

La prédiction du déclenchement d'avalanche n'est pas une science exacte, beaucoup d'alpinistes chevronnés en ont malheureusement fait la douloureuse expérience. En particulier, les approches actuelles ne prennent pas en compte la variabilité du manteau neigeux qui peut être très différent d'un endroit à un autre, et qui peut évoluer très rapidement dans le temps. Ceci explique pourquoi, même dans des conditions qui peuvent paraître similaires, les avalanches peuvent avoir des tailles très différentes.

L'originalité de notre approche se situe à deux niveaux. D'une part, les données de terrain nous ont permis de mettre en évidence une loi très générale de distribution statistique des tailles d'avalanche, analogue à la loi de Gutenberg-Richter s'appliquant aux séismes, sur laquelle est basée l'échelle de Richter. D'autre part, nous avons mis au point une simulation numérique capable de retrouver cette loi statistique à partir de données de base extrêmement simples, afin de comprendre l'origine physique de cette loi.



Photo: J. L. L. L. L. L. L.

Déclenchements d'avalanches : pur **hasard** ou **ordre** caché ?

> Qu'est-ce qu'une avalanche de plaque ?

Une avalanche de plaque résulte de la propagation d'une fissure dans le manteau neigeux. Pour étudier ce phénomène, on se doit donc de connaître les caractéristiques du manteau neigeux ainsi que la façon dont s'y propage une rupture.

→ La neige : un matériau complexe

Malgré son apparence, la neige est en fait un matériau extrêmement complexe. En effet, ce matériau naturel est composé essentiellement d'air (jusqu'à 90%), de glace et éventuellement d'eau (lorsque la neige fond). C'est bien sûr le squelette



de glace qui confère à la neige sa résistance et sa tenue mécanique. À l'échelle du millimètre, il apparaît que la glace ne se répartit pas de façon homogène dans l'espace, mais s'agglomère en grains de tailles et de formes très différentes (variant de gros grains ronds à des particules très anguleuses). De plus, ces grains sont en constante évolution du fait des métamorphoses de la neige, sous l'influence de plusieurs paramètres : le vent, la température et le gradient de température principalement.

→ Le manteau neigeux : un deuxième niveau de complexité

Le manteau neigeux se forme tout au long de l'hiver par accumulations successives des différentes chutes de neige. Le manteau neigeux est donc un matériau stratifié, composé de couches de neiges plus ou moins dures, ressemblant à un millefeuille. Comme la neige est en constante évolution (structure, propriétés physiques et mécaniques), les différentes

couches de neige auront des propriétés différentes, avec des points de faiblesse « privilégiés » au niveau de la transition entre les différentes couches.

→ Rupture dans le manteau neigeux : l'avalanche

Une avalanche de plaque résulte de la propagation d'une rupture dans une couche fragile de ce millefeuille (à l'intérieur du manteau neigeux), suivie d'une rupture perpendiculaire à la pente remontant jusqu'à la surface, formant une « marche ». Totalement désolidarisée du manteau neigeux, la partie ainsi isolée (la plaque) glisse alors le long de la pente sous l'effet de la gravité (le poids de la neige).

Étudier la rupture d'un matériau hétérogène n'est pas une mince affaire. Les méthodes « classiques » sont de nature déterministe. L'idée générale consiste à dire que, si l'on est capable de tout connaître dans le matériau que l'on étudie (propriétés mécaniques, physiques, thermiques, existence de

fissures, type de chargement, etc.), on sera capable de prédire l'endroit précis et le moment exact de la rupture.

Malheureusement, nous avons vu que la neige est un matériau très « capricieux » car ses propriétés mécaniques et physiques sont très variables dans l'espace et dans le temps : on s'en rend notamment compte lors d'un sondage de battage¹. Bien souvent, les propriétés déterminées à un endroit donné ne sont pas les mêmes quelques mètres à côté (du fait de la présence d'un affleurement rocheux à proximité, d'une rupture de pente, etc.), ni au même endroit le lendemain, du fait des métamorphoses.

Devant ces difficultés, une approche parallèle a vu le jour. Elle ne prétend pas décrire parfaitement une avalanche, mais tente plutôt de comprendre le phénomène dans >>>

Note

1. Mesure permettant de connaître la résistance à l'enfoncement des différentes couches de neiges composant le manteau neigeux.

sa globalité. Pour cela, il faut décrire les avalanches de façon statistique. Ce qu'on perdra en précision, on le gagnera en généralisation.

> Une nouvelle approche : vers la simplification...

→ Les données de terrain :

Les stations de ski de La Plagne et de Tignes, en particulier, disposent de bases de données informatiques sur les avalanches déclenchées sur leur domaine skiable. Ces données de terrain sont relevées tous les jours par les pisteurs lors de leurs relevés nivométrés. Ils notent, en particulier, la localisation, la largeur et hauteur de la zone de départ (figure 1), le mode de déclenchement, etc.

> Ce que nous avons pu montrer avec ces données...

Les données sont formelles : contrairement à ce que l'on pourrait penser, il n'y a aucune corrélation statistique entre hauteurs et largeurs. Ce n'est pas parce qu'une avalanche est large qu'elle est forcément épaisse (et vice-versa).

De plus, rapportée à la totalité des avalanches enregistrées, les largeurs et les hauteurs de chaque avalanche ne sont pas aléatoires mais s'organisent autour d'une loi statistique : il y a plus de petites avalanches (hauteurs ou largeurs) que de grosses, et ceci dans une proportion bien précise (figure 2). C'est ce que l'on appelle l'invariance d'échelle, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Un tel comportement statistique signifie qu'une avalanche n'a pas de taille caractéristique : on ne peut trouver une taille moyenne, habituelle, au phénomène avalancheux. Les petites avalanches sont plus probables que les grandes, mais des avalanches de toutes les tailles sont possibles.

Connaissant cette répartition statistique des tailles d'avalanche, il est possible de déterminer la probabilité d'occurrence d'une avalanche d'une taille donnée. En particulier, il est pos-

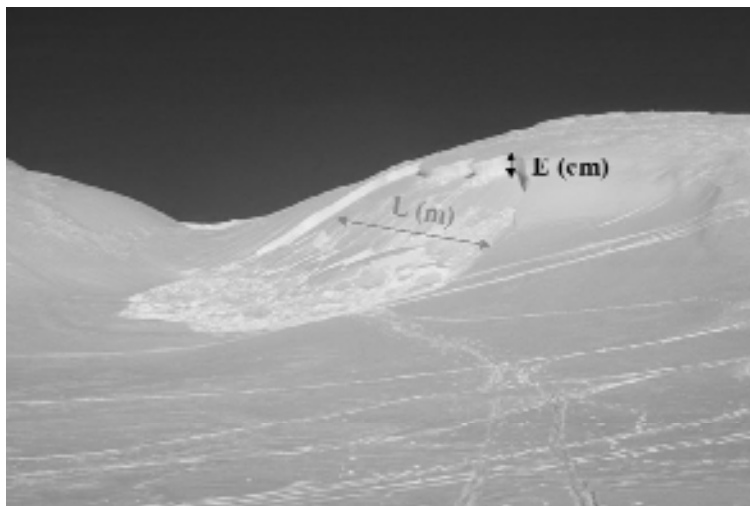


Photo: H. CHÉPÉLIN

↑ Figure 1 : Définition de la largeur (L) et de l'épaisseur (E) d'une avalanche de plaque.

sible de connaître par extrapolation les « chances » qu'a une avalanche de taille exceptionnelle de se produire, même si on ne peut dire exactement où et quand elle se produira.

Mais pour quelle raison la taille des avalanches obéissent-elles à une loi particulière ? Quelle est la signification physique sous-jacente ?

Ce type de loi se retrouve un peu partout dans la nature, notamment pour d'autres aléas naturels tels que les séismes, les glissements de terrain, les chutes de blocs rocheux. Cette étude statistique montre donc que les avalanches n'échappent pas à ce qui semble être une règle pour les aléas naturels. Tous ces phénomènes sont invariants d'échelle.

Le concept d'invariance d'échelle est relativement nouveau. Il peut se résumer ainsi : quelque soit l'échelle à laquelle le phénomène est observé, son aspect ou son comportement sont identiques (figure 3a). Il n'y a pas de taille privilégiée. Ce concept est à mettre en rapport avec la géométrie fractale (figure 3b : le chou de Romanesco). En effet, une fractale n'est rien d'autre qu'une courbe (ou une figure) dont la géométrie ne dépend pas de l'échelle à laquelle on l'observe.

Ce caractère invariant d'échelle est assez répandu dans la nature, mais son origine n'est pas toujours bien comprise. Pourquoi la nature s'organise-t-elle souvent de la sorte ?

> Une simulation numérique :

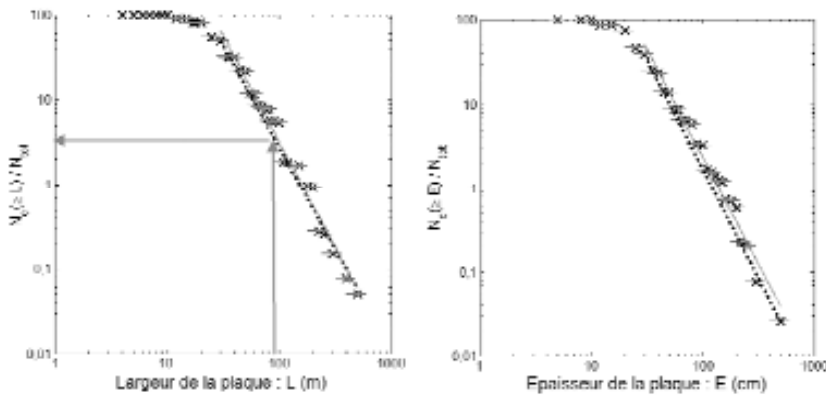
Grâce à un modèle numérique très simple, nous avons été les premiers à pouvoir reproduire sur ordinateur les déclenchements d'avalanches de plaque (figure 4), et à retrouver ainsi les statistiques de tailles d'avalanches relevées sur le terrain.

Nous avons pu montrer que tous les phénomènes de rupture provoqués par la gravité (glissement de terrain, chute de blocs, avalanches) relèvent du même mécanisme de déclenchement. Leur comportement statistique ne dépend que de l'hétérogénéité du matériau (plus précisément du rapport entre la résistance de la couche fragile et celle de la plaque elle-même). L'origine de l'invariance d'échelle des tailles d'avalanches a donc une raison physique simple.

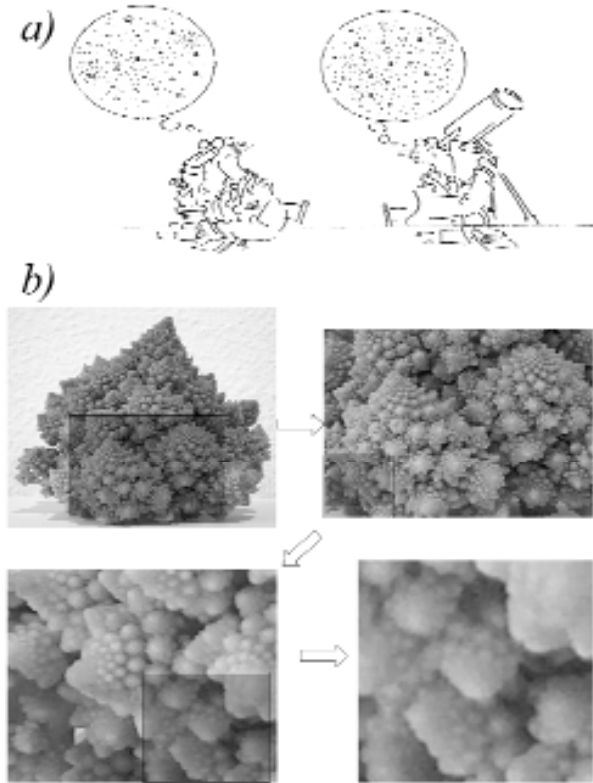
Cette simulation valide le scénario de déclenchement suivant : la rupture de la couche fragile s'initie progressivement à partir de zones localisées, tels des îlots d'instabilités, imperfections du manteau neigeux, et se propage ensuite de proche en proche, comme des avalanches de dominos, avant de déclencher la rupture de la plaque. Le manteau neigeux recèle donc des « pièges » très localisés sur lequel il faut éviter de passer (à condition de savoir où ils se trouvent !).

Le manteau neigeux peut donc être vu comme un champ de mines anti-personnel. Toutes ces mines sont munies d'une petite charge de dyna-

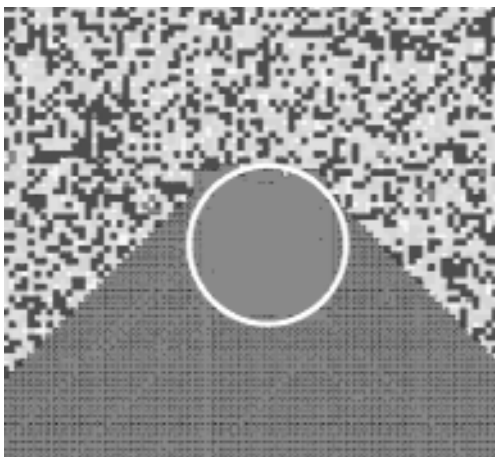
La Plagne



↑ Figure 2 : Pourcentage d'avalanches de largeur supérieure à L en fonction de cette largeur L dans un diagramme logarithmique. Exemple (flèches) : à La Plagne, la probabilité d'avoir une avalanche d'une largeur supérieure à 100 m est d'environ 3% du nombre total d'avalanches. Le deuxième graphe est le même, mais pour les épaisseurs de la plaque.



← Figure 3 : a. Illustration de l'invariance d'échelle (origine : Université de Prague), b. exemple d'une fractale naturelle (le chou de Romanesco).



← Figure 4 : Exemple d'avalanche « numérique » (entourée en blanc). L'image représente la couche fragile dans laquelle la rupture se propage. Plus les cases sont de couleur claire, plus elles sont proches de la rupture. Les cases gris clair sont décollées (plus d'adhérence entre les couches). Pour plus d'explications voir Failletaz, Louchet, Grasso. Physical Review Letters 93, 208001 (2004).

mite, certaines pourvues d'un détonateur, d'autres pas. Évidemment, toutes ces mines sont camouflées ! Partout ailleurs, le manteau est stable. Si, pour une raison quelconque, une de ces mines explose (que ce soit à cause du passage d'un skieur plus ou moins innocent, ou pour une raison « naturelle »), elle peut faire exploser à son tour les mines sans détonateur aux alentours.

Lorsqu'un skieur se retrouve au sommet d'une pente enneigée, il a le choix de sa trajectoire de descente. S'il passe sur une mine passive, rien ne se passe. S'il passe sur une mine active, elle explose. Cette explosion peut provoquer des réactions en chaîne provoquant le déclenchement d'une plaque plus ou moins importante (en fonction de la quantité de mines dans la zone où il est passé). Le fait qu'un skieur traverse une pente sans rien déclencher ne signifie donc pas que la pente est sûre, mais qu'il a simplement eu le flair (ou la chance) de passer entre les « mines ». Le skieur suivant aura peut être moins de chance.

> Les développements possibles et les enjeux :

Les travaux présentés ici n'en sont qu'à leur début. Il semble que de nombreuses avancées puissent encore être effectuées dans le domaine de l'application à partir de ces résultats théoriques. Une piste possible serait de « personnaliser » à chaque couloir l'outil numérique que nous avons développé, et de le coupler aux codes de calcul d'écoulements actuellement bien au point.

Ce type de modèle pourrait constituer une aide significative au dimensionnement des ouvrages de protection, dans le cas des avalanches « naturelles » ■

Jérôme FAILLETTAZ

Remerciements

François Louchet (Laboratoire de Glaciologie de Grenoble) pour son aide inestimable, ainsi que les stations de La Plagne et Tignes pour la mise à disposition leur base de données sur les avalanches déclenchées sur leur massif.