

Photos: Michel Dubois

## Le déclenchement des avalanches de plaque : **une combinaison de quatre**

Comment se fait-il que le passage d'un skieur sur une zone déjà skiée quelques instants auparavant, et qui paraissait donc stable, puisse déclencher une avalanche de grande ampleur ? Pourquoi certaines avalanches sont-elles déclenchées par des skieurs depuis un terrain plat ? Pourquoi certains déclenchements semblent-ils être favorisés par de fortes épaisseurs de neige, et d'autres pas ? Comment enfin imaginer que le seul poids d'un skieur puisse suffire à déclencher le départ d'une masse de neige plusieurs milliers de fois plus importante ? Un éclairage nouveau est apporté sur ce problème, en considérant que l'action du skieur se limite à une amorce de rupture dans la couche fragile, qui peut ensuite se propager spontanément sous le seul effet du poids de la neige. Ces explications sont en excellent accord avec ce que nous observons sur le terrain : elles permettent de comprendre pourquoi certaines avalanches partent de façon jusque là inattendue, mais aussi (c'est la majorité des cas), pourquoi rien ne bouge alors que les conditions nécessaires au départ d'avalanches semblent réunies.

Le présent article a pour objectif d'exposer les principes majeurs de cette approche. Les précautions qui pourraient en découler sont discutées.



# mécanismes en série

## > Quelques concepts de base :

On peut distinguer deux types d'avalanches : les avalanches spontanées d'un côté, et les artificielles et accidentelles de l'autre. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux secondes, sur la base maintenant classique d'une plaque posée sur une couche fragile. C'est la cohésion de la couche fragile qui retient la plaque dans la pente (résistant ainsi à la force motrice due au poids de la plaque) et la cohésion de la plaque elle-même qui l'empêche de se rompre (ce n'est pas le cas pour de l'eau, qui n'a aucune cohésion, et qui s'écoulerait immédiatement dans la pente).

La surcharge d'un skieur (80 kg environ) est extrêmement faible en comparaison du poids de la neige impliquée dans le seul processus de déclenchement (plusieurs milliers de tonnes). Si la déstabilisation se pro-

duit, elle ne peut être due à la surcharge, mais plutôt à la diminution de la cohésion de la couche fragile lors du passage du skieur. L'effet de cette perturbation locale cumulée le long du parcours du skieur peut avoir des conséquences à grande échelle. C'est ce que nous allons voir en détail maintenant. >>>



# Nivologie

Le système peut être schématisé comme sur la figure 1. La plaque est représentée par une série d'éléments reliés par des ressorts, qui peuvent s'allonger ou se comprimer en fonction des efforts auxquels ils sont soumis, ou se rompre si ces efforts excèdent une valeur seuil. D'une façon similaire, la plaque est reliée à la neige plus ancienne par une couche fragile, schématisée par un genre de château de cartes qui peut s'effondrer si l'effort auquel il est soumis est trop élevé. Nous considérons que le château de cartes parvient à retenir la plaque s'il est indemne, et qu'il ne la retient plus s'il s'effondre.

Les quatre étapes intervenant dans la chronologie du déclenchement, basées sur les propriétés que nous venons de discuter, sont détaillées ci-après.

## > Une combinaison de quatre étapes en série

Si l'on se base sur les concepts précédents, le mécanisme de déclenchement met en œuvre les quatre étapes suivantes:

- ① effondrement local du château de cartes provoquant une amorce de rupture de la couche fragile.
- ② extension de cette rupture dans la couche fragile.
- ③ amorce de la fissure sommitale dans la plaque.
- ④ extension de la fissure sommitale, qui conduit au déclenchement (figure 2).

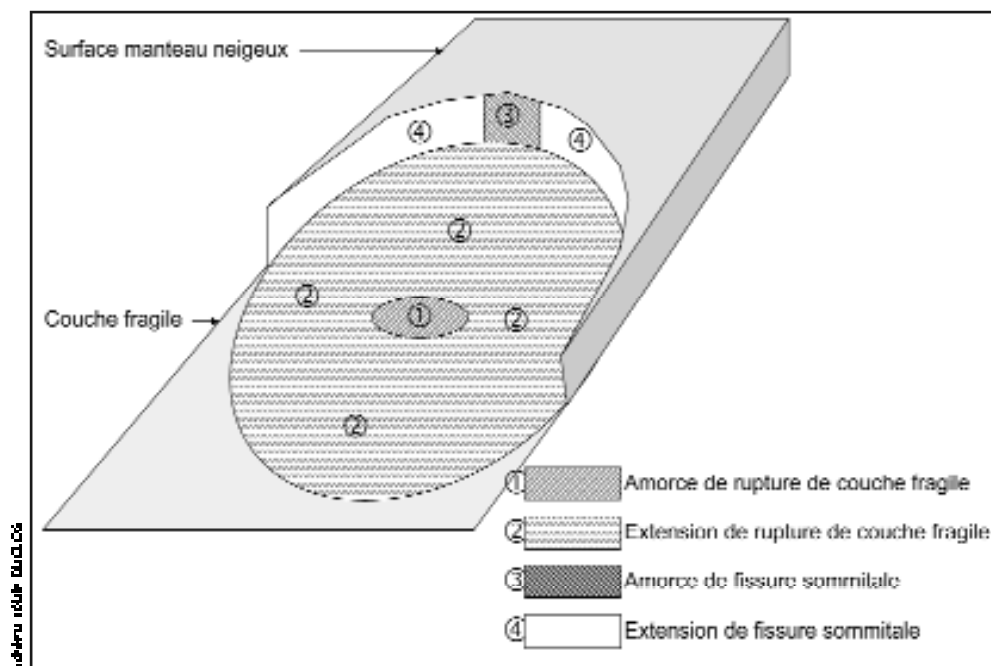
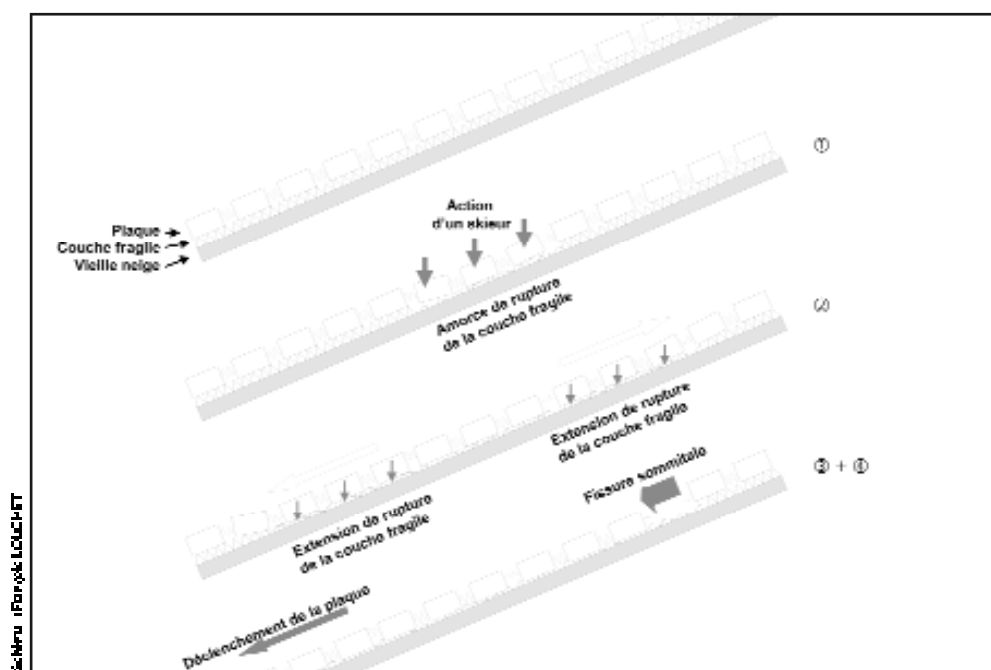
Ces mécanismes, tous nécessaires, opèrent l'un après l'autre, ce qui signifie que si pour une raison quelconque l'un d'entre eux ne se produit pas, l'avalanche ne se déclenche pas. Ces quatre étapes sont maintenant analysées en détail.

► Figure 2. Les quatre étapes nécessaires au déclenchement d'une plaque.

## Amorce de la rupture de la couche fragile :

Sur une pente, la couche fragile est soumise à la fois à la composante de cisaillement (parallèle à la pente) et de compression (perpendiculaire à la pente) du poids de la neige qu'elle supporte. Ces deux composantes augmentent avec l'épaisseur de neige et sa densité. Le cisaillement est favorisé au détriment de la compression à mesure que la pente s'accroît. La

▼ Figure 1. Une plaque sur une couche fragile peut être schématisée comme une série d'éléments reliés entre eux par des ressorts, reposant sur un château de cartes ; (1) l'action du skieur peut effondrer localement le château de cartes ; (2) l'effondrement peut se propager sous l'effet du poids de la neige ; (3 et 4) lorsque l'extension de l'endommagement de la couche fragile est suffisamment vaste, le poids de la partie suspendue de la plaque peut provoquer l'amorce puis la propagation de la fissure sommitale, suivies généralement du déclenchement de la plaque.



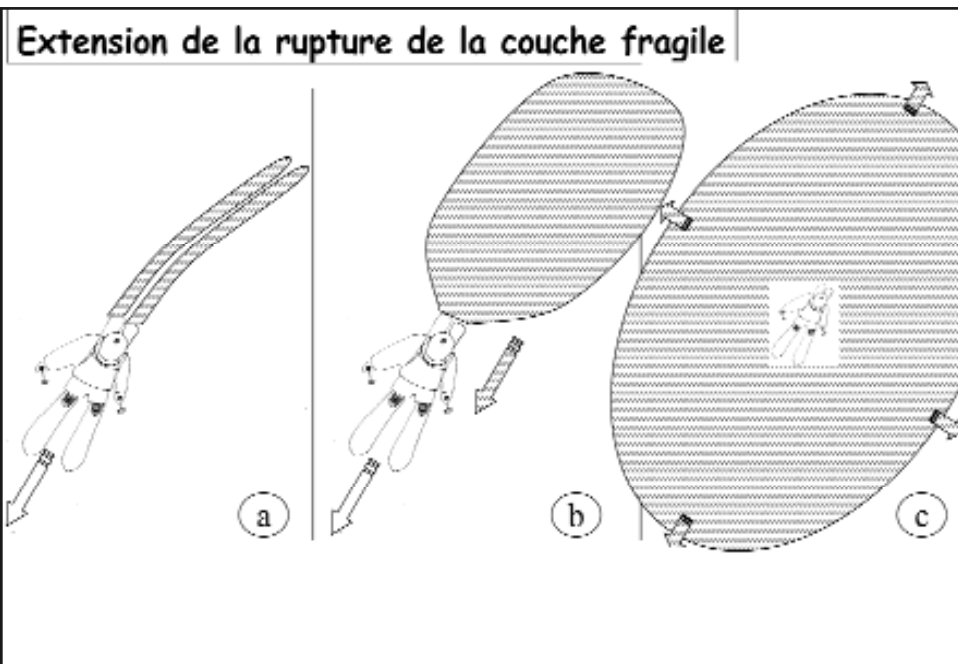


Figure 3. (a) La couche fragile, peu recouverte de neige, ne s'effondre que dans la trace des skis ; (b) la rigidité de la plaque, qui ploie sous les skis, permet un effondrement plus large que la trace des skis ; (c) à partir d'une taille critique, la rupture de la couche fragile se propage rapidement sous le seul effet du poids de la neige.

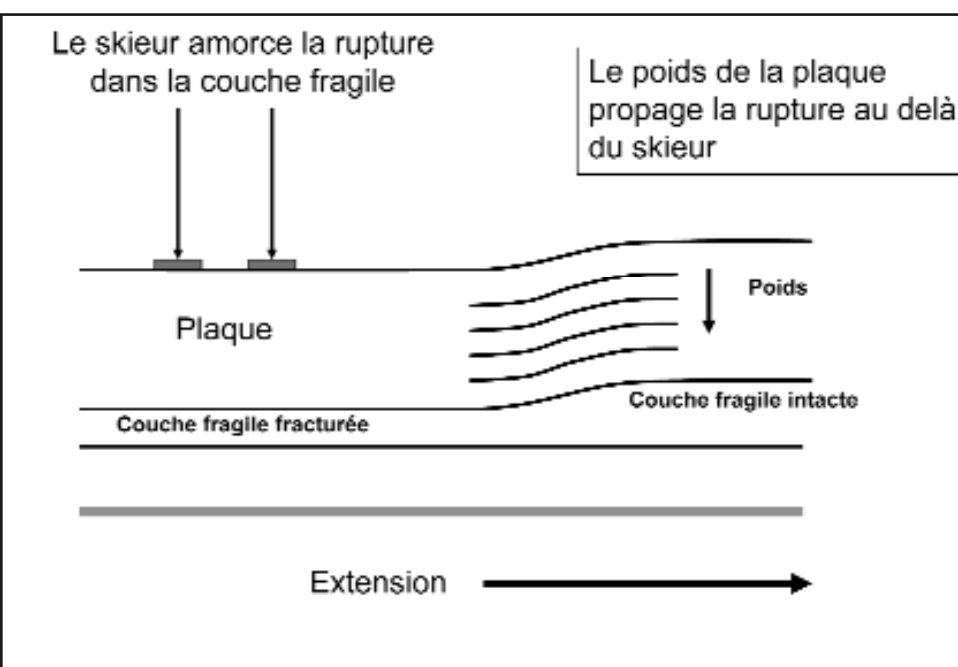


Figure 4. Schéma montrant l'effondrement de la couche fragile et sa propagation. Le poids de la plaque provoque l'extension progressive de la rupture dans la couche fragile (d'après Johnson et al., 2000).

couche fragile est endommagée lorsque la charge locale qu'elle supporte (combinant cisaillement et compression) excède sa résistance mécanique. Le poids d'un skieur ou d'une motoneige n'augmente pas de façon significative la charge totale exercée par la couche de neige, mais cette charge supplémentaire est répartie sur une très petite surface (par exemple les semelles des skis), ce qui se traduit par une pression importante

qui peut endommager localement la couche fragile. Cet effet local du skieur est aggravé en conditions dynamiques (rebond dans un virage serré, ou réception après un saut). Un effet similaire est obtenu avec une explosion.

L'endommagement qui en résulte réduit la résistance que la couche fragile oppose au glissement de la plaque. Le déplacement du skieur agrandit progressivement cette zone

de rupture. Le château de cartes peut aussi s'effondrer localement sur terrain plat au passage du skieur, ce qui conduit aussi à l'amorce d'une rupture de la couche fragile.

### Extension de la rupture de la couche fragile :

Le mécanisme d'extension de cette rupture peut être de deux types différents :

- Mode A : à cause de l'action locale du skieur, elle s'étend au fur et à mesure que ce dernier progresse (figures 3a et 3b).
- Mode B : la rupture amorcée par le skieur s'étend spontanément, sous l'action du seul poids de la neige, bien au-delà de la zone parcourue par ce dernier (figure 3c). Dans ce cas en effet, l'extension de la rupture provient de l'énergie récupérée lors de l'effondrement. Le poids du skieur n'a plus aucun effet à ce stade, la masse de neige à l'origine de cette extension étant infiniment plus importante.

La condition d'apparition du mode B (propagation spontanée) obéit en effet à une loi de mécanique de la rupture, le critère de Griffith (1920) : pour une charge donnée, la zone de rupture s'étend spontanément à grande vitesse (plusieurs dizaines de m/s) si sa taille excède une taille critique, qui dépend de la résistance du milieu. >>>

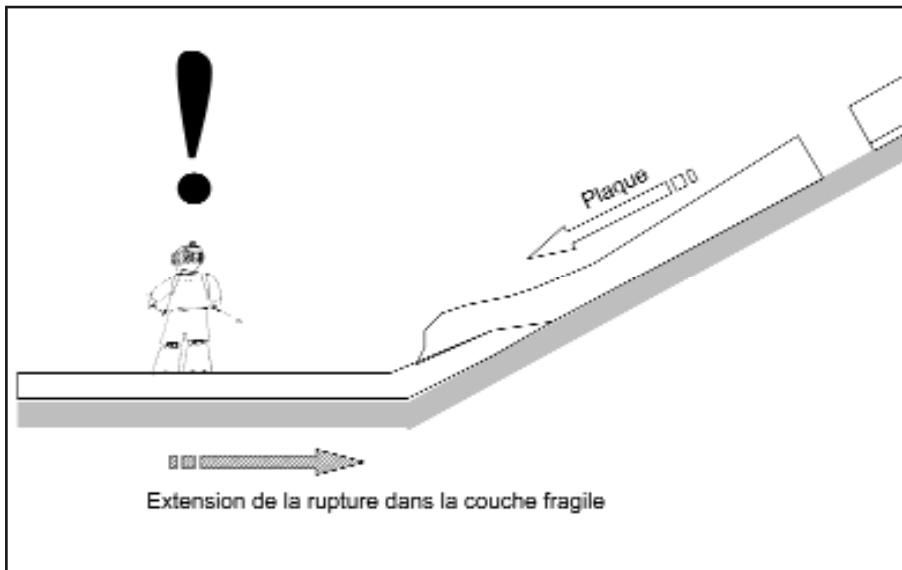
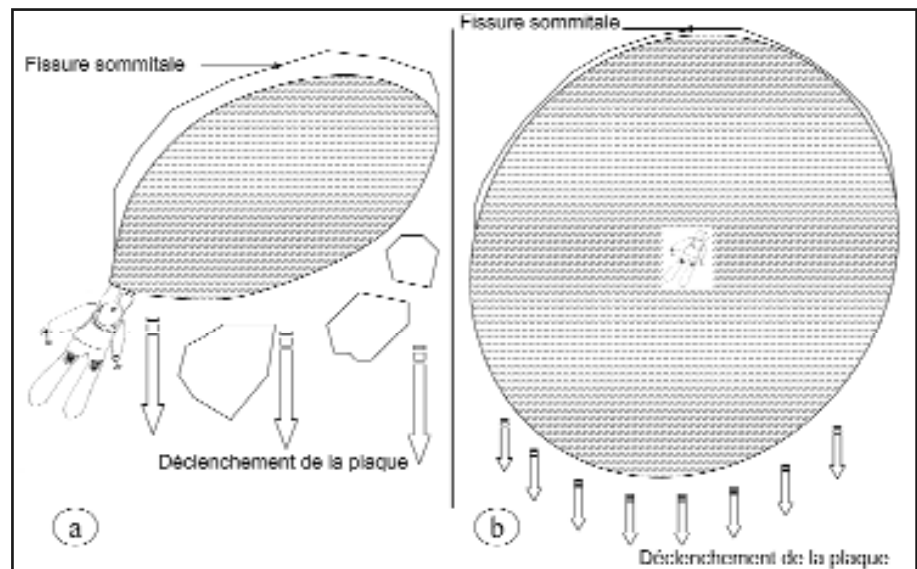


Figure 5. Une amorce de rupture sur sol plat peut déclencher une avalanche si elle s'étend jusqu'à une pente voisine et s'y propage.

Figure 6. (a) Déclenchement en mode A : la zone de départ se limite approximativement à la zone endommagée par le skieur ; (b) déclenchement en mode B : la zone de départ est vaste et la fissure sommitale ne s'ouvre que très loin du skieur, qui se trouve pris au milieu de la plaque.



Plus la charge augmente, plus la taille critique diminue.

Sur terrain plat, les arguments précédents sont toujours valables et la zone de rupture peut se propager si le poids de la neige est suffisant. Cependant, cette zone de rupture ne pourra déclencher une avalanche que si elle s'étend jusqu'à une pente voisine d'inclinaison suffisante, et s'y développe (figure 5).

Les caractéristiques de l'avalanche déclenchée dépendent étroitement du mode de propagation de la zone de rupture (A ou B). Ce point très important sera discuté plus loin.

### Amorce de la fissure sommitale :

A mesure que la rupture de la couche fragile s'étend sur la pente, le poids de la plaque qui la surmonte, qui était retenu

par la résistance de la couche fragile, est transféré au niveau des bords de la plaque. Ces efforts augmentent évidemment avec le poids de la partie « suspendue » de la plaque, c'est-à-dire avec la taille de la zone de rupture, jusqu'à atteindre le seuil de rupture de la plaque. C'est l'amorce de la fissure sommitale. Le lieu et l'instant d'amorce de la fissure sommitale dépendent en grande partie du mécanisme de propagation de la rupture de la couche fragile (modes A et B décrits plus haut) (figure 6).

### Extension de la fissure sommitale et déclenchement de l'avalanche

Conformément au critère de Griffith, si l'effort au sommet de la partie libre de la plaque est suffisant pour ouvrir une



amorce de fissure sommitale, il le sera en principe d'autant plus pour la propager. La fissure sommitale croît alors très rapidement, libérant la plaque et déclenchant l'avalanche. Dans la plupart des cas donc, l'amorce de la fissure sommitale est presque immédiatement suivie du déclenchement.

Cependant, comme pour la couche fragile, le seuil de rupture de la plaque peut varier d'un endroit à l'autre. Une fissure sommitale peut s'ouvrir à un endroit favorable, mais arrêter de se propager lorsqu'elle rencontre une zone plus résistante. Dans ce cas, la rupture de la couche fragile n'étant plus arrêtée par le départ de l'avalanche, elle continue sa progression sous la plaque, en particulier vers le haut (voir «2. Déclenchement en mode B »).

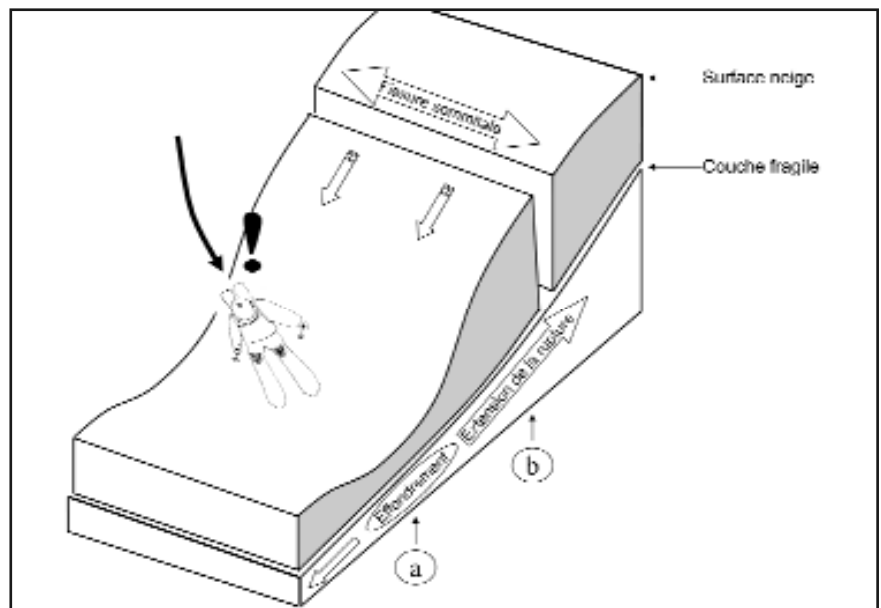
### 1. Déclenchement en mode A :

Il se produit lors de l'extension progressive de la zone de rupture due à l'action du skieur. La zone de départ est alors limitée à la zone endommagée par le skieur, qui se trouvera donc probablement en bordure de zone lors du déclenchement. Ce scénario est favorisé par une faible cohésion de la plaque.

L'entaille faite par les skis dans une plaque tendre peut aussi favoriser la rupture de la plaque le long du trajet du skieur. En revanche, dans le cas de plaques plus résistantes, il se peut que le seuil de rupture ne soit pas atteint. Dans ce cas, soit le skieur sort de la zone dangereuse sans avoir déclenché l'avalanche, soit la rupture de la couche fragile évolue brutalement en mode B (spontané) (voir ci-dessous).

### 2. Déclenchement en mode B :

Considérons maintenant une plaque beaucoup plus résistante, et (ou) une plaque plus lourde. La zone de rupture peut alors atteindre la taille critique pour le mode B avant qu'une fissure sommitale n'ait le temps de s'ouvrir. A partir de ce stade, elle se propage à une vitesse beaucoup plus rapide. La fissure sommitale s'ouvre peu après, souvent à une grande distance du skieur, lorsque le poids de la partie libre de la plaque est devenu suffisam-



▲ Figure 7. La situation est particulièrement dangereuse lorsqu'une zone peu chargée en neige (favorable à l'amorce de rupture de la couche fragile) est continue avec une zone beaucoup plus chargée (favorable à la propagation de la rupture en mode B).

ment grand pour venir à bout de la résistance de la plaque. La zone de départ est bien plus étendue que dans le premier cas, et le skieur se trouve pris au milieu de cette zone. Dans certaines conditions, cette ouverture de fissure sommitale peut s'accompagner d'un « bang » impressionnant, dont nous avons été l'un et l'autre plusieurs fois témoins. Un calcul simple montre que ce mode de déclenchement est favorisé pour des pentes voisines d'un angle universel de 35,3°.

### > Les pièges de la variabilité :

Les différents cas possibles de déclenchement dépendent de la variabilité des propriétés de la neige, qui peut intervenir au cours des quatre étapes du processus.

Par exemple, d'après le scénario ci-dessus, un épais manteau neigeux peut favoriser l'expansion d'une rupture de la couche fragile. Mais l'amorce de la rupture de la couche fragile par un skieur s'avère impossible si la plaque concernée est trop épaisse. C'est sans doute pourquoi :

- des déclenchements accidentels sont plus fréquents en début d'hiver (plaques minces sur couches fragiles) ;
- des skieurs peuvent traverser sans problème une combe lourdement chargée, et ne déclencher l'avalanche qu'à l'instant même où ils en sortent, là où l'épaisseur de neige recouvrant la couche fragile est plus faible ;
- des randonneurs déclenchent parfois la plaque juste après avoir déchaussé leurs skis (la pression exercée est alors plus forte, pour une même épaisseur de neige).

Le type d'effondrement que le skieur laisse sur son passage peut varier, par exemple du cas de la figure 3a à celui de la figure 3b, ou pire, de la figure 3c. Ceci sera le cas par exemple s'il passe d'une zone de neige peu cohésive à une neige plus cohésive. Un autre exemple est celui d'une croissance progressive (mode A) de la zone de rupture sous une plaque peu épaisse (figure 3b), qui peut rapidement évoluer en expansion spontanée rapide (mode B) (figure 3c) si la plaque devient plus épaisse dans le voisinage immédiat (figure 7). Ce dernier cas >>>

est particulièrement redoutable pour les montagnards expérimentés, qui sont attentifs à la qualité de la neige sous leurs skis, mais peuvent négliger le danger dû à sa variabilité dans le voisinage : une pente qui paraît sûre peut être soudainement balayée par une avalanche de grande ampleur.

On observe fréquemment que des fissures sommitales s'ouvrent (étape 3) sur un affleurement rocheux, un arbre, une trace de ski ou de surf. Ces hétérogénéités sont des points faibles dans la plaque, qui favorisent l'amorce. Un phénomène similaire peut se produire sur des convexités.

Ces points faibles peuvent jouer un double rôle :

→ ils facilitent le déclenchement grâce à l'ouverture de la fissure sommitale.

→ mais ils empêchent la propagation à grande échelle de la zone de rupture, qui aurait conduit à la déstabilisation de très grandes plaques.

En d'autres termes, de grandes zones de départ sont attendues sur des pentes vastes et sans points faibles (hétérogénéités de terrain, arbres, rochers épars ou affleurements).

Des skieurs entraînés arrivent parfois à déclencher des avalanches de plaque sans s'y faire prendre. « Couper les pentes » était une technique courante pour les pisteurs avant l'usage généralisé du déclenchement préventif par explosifs. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un déclenchement de taille limitée (mode A) : l'effort de traction résultant de l'effondrement de la couche fragile sur une surface restreinte est suffisant dans ce cas pour ouvrir une fissure sommitale juste au dessus. L'avalanche est déclenchée, mais le skieur peut s'échapper s'il est capable de contrôler sa trajectoire. C'est ce qui se passe dans le cas de plaques peu cohésives et peu épaisses.

Pourtant, sur une même pente, il peut arriver qu'une avalanche dépasse largement la taille « habituelle ». Il s'agit alors d'un déclenchement en mode B, et dont les conséquences sont habituellement fatales. Ce scénario est plus probable dans le cas de neige

lourde et cohésive (cette propriété pouvant résulter de la superposition de plusieurs couches aux qualités variées).

Il est intéressant pour les pratiquants d'être au courant de l'existence de ces deux modes de déclenchement. Ils doivent savoir qu'il est très difficile et risqué de prédire lequel de ces deux modes est susceptible de se produire, même si le mode B est favorisé par une couche fragile continue, recouverte par une neige lourde, épaisse et résistante, sur des pentes proches de 35°.

## > Conclusions :

Si le concept de déséquilibre par surcharge peut s'appliquer à certains cas d'avalanches spontanées, ce n'est pas le cas pour les avalanches accidentelles, car cela supposerait que la plupart des pentes neigeuses sont tellement près du point de rupture qu'il suffirait de la goutte d'eau que constitue le poids du skieur pour tout faire basculer.

Malgré la grande variété des phénomènes avalancheux observés, la compréhension de chaque cas particulier peut entrer dans le cadre d'un modèle unique en quatre étapes successives, basé sur des notions de dynamique de la rupture plutôt que d'équilibre statique. Toutes ces étapes doivent se réaliser l'une après l'autre pour permettre le déclenchement. Si une seule d'entre elles manque, l'avalanche ne se déclenche pas. Ce scénario part d'un endommagement local de la couche fragile, suivi ou non de son extension, et qui peut conduire à la rupture sommitale de la plaque. La distinction, essentielle, entre les modes A et B qui en découle permet d'expliquer la grande variété de types et de tailles d'avalanches obtenues dans des conditions apparemment semblables.

Cependant, cette approche ne permet de rendre compte de ces phénomènes qu'après qu'ils se soient produits. Cela rappelle le problème bien connu de l'aile de papillon : bien que les lois de mécanique de la rupture régissant le

déclenchement soient désormais connues, le manteau neigeux est un système tellement complexe, qu'une prédiction déterministe du lieu et du moment exacts de déclenchement d'une avalanche est impossible, puisqu'elle demanderait une connaissance parfaite et continue des propriétés de la neige.

Est-ce à dire qu'il ne sert à rien de connaître puisque de toutes façons on ne peut prévoir ? Une avancée notable a été effectuée dans ce domaine par la mise en évidence d'une loi statistique générale régissant les tailles des zones de départ, et sa modélisation théorique par automate cellulaire par MM. Faillettaz, Louchet et Grasso (2004). L'application de ces simulations à des topographies particulières devrait permettre d'affiner les prévisions.

En attendant, nous pensons que les concepts développés dans cet article pourront fournir une aide à la prise de décision des professionnels et des usagers de la montagne enneigée, à travers une meilleure compréhension des mécanismes sous jacents. ■

**François LOUCHET**  
Laboratoire de Glaciologie et  
de Géophysique de l'Environnement  
**Alain DUCLOS**  
ALEA Sarl

## Remerciements

Si de futurs développements de cette approche en termes de prévision doivent voir le jour, ils le devront en grande partie à l'approche statistique et aux simulations développées par Jérôme Faillettaz au cours de sa thèse. Il en est sincèrement remercié.

Les auteurs sont aussi reconnaissants envers Bruce Jamieson qui leur a permis de reproduire une de ses figures.

Ils seront heureux si les lecteurs de cet article acceptaient de partager leurs expériences, de façon à pouvoir tester et affiner leur approche.

## ➤ Bibliographie

Liste disponible sur simple demande à l'Anena.