanche. Le test de propagation à la scie (PST, voir revue n° 125 d'avril 2009) permet d'estimer à partir de quelle longueur une fissure réalisée à la scie va se propager dans un bloc de neige prédécoupé et de comparer la propension à la propagation pour différents manteaux neigeux. Les longueurs typiques obtenues par PST se situent entre 15 cm et 65 cm (Reuter et al., 2016). Comparées à l'endommagement potentiel d'un skieur se déplaçant dans une pente, ces longueurs semblent petites et donnent l'impression que la taille critique est toujours atteinte pour un déclenchement provoqué par un skieur. Néanmoins, les conditions de mesure de la taille critique par PST, notamment la fissure « épaisse » créée par la scie et la découpe latérale du bloc, facilitent la propagation d'une fissure. Les modélisateurs estiment que la longueur caractéristique de la taille critique pour une avalanche est de l'ordre du mètre (Gaume et al., 2016).

Direction et vitesse de propagation. La fissure se propage indifféremment dans toutes les directions dans la couche fragile (pour un manteau spatialement uniforme). Ainsi, un skieur ayant provoqué l'initiation de la rupture peut se retrouver « au milieu » de la plaque et donc potentiellement, en fonction de la pente, dans la zone de neige mise en mouvement. Cette caractéristique rend les avalanches de plaque particulièrement dangereuses puisque le skieur est souvent emporté par l'avalanche qu'il déclenche, contrairement aux départs ponctuels dits « en poire » où le skieur ayant déclenché l'avalanche se situe très généralement en amont de la neige mise en mouvement. La vitesse de propagation a été estimée de l'ordre de 20 m/s lors du déclenchement (Johnson et al., 2004) et sur le PST (van Herwijnen et al., 2016).

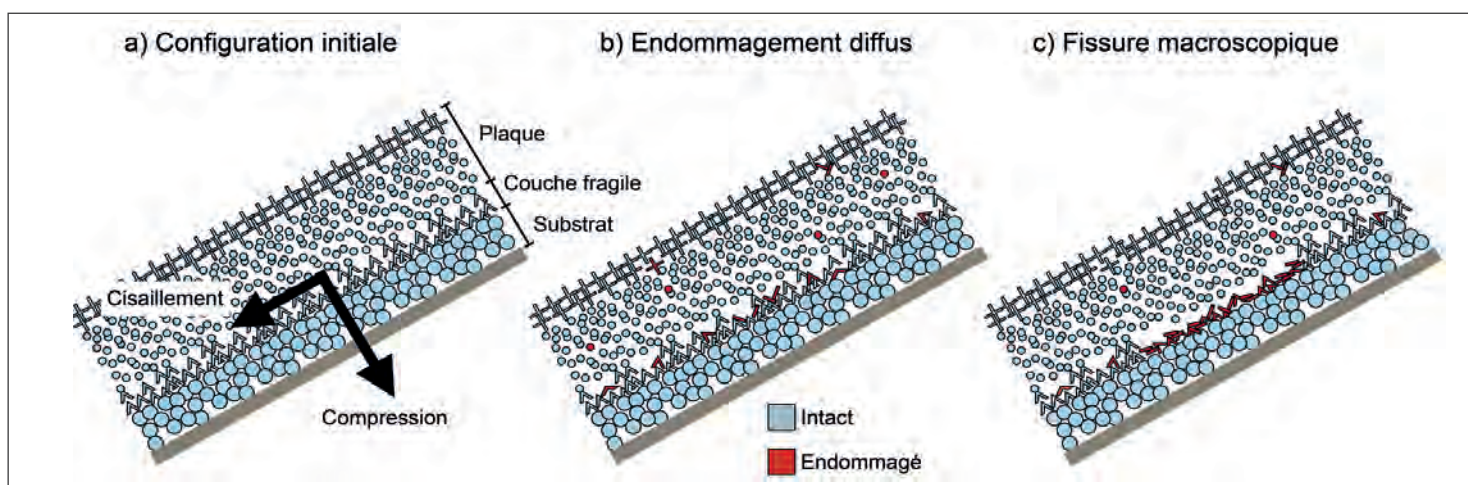


Figure 1 : initiation de la rupture dans la couche fragile. La couche fragile est soumise à une contrainte mixte en cisaillement et en compression (a). Cette contrainte entraîne la rupture des ponts les moins résistants (b), qui peut éventuellement aboutir à la formation d'une fissure macroscopique (c). Dans le cas d'une surcharge localisée, comme le passage d'un skieur, la formation de la fissure macroscopique sera rapide alors que sa formation sera plus lente pour un déclenchement spontané. L'échelle des grains et de la plaque n'est pas respectée.

Whumpf. La propagation de la rupture de la couche fragile et son effondrement subséquent créent un déplacement d'air, reconnaissable par un bruit caractéristique, le « whumpf » (selon la terminologie anglaise ; à prononcer « woumpf »). Ce bruit est un indicateur typique d'un manteau neigeux instable à structure de plaque.

Arrêt de la propagation. La rupture en traction/flexion de la plaque stoppe la propagation en amont de la rupture dans la couche fragile, car la plaque ne joue alors plus son rôle de transfert de la contrainte (Fig. 3). Une plaque de trop faible résistance en traction ne permettra donc pas de propager la rupture de la couche fragile. L'arrêt peut également être dû à un changement des propriétés du manteau neigeux, par exemple la non continuité de la couche fragile. La rupture en traction peut alors résulter de la fin de la propagation de la rupture dans la couche fragile. D'une manière générale, la rupture dans la couche fragile peut se propager sur des centaines de mètres, voire plus.

C) RUPTURE EN TRACTION ET GLISSEMENT DANS LA PENTE

Général. La dernière étape du déclenchement est la rupture en traction de la partie amont de la plaque, qui produira, s'il y a glissement, la « cassure linéaire » (Fig. 4). La plaque se détache alors complètement du reste du manteau neigeux retenue dans la pente uniquement par des forces de friction dans la couche fragile détruite entre le bas de la plaque et le substrat. Ces forces de friction se révélant insuffisantes pour retenir la plaque, celle-ci se met à glisser dans la pente.

Angles de frottement. Les angles de frottement dynamique mesurés (la plaque accélère si l'angle de pente est supérieur à l'angle de frottement) varient entre 18° et 41°, avec une médiane de 30° (van Herwijnen et al., 2016). Ces valeurs sont cohérentes avec les statistiques d'accidents, qui montrent que l'immense majorité des déclenchements de plaques sèches se produisent dans des pentes > 30° (McClung and Schaerer, 2006). Cet angle augmente avec la différence de dureté entre la plaque et le substrat : il est plus élevé pour des plaques tendres glissant sur un substrat dur (van Herwijnen et al., 2016).

Déclenchement à distance. La présence d'une pente assez forte est indispensable dans cette étape du déclenchement, alors qu'elle n'est pas nécessaire pour initier

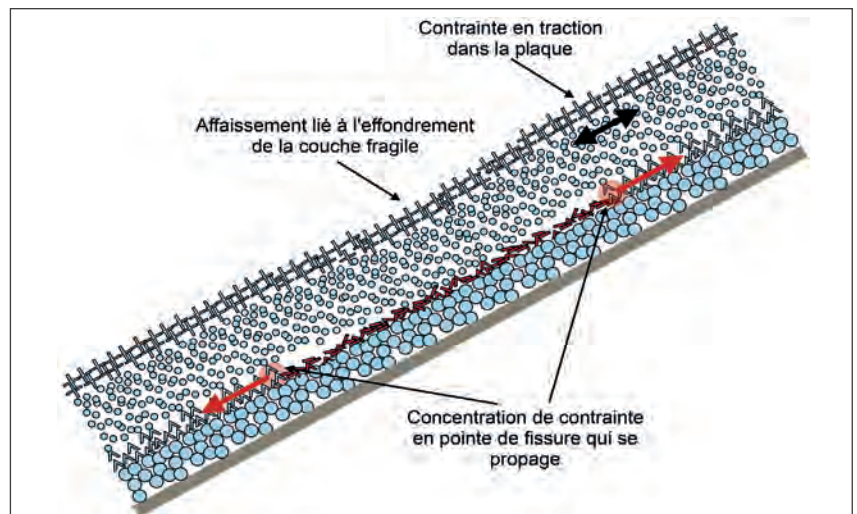
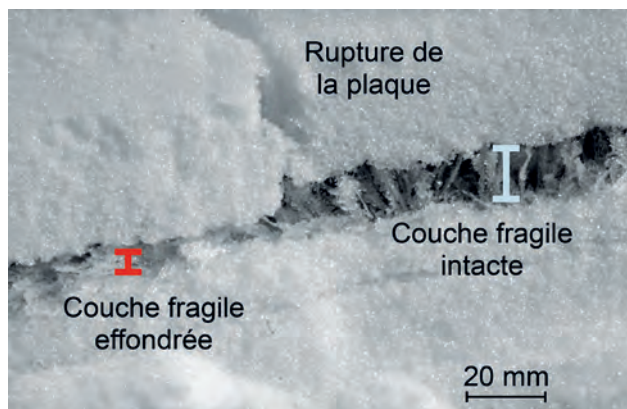


Figure 2 : propagation d'une fissure dans la couche fragile. Pour avoir propagation, il faut que la fissure soit de taille supérieure à la taille critique.

et propager une rupture dans la couche fragile. Cette particularité explique les déclenchements à distance : le skieur initie une rupture dans la couche fragile sur du plat ou une faible pente, cette rupture se propage ensuite suffisamment loin jusqu'à une pente d'au moins 30°, puis la plaque glisse, uniquement dans cette zone pentue, tandis que rien d'apparent ne se passe à proximité du skieur, sauf un possible « whumpf » (voir ci-avant) et un possible affaissement de la surface de la neige de quelques millimètres.

II. CLASSIFICATION DES CONFIGURATIONS COUCHE FRAGILE / PLAQUE

Un départ de type plaque requiert deux éléments : une couche fragile et, au-dessus, une plaque relativement cohésive. L'ensemble de ces deux éléments est appelé structure de plaque. Ces éléments peuvent être de différentes natures selon les conditions météorologiques (Fig. 5).

La couche fragile est une couche de neige de faible résistance située à l'intérieur du manteau neigeux. Le fait qu'une fois cassée, la couche fragile ne supporte presque plus aucune contrainte semble également être une condition nécessaire à son « bon » fonctionnement. On distingue les couches fragiles persistantes et non persistantes (Fig. 5a). Les couches fragiles persistantes sont le plus souvent composées de grains anguleux (faces planes, gobelets). Ces grains se forment par métamorphose de gradient. Ces couches sont dites persistantes car elles évoluent très lentement dans le temps et peuvent subsister parfois tout au long d'une saison. Par exemple, la neige tombée en début de saison dans les versants nord subit généralement

← **Figure 3 :** exemple d'arrêt de la propagation de la fissure dans la couche fragile et de rupture de la plaque. La couche fragile est ici composée de givre de surface. Crédit photo : Jamieson and Schweizer (2000).

un fort gradient thermique (faible épaisseur de neige, surface de la neige très froide, longue durée) et peut se transformer en une couche fragile pour le reste de la saison. Parmi les couches fragiles persistantes, on peut ajouter le givre de surface, qui semble cependant être plus rarement impliqué dans les accidents en France. Quelques très rares cas impliquent des couches fragiles de type neige roulée. Les couches fragiles non persistantes sont constituées de neige récente légère. Elles apparaissent lors de chutes de neige sans vent. Ces couches évoluent rapidement dans le temps par tassement mécanique et métamorphose d'isothermie : elles gagnent en résistance mécanique en quelques heures (de l'ordre de 48 h au maximum) et ne jouent alors plus leur rôle de couche fragile.

La plaque est une couche de neige, dont le poids et la cohésion supérieure à celle de la couche fragile, sont nécessaires à la propagation de la rupture dans la couche fragile. On distingue les plaques friables et les plaques dures (Fig. 5b). Les plaques friables sont constituées majoritairement de neige de type particules reconnaissables. Elles sont d'apparence poudreuse et se forment généralement lorsque les conditions atmosphériques changent sensiblement durant la chute de neige ou peu après : un peu de vent passager et/ou une remontée de la température. Dans ces conditions, une neige légèrement cohésive (la plaque) se dépose au dessus d'une neige plus légère (la couche fragile). La différence de résistance mécanique entre une plaque friable et une couche fragile non persistante est très peu marquée ; elle ne peut donc pas être détectée par des tests d'enfoncement simples (test du bâton ou sonde de battage). Les plaques dures sont constituées de grains fins présentant une cohésion élevée. La plaque part alors en blocs qui se désagrègent difficilement.

III. RÔLE DE LA PLAQUE DANS L'INITIATION ET LA PROPAGATION DE LA RUPTURE DANS LA COUCHE FRAGILE

La facilité à initier et propager une rupture dans la couche fragile dépend des propriétés mécaniques de la couche fragile, du poids de la plaque mais aussi de ses propriétés mécaniques. Ce dernier point, détaillé ci-après, n'a fait l'objet d'attention de la part des scientifiques que depuis quelques années.

Figure 5 : types de couches fragiles (a) et de plaques (b) et types de neige associés. Échelle : la largeur typique des photographies de grains est de 10 mm. Crédit photo : Météo-France/CEN. ➔

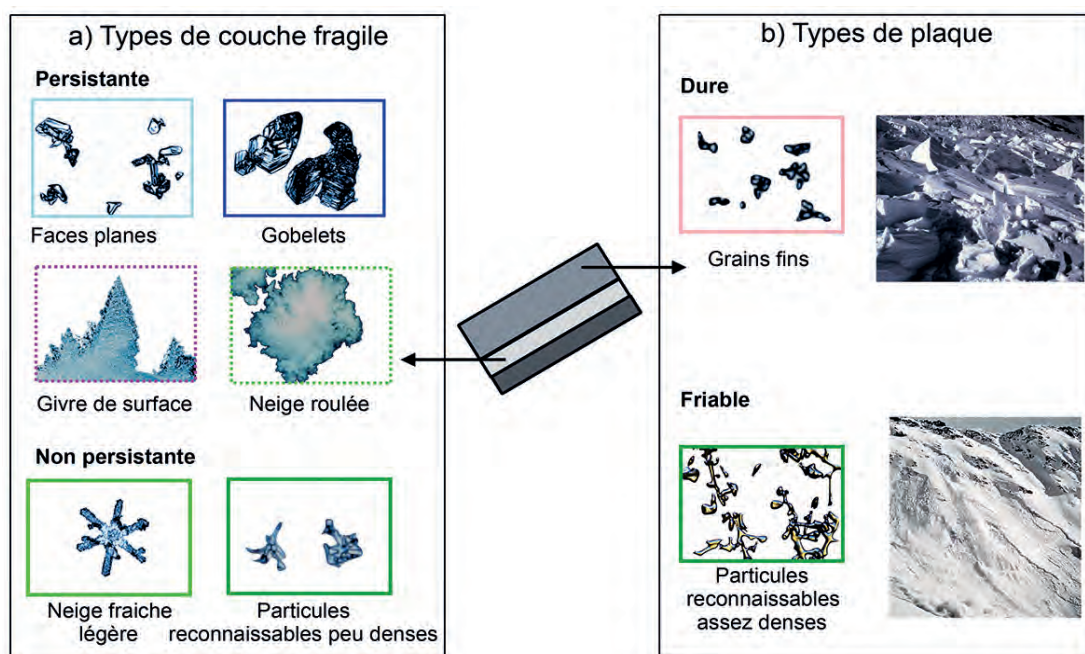


Figure 4 : rupture en traction de la plaque et glissement dans la pente.

Le poids d'un skieur crée une surcharge ponctuelle en surface du manteau neigeux qui va se propager jusqu'au sol en s'étalant et en diminuant d'intensité. Cette surcharge pourra éventuellement initier une rupture dans la couche fragile. La figure 6a montre comment la contrainte de cisaillement additionnelle induite par cette surcharge se propage en profondeur dans le manteau neigeux. Cette contrainte diminue avec la profondeur et la distance latérale au skieur. En faisant une hypothèse de stratification homogène, on peut appliquer les relations mathématiques de Boussinesq et montrer que la variation de la contrainte maximale de cisaillement est inversement proportionnelle à la profondeur (par ex. Modèle MEPRA, CEN). En conséquence, plus la plaque sera épaisse, plus il sera difficile d'initier une rupture. Il y a néanmoins des déviations à cette relation dans le cas de vrais manteaux neigeux, dont la dureté des couches varie verticalement. La modélisation numérique permet d'étudier ce phénomène sur différentes stratigraphies modèles (Habermann et al., 2008; Hagenmuller et al., 2016).

Il a ainsi notamment été montré que la présence de couches dures dans la plaque va réduire la contrainte induite (au max. d'environ -50% par rapport à un manteau homogène) par le skieur, tandis que la présence de couches dures immédiatement en dessous de la couche fragile va l'augmenter (au max. de + 50%) (Fig. 6b et 6c). Cette modélisation ne prend toutefois pas en compte l'enfoncement du skieur dans les couches tendres de surface, qui, s'il est pris en compte, renforce l'effet stabilisateur des couches dures en surface.

La longueur critique de fissure dans la couche fragile représente sa facilité de propagation. Une longueur faible correspond à une propagation facile, une longueur élevée à une propagation difficile, voire impossible. Cette longueur croît avec la rigidité de la plaque et la cohésion de la couche fragile. Elle décroît quand la contrainte liée au poids des couches supérieures augmente (Gaume et al., 2016 ; Schweizer et al., 2016).

Il est assez intuitif de comprendre que la propagation est plus aisée quand la couche fragile est peu résistante et que la plaque appuie fort dessus. Pour la rigidité, c'est plus compliqué. Il faut imaginer qu'une plaque plus rigide va répartir la force non supportée par la couche fragile sur une plus grande surface de couche fragile intacte, qui sera par conséquent moins sollicitée. Il faut néanmoins rappeler que la rupture en traction de la plaque stoppe la rupture dans la couche fragile et qu'une couche de faible rigidité est généralement peu résistante à la traction. Ainsi, le début de propagation dans une plaque friable sera plus aisé que dans une plaque dure mais pourra s'arrêter rapidement du fait d'une rupture en traction plus précoce ■

Suite du dossier →

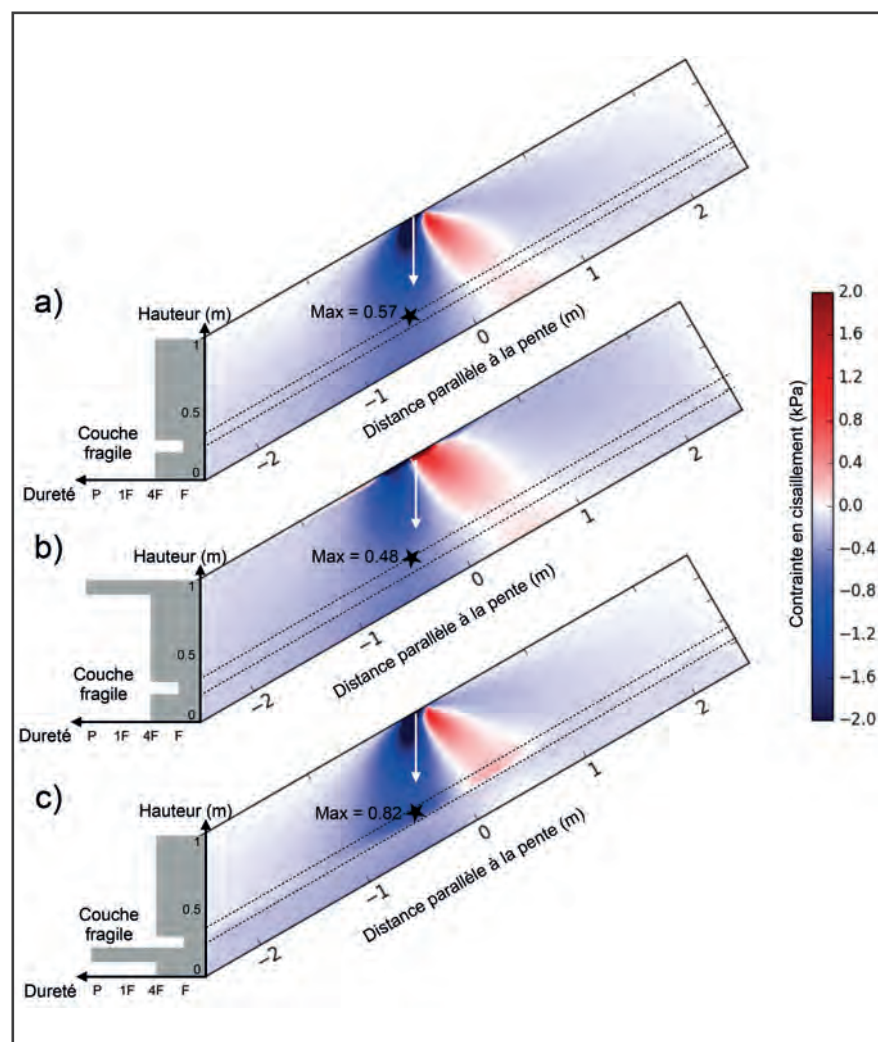


Figure 6 : distribution de la contrainte de cisaillement due à une surcharge ponctuelle appliquée en surface (flèche blanche) pour différentes stratigraphies modèles : a) manteau homogène, b) manteau avec une croûte en surface, c) manteau avec une croûte juste en dessous de la couche fragile. L'étoile indique la position du maximum de contrainte absolue dans la couche fragile. Une croûte en surface, en distribuant la contrainte sur une zone plus étendue, diminue la contrainte maximale supportée par la couche fragile. Une croûte située en dessous de la couche fragile a un effet opposé.

Références :

- Gaume, J., A. van Herwijnen, G. Chambon, N. Wever, and J. Schweizer, 2016: Critical length for the onset of crack propagation in snow: reconciling shear and collapse. International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 457-465.
- Habermann, M., J. Schweizer, and J. B. Jamieson, 2008: Influence of snowpack layering on human-triggered snow slab avalanche release. Cold Regions Science and Technology, 54, 176-182.
- Hagenmuller, P., T. Pilloix, and Y. Lejeune, 2016: Inter-comparison of snow penetrometers (ramsonde, Avatech SP2 and SnowMicroPen) in the framework of avalanche forecasting. International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 32-38.
- Heierli, J., P. Gumbsch, and M. Zaiser, 2008: Anticrack Nucleation as Triggering Mechanism for Snow Slab Avalanches. Science, 321, 240-243.
- Johnson, B. C., J. B. Jamieson, and R. R. Stewart, 2004: Seismic measurement of fracture speed in a weak snowpack layer. Cold Regions Science and Technology, 40, 41-45.
- Schaerer, P., and D. McClung, 2006: The Avalanche Handbook, 2006 The Mountaineers Books, Ed. 342 pp.
- Narita, H., 1983: An experimental study on tensile fracture of snow. Contributions from the Institute of low temperature science, 32, 1-37.
- Reiweger, I., J. Gaume, and J. Schweizer, 2015: A new mixed-mode failure criterion for weak snowpack layers. Geophysical Research Letters, 42, 1427-1432.
- Reuter, B., A. van Herwijnen, and J. Schweizer, 2016: Observer independent measures of snow instability. International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 397-404.
- Schweizer, J., B. Reuter, A. van Herwijnen, and J. Gaume, 2016: Avalanche Release 101. International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 1-11.
- Van Herwijnen, A., E. H. Bair, K. W. Birkeland, B. Reuter, R. Simenhois, J. B. Jamieson, and J. Schweizer, 2016: Measuring the mechanical properties of snow relevant for dry-snow slab avalanche release using particle tracking velocimetry. International Snow Science Workshop, Breckenridge, Colorado, USA, 397-404.

LES TESTS DE STABILITÉ À LA LOUPE

Johan GAUME, Alec VAN HERWIJNEN ;
WSL Institut pour l'Étude de la Neige et des Avalanches SLF,
Davos, EPFL École Polytechnique Fédérale de Lausanne

Les tests de stabilité permettent d'identifier relativement rapidement les couches fragiles du manteau neigeux ainsi qu'évaluer leur stabilité. Ici, nous donnons un aperçu du test de compression (CT), le test de compression étendu (ECT) et le bloc glissant (RB).

PROCÉDURE

Dans un premier temps, il faut dégager un bloc de neige d'environ 1 m de haut, de section carrée ou rectangulaire (Tab. 1). Il est important de bien isoler les parois latérales (côtés gauche, droit et amont) du reste du manteau neigeux, soit à l'aide d'une scie, d'une cordelette ou à la pelle. Afin de tester la stabilité des couches, on va ensuite graduellement charger le manteau neigeux. Dans le CT (Fig. 1a) et le ECT (Fig. 1b), on va poser la pelle à plat sur le bloc et taper dessus : i) 10 fois à partir du poignet, ii) 10 fois à partir du coude, iii) 10 fois à partir de l'épaule. Si une cassure se produit, on note le nombre de coups, on observe la cassure et on enlève la partie au-dessus de celle-ci pour continuer la procédure sur le reste du bloc. Dans le RB (Fig. 1c), une personne à ski charge le bloc. Les degrés de charge progressive sont : 1) en creusant ou en sciant, 2) en montant sur le bloc avec les skis, 3) en faisant des flexions (trois fois), 4) au premier saut avec les skis depuis le haut, 5) au deuxième ou troisième saut avec les skis depuis le haut, 6) en sautant sans skis depuis le haut ou 7) pas de déclenchement du bloc.

RÉSULTATS ET INTERPRÉTATION

Le score : indice d'initiation. Le score correspond à la surcharge donnée au moment de la rupture. Par exemple, une rupture dans un CT ou ECT observée après dix coups à partir du poignet plus deux coups à partir du coude donne un score de douze. Pour le RB, une rupture observée au deuxième saut avec les skis depuis le haut donne un score de cinq.

En général, plus le score est élevé, plus la probabilité de déclenchement d'une avalanche par un skieur diminue (Fig. 2). De plus, de manière globale le score augmente avec la profondeur de la rupture. Du point de vue du skieur, il est donc moins probable d'initier une rupture dans les couches profondes qu'en surface. Un skieur a

Test	Largeur	Profondeur (en amont)
CT	30 cm	30 cm
ECT	90 cm	30 cm
RB	200 cm	150 cm

Tab. 1 : Les dimensions du bloc de neige à isoler dans les différents tests de stabilité.



← Figure 1 : les tests de stabilité en action :

a) le test de compression (CT). Une couche épaisse de gobelets enfouie sous 60 cm de neige s'effondre après 11 coups. Crédit photo : SLF



← b) le test de compression étendu (ECT). La rupture initiée dans la couche fragile s'est propagée jusqu'au bout opposé du bloc. Crédit photo : SLF



← c) le test du bloc glissant. Le premier saut avec les skis depuis le haut. Crédit photo : SLF

Test	Initiation	Propagation	Plutôt instable	Plutôt stable
CT score CT surface de rupture	Oui Non	Non Indirect	< 14 SP, SC	≥ 14 autre
ECT score ECT surface de rupture	Oui Non	Non Oui	< 14 ECTP	≥ 14 Autre
RB score RB surface de rupture	Oui Non	Non~ Oui	< 4 bloc entier	≥ 4 autre

Tab. 2 : Les informations données par les tests de stabilité Adapté de Schweizer et Jamieson (2010)

typiquement une influence jusqu'à 80 cm de profondeur au maximum. Ainsi, il vaut parfois mieux beaucoup de neige que peu de neige. Par contre, attention, si la probabilité d'initiation d'une rupture diminue avec l'épaisseur de neige, la taille potentielle de l'avalanche quant à elle, augmente !

La qualité et la surface de la rupture : indice de propagation. Le score d'un test de stabilité nous informe sur la probabilité d'initier une rupture. En revanche, le score ne nous indique pas le potentiel de la rupture à se propager sur de grandes distances. Si la surface de rupture est très nette et lisse (SP : sudden planar) ou si la rupture est accompagnée d'un effondrement visible (SC: sudden collapse), cette rupture est plus susceptible de se propager sur de longues distances. Au contraire, si la rupture est très rugueuse (RP : resistant planar) et/ou si le bloc supérieur se brise (B : non planar break), alors la rupture se propagera probablement moins bien. La qualité de la surface de rupture dans un CT est donc toute aussi importante que le score car elle contient une information indirecte sur la propagation. Le ECT et le RB nous permettent d'aller plus loin et d'obtenir une information plus directe sur la propagation. En effet, ces tests nous donnent une information complémentaire, à savoir si la rupture s'est propagée ou non sur toute la surface du bloc (ETCP : ECT avec propagation ; RB bloc entier). Par exemple, une rupture partielle du bloc (sous les skis) au premier saut avec les skis sur le bloc glissant (RB 4) n'est peut-être pas aussi critique qu'un RB 4 avec une rupture complète du bloc.

Interprétation des résultats : initiation et propagation. Pour déclencher une avalanche, il faut non seulement initier une rupture dans une couche fragile enfouie dans le manteau neigeux, mais il faut aussi que cette rupture initiale se propage sur une grande distance. L'interprétation des résultats de tests de stabilité doit donc être faite dans ce contexte et, pour chaque test, des critères différents existent pour classer le manteau neigeux comme plutôt stable ou plutôt instable (Tab. 2)

VALIDITÉ ET VARIABILITÉ SPATIALE

Nous savons que le manteau neigeux est très variable d'un point à un autre. Ainsi, le score d'un test de stabilité doit être interprété avec précaution. Par exemple, il faudrait faire la moyenne sur au moins 3 tests de compression pour que les résultats soient aussi fiables que le test du bloc glissant réalisé sur une surface beaucoup plus grande. Cependant, si les propriétés mécaniques

comme par exemple, la résistance au cisaillement sont très variables, la stratification du manteau neigeux est quant à elle assez représentative à l'échelle de la pente. Par conséquent, l'existence et les caractéristiques de la rupture (rugosité, type de grains) sont plus fiables que le score lui-même.

Les tests de stabilité ne sont pas infaillibles et ne représentent qu'une pièce du puzzle. Des décisions concernant la stabilité du manteau neigeux ne doivent donc pas reposer uniquement sur les résultats de ces tests (Schweizer and Jamieson, 2010) ■

Références

- Jamieson, J. B. (1999). The compression test-after 25 years. *The Avalanche Review*, 18(1), 10-12.
- Schweizer, J., & Jamieson, J. B. (2010). Snowpack tests for assessing snow-slope instability. *Annals of Glaciology*, 51(54), 187-194.

Suite du dossier →

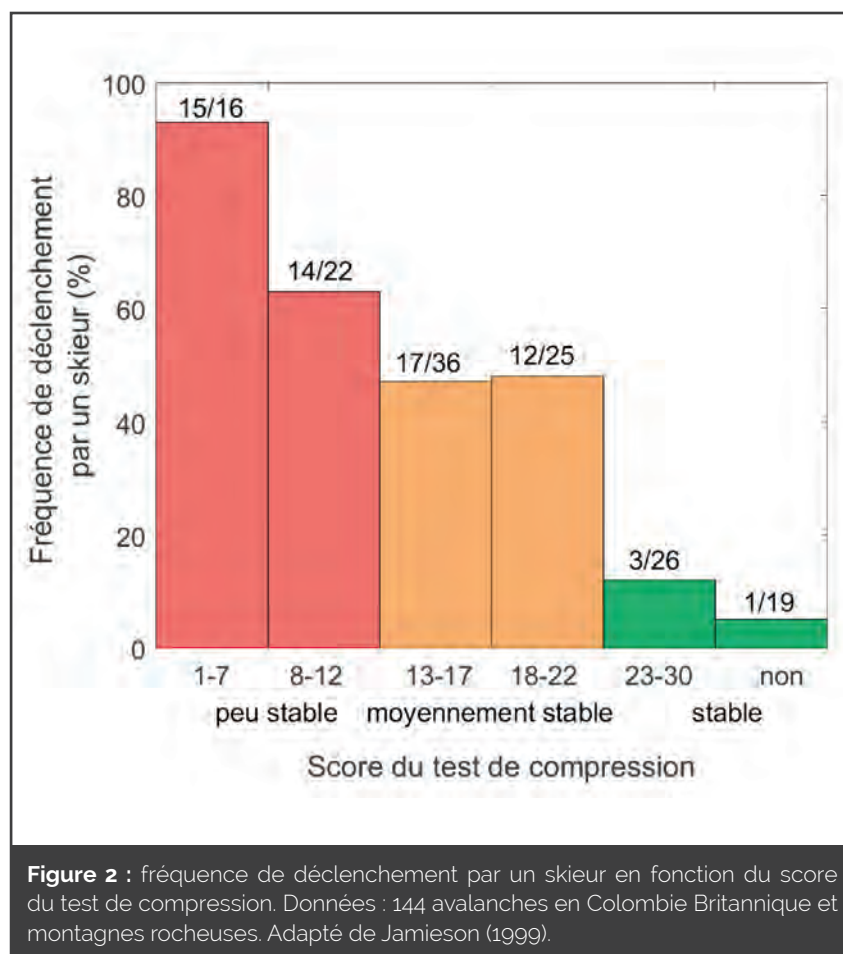


Figure 2 : fréquence de déclenchement par un skieur en fonction du score du test de compression. Données : 144 avalanches en Colombie Britannique et montagnes rocheuses. Adapté de Jamieson (1999).

LES PLAQUES DANS LES BULLETINS AVALANCHE

Les plaques présentent une grande variété, aussi bien dans leur aspect, leur consistance et leur degré de fragilité que dans leur volume et leur localisation.

Voyons les termes et expressions utilisés actuellement dans les BRA (Bulletin d'estimation du Risque d'Avalanche) pour les décrire.

Certains sont peut-être à revoir, c'est pourquoi ce glossaire pourra être amené à évoluer dans l'avenir.

Daniel GOETZ ;

Météo-France, Centre d'Études de la Neige



CRÉDIT PHOTOS : PHOTOOTHÈQUE CEN

PLAQUES À VENT : expression n'ayant pas de définition officielle ni même consensuelle. Désigne souvent des plaques formées par un vent de force suffisante pour que leur localisation soit conforme à ce que l'on admet généralement, à savoir dans les pentes abritées du vent dans des orientations opposées à celle d'où il vient. L'expression est également souvent utilisée dans le cas où le vent a transporté de la neige fraîche, pendant une chute de neige ou peu après ; la couche fragile est alors constituée de neige récente et ce type de plaque se stabilise assez rapidement ;

PLAQUES FRAGILES : expression peut-être un peu imprécise, qui est utilisée pour indiquer que ces plaques peuvent facilement être déclenchées, qu'une faible surcharge suffit, comme le passage d'un premier skieur ;

PLAQUES FRIABLES : plaques constituées de neige fraîche ou très récente un peu densifiée, qui n'a encore pris que très peu de cohésion. L'apparence de cette neige est proche de celui de la neige fraîche, d'où la grande difficulté sur le terrain à déceler ce type de plaque ;

PLAQUES SUPERFICIELLES : il s'agit de plaques assez peu épaisses situées dans la partie supérieure du manteau neigeux ; le volume de l'avalanche, si la plaque est déclenchée, sera alors moindre que dans le cas d'une

plaque qui emporte tout ou une grande partie du manteau neigeux. Attention toutefois : d'une part, le volume d'une avalanche superficielle peut être suffisant pour enfouir une personne en totalité, notamment si la configuration du terrain s'y prête (bas de pente avec replat marqué, fond de thalweg, etc.) ; d'autre part, elle peut entraîner avec elle le skieur dans une chute qui peut se révéler fatale (pente très raide, barres rocheuses, etc.) ;

PLAQUES DE FOND : il s'agit de plaques d'une nature différente des autres types de plaque ; emportant tout le manteau neigeux, elles se produisent principalement dans les pentes raides au sol lisse (dalles, grandes herbes couchées, etc.), dans les pentes ensoleillées mais aussi dans les autres orientations... Elles peuvent se produire à toute heure du jour et de la nuit, le poids du skieur n'étant pas la cause de leur déclenchement. Celui-ci est souvent précédé de l'apparition de fissures dans le manteau, mais pas toujours...

PLAQUES PIÉGEUSES : désigne des plaques dont la localisation peut paraître surprenante, par exemple dans une zone habituellement peu ventée, dans une orientation très différente de celle à laquelle on pourrait s'attendre, etc. ; cela peut également correspondre à des situations où les couches fragiles sont à la fois très localisées et très fragiles (par exemple, gobelets présents seulement au pied des pentes) ;

SECTEURS PLAQUÉS / PENTES SOUFLÉES / PENTES PLAQUÉES : voir le premier paragraphe sur les plaques à vent ;

FAIBLE / FORTE SURCHARGE : désigne la surcharge additionnelle (ou contrainte) qui, appliquée à la surface du manteau neigeux, est susceptible de déclencher une avalanche de plaque si le manteau neigeux présente une structure de plaque en son sein. Selon leur constitution et leurs caractéristiques nivologiques, certaines structures de plaque ne peuvent être déclenchées que ou surtout par une forte surcharge, pour d'autres, au contraire, une faible surcharge peut suffire. À titre indicatif, une faible surcharge est celle occasionnée par un skieur isolé, une forte surcharge celle produite par des skieurs groupés, un tir préventif à l'explosif, etc.

Dans les BRA, l'expression faible surcharge est employée dans les situations où, à l'échelle du massif, la probabilité qu'un skieur déclenche une des plaques en place est estimée élevée, par exemple parce que la couche fragile est bien fragile et peu enfouie dans le manteau neigeux. À l'inverse, c'est l'expression forte surcharge qui est utilisée lorsque la probabilité qu'un skieur déclenche une des plaques présentes apparaît plus faible, parce que, par exemple, la couche fragile est très enfouie ou qu'elle n'est qu'assez peu fragile.

FISSURES : voir à « plaques de fond » ;

SOUS-COUCHES SANS COHÉSION : désigne la couche fragile sur laquelle doit nécessairement reposer la plaque pour pouvoir partir en avalanche au passage d'un ou plusieurs pratiquants ;

SOUS-COUCHES ANGULEUSES FRAGILES / VIEILLES SOUS-COUCHES SANS COHÉSION / VIEILLE NEIGE SANS COHÉSION / (VIEILLE) SEMOULE / SUCRE EN POUDRE : toutes ces expressions sont équivalentes ; elles désignent des couches de neige présentant une très faible cohésion, donc fragiles, constituées de grains anguleux de type faces planes et/ou gobelets, qui se forment fréquemment en début de saison (mais pas seulement) ;

ASPECT DE SUCRE EN POUDRE : décrit la consistance que présente une couche fragile constituée de gobelets ou de gros grains à faces planes (cf. expressions ci-dessus).

IDÉES FAUSSES CONCERNANT LES PLAQUES

« On sent sous ses skis si l'on est sur une plaque / On peut détecter les plaques en observant bien le terrain »

Les plaques friables sont difficilement détectables car leur aspect ne diffère guère de celui de la neige fraîche. Les plaques dures peuvent se repérer plus facilement, du fait de l'aspect venté de la neige en surface, mais pas si elles ont été recouvertes par une nouvelle chute de neige non ventée.

Par ailleurs, toutes les couches de neige ventées ne partent pas en avalanche de plaque au passage de skieurs, car il est nécessaire qu'elles reposent sur une couche fragile (le tout constituant alors une « structure de plaque »). Seul l'examen détaillé d'une coupe dans le

manteau neigeux ou la réalisation de tests de stabilité permet de le savoir.

« Les plaques sont situées à proximité des cols et des crêtes »

Dans le cas des plaques à vent, c'est vrai lorsque la vitesse du vent n'est pas très élevée ; en revanche, lorsque le vent a soufflé très fort, les plaques peuvent se situer loin, voire très loin des crêtes. Il existe par ailleurs des structures de plaque dont la localisation n'est pas directement liée au vent, elles peuvent par conséquent se situer n'importe où.

« On sait quand il y a des plaques : il y a des corniches sur les crêtes aux alentours »

Ceci est loin d'être toujours vrai, d'une part parce que la configuration du terrain peut ne pas se prêter à la formation de corniches (crêtes peu marquées), d'autre part lorsque le vent souffle seulement modérément. À l'inverse, une corniche peut rester en place longtemps après qu'une plaque se soit stabilisée.

« Les plaques se trouvent dans les pentes d'orientation opposée à celle du vent »

Ce peut être majoritairement le cas, mais c'est loin d'être toujours vrai. Ceci pour deux raisons : d'une part, selon la géographie du massif et la topographie locale, la direction du vent au niveau d'une pente peut être très différente de celle du vent général (elle est parfois à l'opposé dans certaines combes !) ; d'autre part, lorsque la force du vent n'est pas très importante, des plaques, généralement friables, peuvent se former dans le versant au vent, derrière une petite croupe ou dans une légère dépression du relief.

« En forêt, on ne risque pas de déclencher une plaque »

C'est vrai seulement dans les forêts suffisamment denses. Dans les autres cas, notamment celui des mélèzes clairsemés, des plaques peuvent s'y trouver tout aussi bien qu'en terrain dégagé.

Par ailleurs, en cas d'avalanche dans une forêt, ou à proximité, les arbres constituent un facteur aggravant, car ils constituent des obstacles qu'une personne emportée peut percuter.

« On ne risque pas de déclencher une plaque dans une pente déjà skiée »

Cela est régulièrement démenti par les faits. Une des principales raisons tient dans la variabilité dans l'espace que présente très souvent le manteau neigeux et qui est parfois importante. De ce fait, celui-ci peut avoir, dans une même pente, des niveaux d'instabilité différents selon les endroits.

Une autre raison est que le manteau neigeux peut avoir évolué depuis que les traces ont été faites et, par conséquent, sa stabilité aussi ■

L'AVALANCHE ACCIDENTELLE EST UNE PLAQUE...

Les données sont têtues : les victimes d'avalanche sont responsables de leur propre accident... et, dans la très grande majorité des cas, l'avalanche est une plaque.

Voici des chiffres qui en attestent : sur l'ensemble des accidents d'avalanche recensés par l'ANENA en France entre les hivers 2000 et 2014 (768 accidents, c'est-à-dire avalanches recensées impliquant au moins un emporté), en randonnée et en hors-piste, 88% des avalanches ont été provoquées par la ou les victimes elles-mêmes ; il s'agissait, dans 95% des cas, d'une plaque. Mieux, lorsque l'on ne considère que les avalanches provoquées par la ou les victimes, la proportion de déclenchement de type plaque monte à 98%.

Les données issues de la base des accidents d'avalanche recensées par l'ANENA délivrent quelques caractéristiques de ces plaques déclenchées par leurs victimes. Il est important de noter que, bien souvent, les valeurs intégrées dans la base de données des accidents sont des valeurs estimées par les services de secours qui sont intervenus sur les accidents et ont renseigné les fiches ad hoc. Altitude, inclinaison et orientation de la zone de départ.

L'altitude moyenne estimée de la zone de départ est de 2 360 m, mais les altitudes de départ présentent une grande variabilité. La grande majorité des plaques (65%) déclenchées par les skieurs ont leur zone de départ située entre 2 000 m et 2 750 m d'altitude.

Les inclinaisons (estimées) moyenne et médiane des zones de départ se situent aux alentours de 35° (moyenne : 36°, médiane : 35°). La majorité (62%) des zones de départ des plaques déclenchées présentent une inclinaison comprise entre 30° et 40°.

Le secteur nord (NO, N et NE) représente l'orientation la plus concernée par des plaques déclenchées (57% des cas recensés). Les orientations « chaudes » (SO, S et SE) représentent environ 19% des cas recensés.

CARACTÉRISTIQUES SOMMAIRES DES PLAQUES

Dans 88% des cas recensés, la neige constituant les plaques était qualifiée de sèche par les observateurs et dans 66% des cas, de tendre. Les plaques déclenchées par les skieurs sont donc en majorité des plaques friables.

En moyenne, la largeur des cassures linéaires supérieures se situe aux alentours de 90 m (médiane : 50 m). Les plaques déclenchées aux conséquences mortelles ont une largeur moyenne plus élevée, environ 110 m (médiane : 70 m), celles sans conséquences fatales une largeur plus faible, environ 70 m (médiane : 50 m).

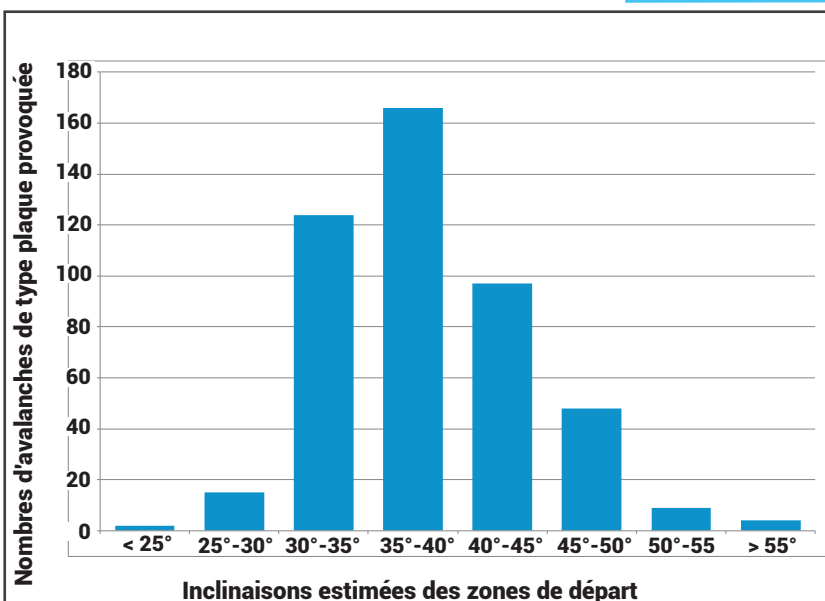


Fig. 1 : inclinaisons estimées des zones de départ des avalanches de type plaque provoquées par les victimes, en randonnée et hors-piste – Hivers 2000-2014 – France.

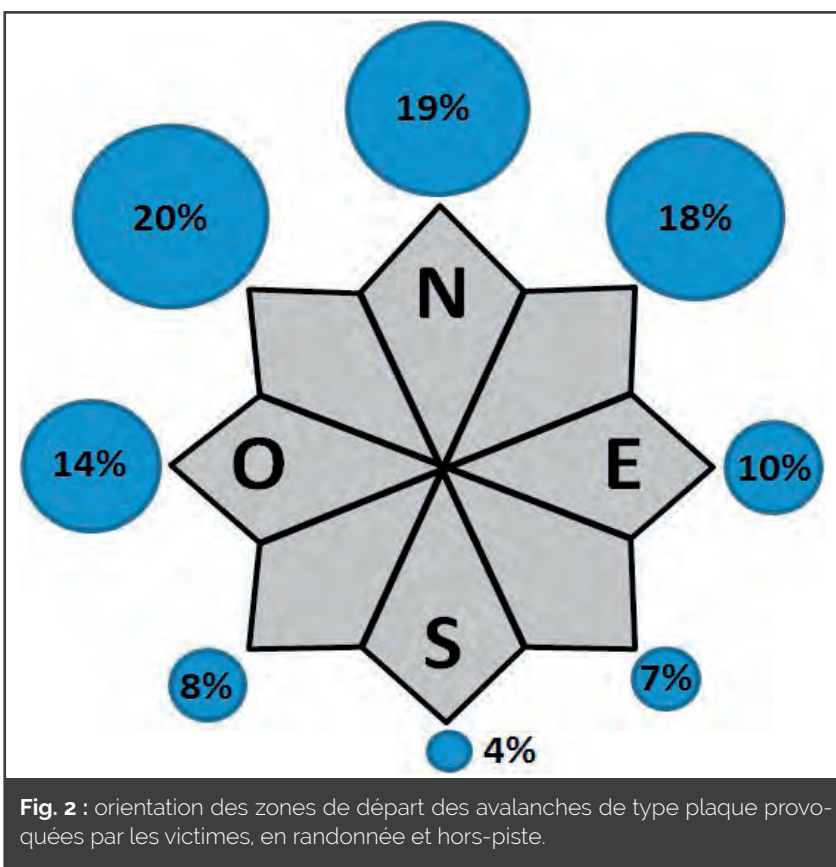


Fig. 2 : orientation des zones de départ des avalanches de type plaque provoquées par les victimes, en randonnée et hors-piste.

L'épaisseur minimale de la cassure linéaire supérieure (= épaisseur de neige emportée au niveau de la zone de départ) est en moyenne de 70 cm (médiane : 60 cm). Les plaques mortelles présentent une épaisseur minimale moyenne un peu plus élevée de 80 cm (médiane : 60 cm), celles aux conséquences moins graves au contraire légèrement plus faible, aux alentours de 65 cm (médiane : 50 cm) ■

Frédéric JARRY ;
Chargé de mission ANENA