

LES DÉCLENCHEMENTS D'AVALANCHES

André ROCH

Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches
Weissfluhjoch/Davos

ABSTRACT

An approximate indication of the stability of snow layer on a slope can be established by the stability index. This is the strength parallel to the slope of the weakest stratum, divided by the shear stress within the stratum.

The angles of static and of kinetic friction are measured in desaggregated crystals of different kinds of snow. It gives an idea of the amount of resistance left in a layer after its structure has been broken and once the crystals are in movement.

Measures at the rupture line of slabs avalanches show that avalanches can start when the stability index is as high as 4. An attempt is made to show that a rupture due to tension stresses in the convex part of a slope is the most likely cause of a slab avalanche release, when the stability index is higher than 1.

It is found that the higher the stability index, the more compact and resistant the slab must be for an avalanche to be released. Several examples are given.

RÉSUMÉ

Un degré de stabilité approximatif est établi pour les couches de neige sur une pente.

On mesure les angles des frottements statiques et cinétiques de différentes neiges, dont les cristaux ont été désagrégés. Ils donnent une idée de la résistance résiduelle dans une strate brisée et en mouvement.

Des mesures de plaques de neige à la cassure montrent que des avalanches peuvent se déclencher pour un degré de stabilité allant jusqu'à 4. On tente de montrer que les ruptures de traction aux parties convexes des pentes sont les plus propices à provoquer les déclenchements, quand le degré de stabilité est élevé. On trouve que plus la stabilité est grande, plus la plaque doit être compacte pour que le déclenchement soit possible. Plusieurs exemples sont donnés.

1. INTRODUCTION

D'après certaines propriétés mécaniques de la neige, le changement de ces propriétés et des mesures à la cassure d'avalanches de plaques de neige, on tente d'expliquer les différentes possibilités de déclenchement des avalanches. Cette étude se limite aux neiges sèches.

2. LES CONTRAINTES

Considérons une couverture de neige, soit une superposition de strates sur une pente. A chaque point à l'intérieur du manteau de neige, les contraintes proviennent du poids de la neige située au dessus du point envisagé. Ces contraintes sont influencées par la viscosité et la compressibilité de la neige, d'après Haefeli (1) et (2). De plus sur des pentes d'inclinaison variable, ces contraintes se combinent à des tractions aux parties convexes des pentes, à des compressions aux parties concaves et à des cisaillements latéraux aux endroits où la déclivité varie latéralement. Des épaisseurs variables de neige produisent également des contraintes.

3. LA RÉSISTANCE

Dans un plan vertical passant par la ligne de plus grande pente, la résistance de la neige, matériau anisotrope, varie en grandeur et direction suivant la structure de cette

neige. Mais cette structure change dans le temps à cause de la métamorphose de la neige, de sorte que la grandeur et la direction de la plus petite résistance de la neige varient avec le temps. Les contraintes ont une influence sur la résistance. En effet, la viscosité de la neige permet aux cristaux de glace de s'arranger quelque peu pour mieux résister à l'effort. Il ressort que le jeu des contraintes et des résistances est très complexe.

4. LA RUPTURE

Dès que dans une direction quelconque, la contrainte dépasse la résistance, une rupture se produit qui peut éventuellement déclencher l'avalanche.

5. LE DEGRÉ DE STABILITÉ

Pour estimer la stabilité d'une couverture de neige sur une pente, nous simplifions le problème et nous établissons, d'après Bucher⁽³⁾ et⁽⁴⁾, un degré de stabilité en comparant deux valeurs mesurables dans la neige : la résistance à la rupture de cisaillement dans le sens parallèle à la pente et la contrainte de cisaillement dans le même plan, due à la composante parallèle à la pente du poids de la neige située au-dessus. Le degré de stabilité ainsi défini est :

$$s = \frac{\tau_s}{\tau} \quad (1)$$

τ_s est la résistance à la rupture au cisaillement dans un plan parallèle à la pente;
 τ est la contrainte de cisaillement dans le même plan, due au poids de la neige située au-dessus.

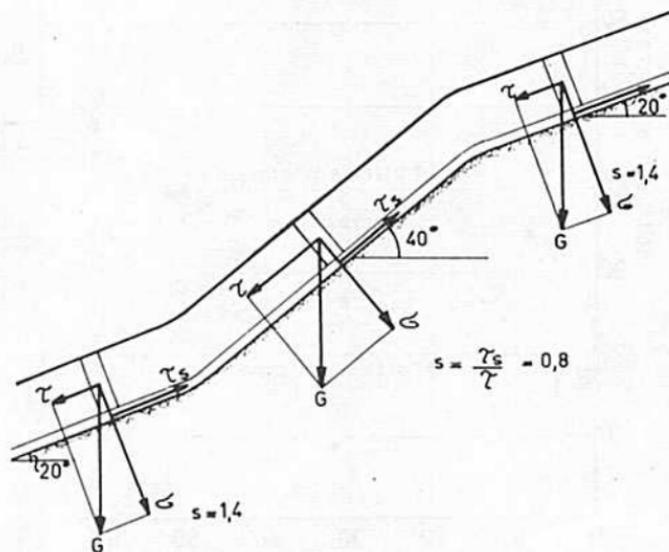


Fig. 1 — Exemple d'ancrage d'une couche de neige sur une pente relativement courte. Sur la partie raide, la stabilité est inférieure à 1. Mais la neige peut être tenue en haut et en bas par la déclivité plus faible qui donne une stabilité supérieure à 1.

6. LES INFLUENCES PÉRIPHÉRIQUES

Plus les strates d'un manteau de neige sont compactes, plus les ancrages périphériques prennent de l'importance. Les ancrages peuvent être des irrégularités du terrain, des rochers auxquels les couches de neige sont amarrées, ou simplement des parties de pentes moins raides, figure 1. Un manteau de neige peut être suspendu d'en haut, soutenu d'en bas ou ancré latéralement, de sorte qu'une rupture quelconque, soit des ancrages périphériques, soit sur le fond, ne déclenche pas forcément l'avalanche.

7. ANGLES DE FROTTEMENT STATIQUE ET CINÉTIQUE DE LA NEIGE DÉSAGRÉGÉE SÈCHE

La différence entre le frottement statique et cinétique de la neige désagrégée, suivant le genre du cristal, joue un rôle dans le mécanisme du déclenchement. Des essais de cisaillement au moyen du cadre de 1 dm² de surface, en augmentant la pression normale, donnent les angles de frottement statique de différentes neiges dont les cristaux ont été désagrégés au préalable. Ces angles sont généralement plus grands dans la nature, car ils sont liés à la cohésion de la neige et ce sont alors les angles ρ du frottement

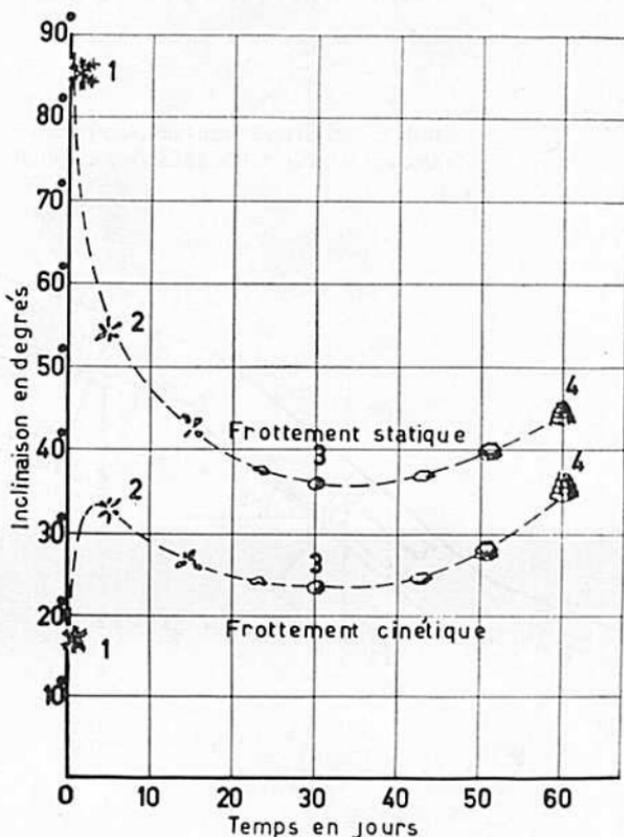


Fig. 2 — Frottements statiques et cinétiques de neiges désagrégées et non consolidées, en fonction d'un temps approximatif de la métamorphose de la neige, sans fonte.

interne. La mesure du frottement cinétique a été faite en poussant un bloc de neige compacte profilé en escalier, de façon à ce qu'il entraîne la neige désagrégée et en continuant le mouvement sans accélération, tirant le bloc avec un dynamomètre à la même vitesse (env. 1 m/s). Le test est primitif, mais plusieurs essais donnent une faible dispersion. Le bloc est chargé de plus en plus de façon à déterminer l'angle de ce frottement.

Les résultats sont représentés à la figure 2, en fonction d'un temps approximatif de la métamorphose de la neige sans fonte. La neige fraîche a le plus grand angle de frottement statique, 90° à 50°, parce qu'on ne peut désagréger les fins cristaux de neige fraîche sans éliminer la cohésion de feutrage et sans changer le genre de neige. Mais une fois en mouvement la neige fraîche est le meilleur lubrifiant parmi les neiges sèches. En suivant la métamorphose destructive, le frottement statique s'abaisse jusqu'à 36° pour des grains sphériques désagrégés, puis remonte jusqu'à 45° pour des cristaux en prismes et en gobelets, suivant la métamorphose constructive.

La neige fraîche a le plus petit angle de frottement cinétique $\rho' = 17^\circ$. Cet angle augmente jusqu'à 34° au début de la métamorphose destructive, puis s'abaisse jusqu'à 23° pour des grains plus ou moins sphériques, pour remonter jusqu'à 35° pour la neige en prismes et en gobelets.

8. MESURES A LA CASSURE D'AVALANCHES DE PLAQUES DE NEIGE

Dès l'hiver 1949-50, des mesures ont été faites à la cassure de 35 avalanches de plaque de neige. On a établi le degré de stabilité, en mesurant sur la neige restée en place au-dessus de la cassure, le poids d'unité de surface de la plaque, duquel on tire d'après l'inclinaison de la pente, la contrainte de cisaillement τ (due au poids seulement) et la pression normale σ . On mesure avec le cadre de 1 dm² la cohésion c de la strate qui a fonctionné comme lubrifiant, et on obtient la résistance au cisaillement de cette strate au moyen de la relation empirique :

$$\tau_s = c + (0,08 c + 0,4) \sigma \quad (*)$$

On peut alors établir le degré de stabilité

$$s = \frac{\tau_s}{\tau}$$

On a établi encore une approximation de l'instabilité après la rupture dans la strate lubrifiante, soit :

$$s_1 = \frac{\tau_s - c}{\tau} \quad (2)$$

$\tau_s - c$ représente une valeur plus grande que ce qui reste comme résistance, dès que l'avalanche est en mouvement. En effet, $\tau_s - c = \sigma \operatorname{tg} \rho'$, tandis que la vraie valeur de cette résistance est : $\sigma \operatorname{tg} \rho'$ où ρ' est l'angle de frottement cinétique qu'on ne peut mesurer sur place.

On mesure encore toutes sortes de caractéristiques de la plaque, comme sa résistance au battage et sa résistance à la traction à chaque 5 cm de hauteur de la cassure. Cette dernière mesure est faite avec un appareil représenté à la figure 3.

Toutes les valeurs mesurées sont données au tableau 1. On a porté ces valeurs sur un diagramme en fonction du degré de stabilité et après de nombreux tâtonnements, la valeur qui semble donner le meilleur résultat est la résistance totale à la traction de la plaque qui s'est déclenchée, figure 4 (les avalanches n°s 1, 6, 25 et 26 ne sont pas prises en considération).

(*) Équation (2) de l'article « Les variations de la résistance de la neige » du même auteur.

Hiver	N°	Date	Lieu	ψ	σ	τ					
				degrés	kg/dm ²	kg/dm ²					
1949-50	1	7.12.49	Schafaläger pente NE	44°	0.291	0.288					
	2	18.12.49	Schafaläger pente NE	36°	1.8	1.32					
	3	5.01.50	Dorftäli arrive dans l'hôtel Derby	45°	0.85	0.85					
	4	27.12.50	Schafaläger Grünturm Vt; NE	45°	0.56	0.56					
1950-51	5	17.01.51	Dorftäli	41°	1.5	1.3					
							rupture 1)				
1952-53	6	23.12.52	Seeli Dorftäli	34°	0.94	0.64					
							30.12.52	Schwarzhorn pente WNW	37°	1.37	1.03
1953-54	9	5.02.53	Dorftäli pente SE	37°	1.13	0.86					
							27.02.53	pente SSW à côté de l'Institut	34°	2.26	1.55
							3.03.54	Derbyschuss	38°	0.94	0.73
1954-55	13	8.12.54	Schafaläger pente E	37°	0.72	0.54					
							13.12.54	Schafaläger	42°	1.03	0.91
1955-56	15	16.12.54	Mittelgrat contre le Meyerhofertäli	38°	1.49	1.12					
							30.12.55	Schwarzhorn	38°	0.297	0.232
							2.01.56	Dorftäli	42°	0.47	0.42
1956-57	19	5.01.56	Haglamahd	38°	1.91	1.49					
							28.01.56	Schafaläger sur le bock	44°	0.48	0.46
	7.02.56	Champ d'observation Aval. Brändlin	44°	2.18	2.08						
						15.02.56	Gepro. Avalanche Dorfberg	42°	1.69	1.53	
	20.02.56	Dorfberg	44°	0.74	0.615						
						4.12.56	A travers les déflecteurs au Dorftäli	44°	0.65	0.635	
	7.01.57	pente Brändlin sous Champ d'observation	47°	0.93	0.62						
						10.01.57	Déflecteurs au Dorftäli	47°	0.68	0.73	
	29.01.57	Sous les ouvrages Schiahorn	38°	0.6	0.47						
						29.01.57	Dorftäli pente NE	37°	0.49	0.33	
18.02.57	Mittelgrat Vt. E	37°	0.46	0.35							
					22.02.57	Derbyschuss direction Serneus	37°	1.58	1.33		
14.03.58	Petite Wasserscheide	34°	1.97	1.35							
					16.03.58	Meyerhofertobel	39°	1.12	0.91		
7.01.59	pente de Taverna Vt Est	42°	0.432	0.39							
					29.01.59	Weissfluh sommet pente SE	30°	1.38	0.8		
5.01.65	Tavernahang	55°	3.76	5.4							
							33°	0.51	0.33		

ψ Angle en degrés de la pente à la cassure.

σ Composante normale à la pente du poids de la neige qui a glissé en kg/dm².

τ Composante parallèle à la pente du poids de la neige qui a glissé en kg/dm².

C Cohésion de la couche lubrifiante en kg/dm².

τ_s Résistance au cisaillement de la couche lubrifiante en kg/dm².

S Degré de stabilité = τ_s/τ . (Les avalanches n°s 1, 6, 25, 26 ne sont pas prises en considération).

TABLEAU 1
(pour figure 4)

<i>C</i>	τ_g	<i>S</i>	<i>S</i> ₁	<i>d</i> moyen	σ_t moyen	σ_t total	<i>R</i> max.	<i>R</i> moyen	Cause du déclenchement
kg/dm ²	kg/dm ²	$\frac{\tau_g}{\tau}$	$\frac{\tau_f - c}{\tau}$	dm	kg/dm ²	kg/dm ²	kg	kg	
0.6	0.73	3.2	0.45	3.6	1.1	4	—	—	naturel
0.25	1.00	0.76	0.57	7.2	30	216	43	20	"
1.2	1.62	1.9	0.49	11	2.72	30	—	—	"
1.85	2.15	3.84	0.55	3	19	104.4	—	—	"
0.5	1.16	0.9	0.50	7.4	1.2	8.9	10	4	"
1.5	3.03	1.18	0.60	11	3.2	37	23	7	"
4.1	4.78	7.5	1.1	6.5	4.3	26	17	4	"
1.5	2.21	2.14	0.69	6	2.3	14	23	7	pétard
5.	7.02	2.79	0.8	9	27.4	249	85	42	naturel
1.8	2.41	2.8	0.712	6.3	6.1	38.6	3	2.5	"
2.1	3.38	2.18	0.83	8	15.3	133	7	3.5	"
1.53	2.12	2.37	0.65	6.3	6.6	42	22	8	"
0.6	1.02	1.4	0.57	5.7	1.85	11.1	14	3	"
0.5	0.82	1.51	0.59	5	0.54	14.3	2	1.6	"
1.2	1.71	1.88	0.56	9	6.6	42	22	8	"
1.0	1.71	1.53	0.64	7	7.06	49.5	22	4	"
0.3	0.42	1.83	0.54	3.5	3.5	12.36	3	2	skieur
0.5	0.95	0.925	0.44	8	3.1	24.7	9	35	skieurs 4†
0.8	1.02	2.42	0.52	4.5	2.8	12.7	3	2	naturel
3.3	4.57	3.05	0.85	9	5.8	52.5	23	8	skieur
0.5	0.71	1.56	0.45	4.5	2	9	1	1	"
3.8	3.95	1.9	0.73	12.5	7.2	90	33	15	lance-mine
1.4	2.26	1.48	0.56	8	4.7	38	22	9	skieur
0.95	1.30	2.12	0.57	4.7	1.94	10.5	13	7	"
0.9	1.20	1.9	0.48	1.8	7.5	29.9	7	3.5	naturel
0.25	0.64	1.03	0.63	4.8	4.0	18.3	9	4	"
1.6	1.96	3.98	0.49	4.2	12.0	50.5	22	10	"
0.9	1.18	2.5	0.60	3.6	0.89	3.17	4	3	"
0.35	0.56	1.7	0.64	4.2	1.13	5.3	3	2	skieur
0.37	0.69	1.97	0.91	3.8	0.54	2.12	3	2	naturel
1.2	1.98	1.49	0.58	7.0	7.6	56.2	27	7	skieur
0.6	1.48	1.1	0.65	8.5	10.5	94.8	48	15	chute de
0.8	1.32	1.45	0.57	8.5	2.16	19.2	7	3.5	corniche
0.6	0.79	2.03	0.50	3.2	0.86	2.66	6	3	skieur 1†
0.5	1.10	1.38	0.75	8.0	3.1	24.8	9	3	naturel
3.5	6.06	1.12	0.47	14.3	19.0	272	137	55	naturel
0.36	0.38	1.15	0.07	5.3	1.2	6.4	3	1.8	patrouilleur

*S*₁ Approximation de la stabilité résiduelle = $(\tau_g - c)/\tau$.

d moyen Épaisseur de la plaque déclenchée en dm.

σ_t moyen Résistance moyenne à la traction de la plaque déclenchée en kg/dm².

σ_t total Résistance totale à la traction de la plaque déclenchée en kg/dm².

R max. Résistance au battage maximum dans la plaque déclenchée.

R moyen Résistance au battage moyenne de la plaque déclenchée en kg.

On obtient une dispersion de points apparemment sans signification, mais sur laquelle on peut faire les observations suivantes :

- Quelques avalanches ont un degré de stabilité plus petit que 1. Les plaques devaient être ancrées à leur périphérie avant leur déclenchement;
- La plupart des avalanches ont un degré de stabilité entre 1 et 2;
- Plusieurs avalanches ont un degré de stabilité supérieur à 2, allant même jusqu'à 3,8;
- On peut tracer, sur la figure 4, une zone limite de la stabilité au-dessus de laquelle une avalanche ne se déclencherait plus et énoncer la conséquence suivante :

Plus le degré de stabilité est grand, plus la plaque doit être compacte et résistante pour que son déclenchement soit possible.

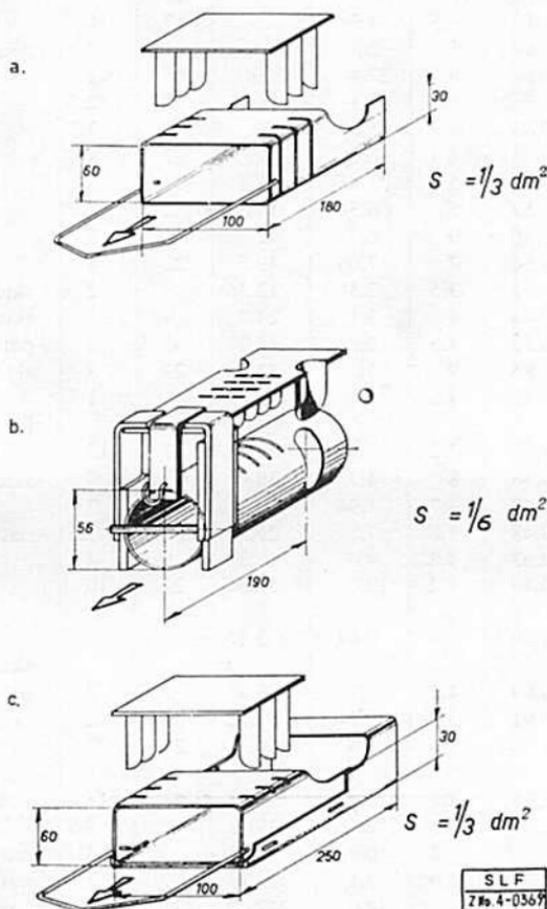


Fig. 3 — Appareils pour mesurer sur place la résistance à la traction de la neige :
 a) Appareil à profil rectangulaire (surface de rupture $1/3 \text{ dm}^2$);
 b) Appareil cylindrique pour neige dure (surface de rupture $1/6 \text{ dm}^2$);
 c) Appareil d'après Ramsli, pour garantir une traction axiale.

Il en résulte que, pour un degré de stabilité semblable, plus grand que 1, une couche de grande résistance peut se déclencher à la suite d'un accident ou d'un événement, tandis qu'une couche de faible cohésion ne se déclencherà pas pour le même accident.

On peut expliquer ainsi comment certaines possibilités de déclenchement varient dans le temps. Une couche de neige accumulée par le vent ne risque guère de se déclencher pour une stabilité donnée plus grande que 1, au début de son accumulation, quand

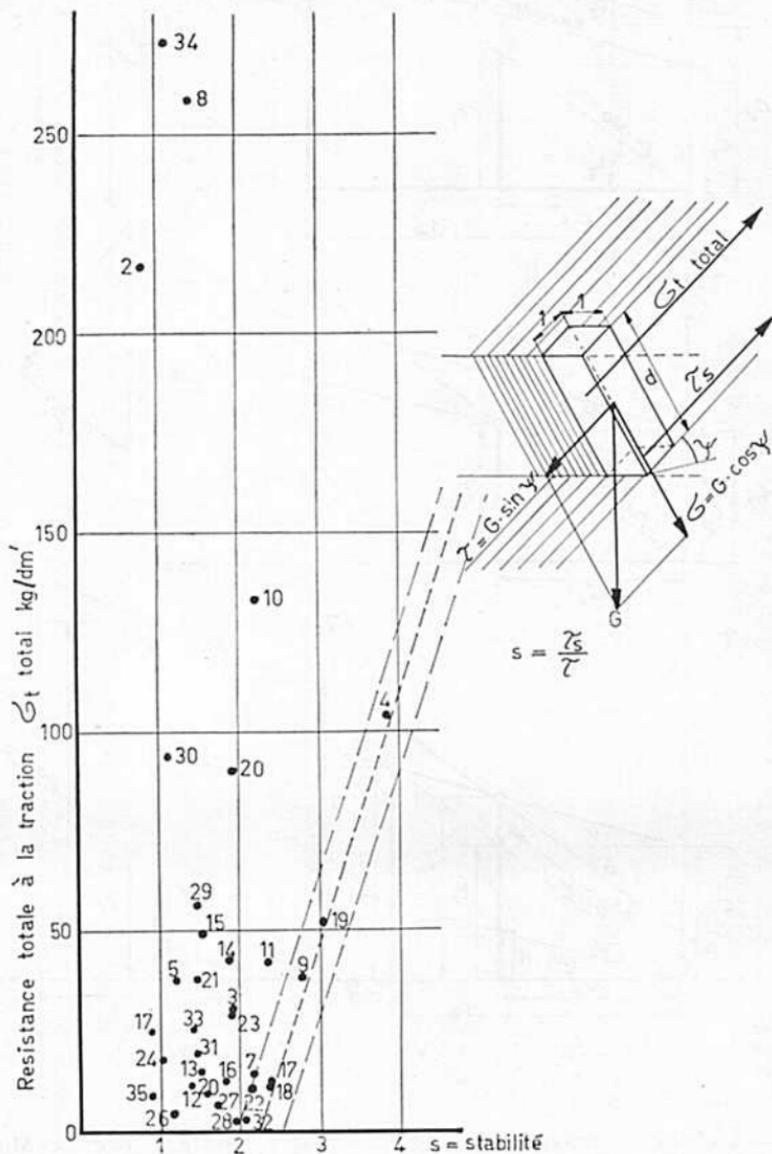


Fig. 4 — Résultats de mesures faites à la cassure d'avalanches de plaques de neige. La résistance totale à la traction de la plaque déclenchée, σ_t total, a été portée en fonction de la stabilité s de la plaque.

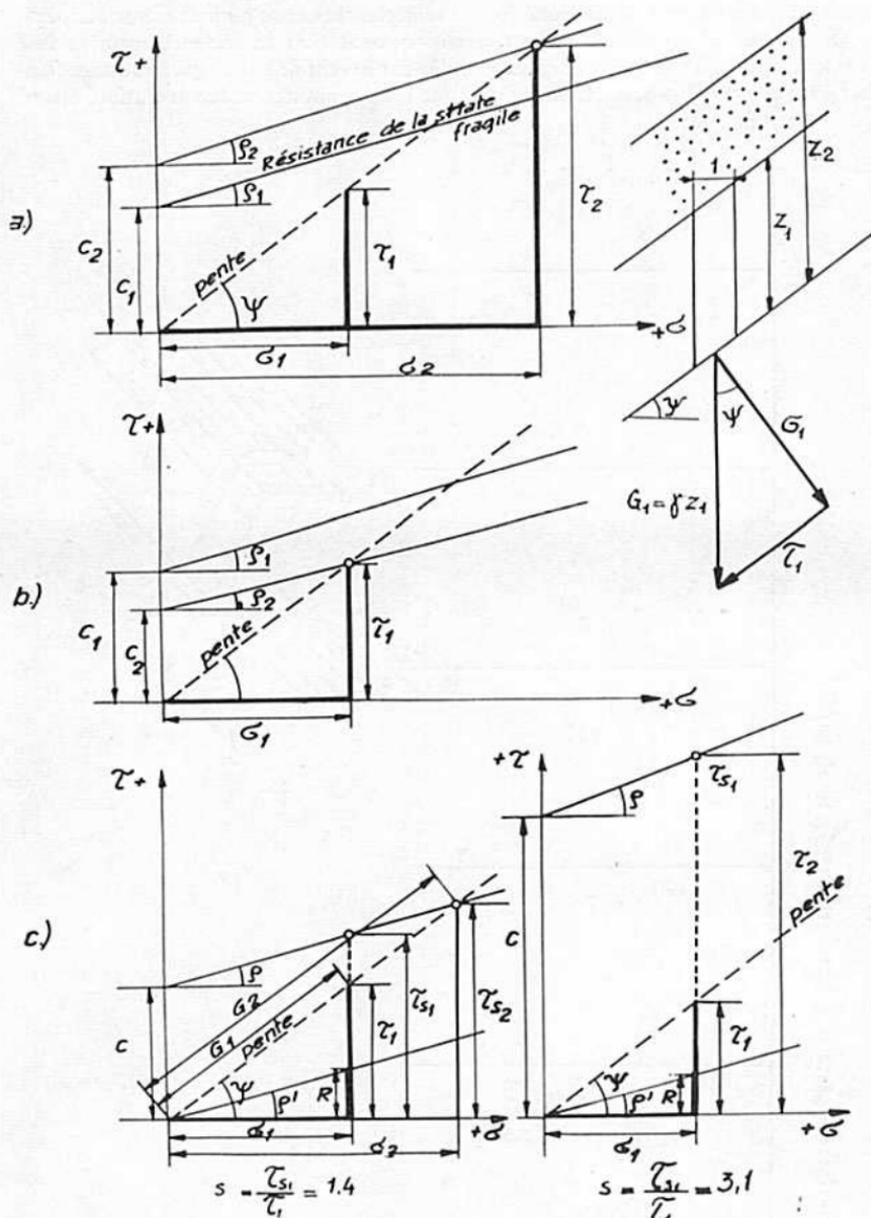


Fig. 5— Analyse de différents genres de déclenchements d'après le diagramme de Mohr:
 a) Déclenchement spontané par augmentation progressive de la contrainte;
 b) Déclenchement spontané par diminution lente des résistances;
 c) Déclenchements par accident provoquant une augmentation subite des contraintes.

elle est encore de faible cohésion. Mais après un certain temps (1 à 2 jours) cette neige souffiée prend une grande cohésion et tandis que le degré de stabilité reste le même, les possibilités de déclenchement augmentent.

9. ANALYSE DES DÉCLENCHEMENTS D'APRÈS LE DIAGRAMME DE MOHR

Pour qu'une rupture se produise dans une strate, il faut que sur le diagramme de Mohr, le vecteur de contrainte coupe la courbe intrinsèque de la neige (enveloppe de la résistance de Mohr) figure 5a.

En ne considérant que la contrainte due au poids de la neige, cette contrainte augmente à la suite des chutes de neige ou de pluie sur la neige, progressivement le long de la ligne de pente pointillée, jusqu'à ce qu'elle coupe la courbe intrinsèque. Cependant, à la suite de la surcharge, la résistance augmente aussi, mais avec un certain retard, de sorte que l'intensité de la chute de neige joue un rôle. Une interruption de la chute de neige laisse le temps à la résistance d'augmenter et retarde ou annule la possibilité d'un déclenchement de ce genre.

Sur des pentes longues et larges où la surface de la pente est beaucoup plus importante que celle des sections périphériques des couches de neige susceptibles de se déclencher, les ancrages aux limites des couches jouent un rôle négligeable. On peut alors considérer le degré de stabilité comme critère du déclenchement. On nomme ce genre : *Un déclenchement spontané par augmentations progressives des contraintes*. C'est de cette façon que les pentes raides (40° à 50°) se déchargent généralement au fur et à mesure des chutes de neige, dès que, sur le diagramme de Mohr, le poids qui augmente le long de la ligne de pente, coupe la courbe intrinsèque.

Sur les pentes moins raides, 30° à 35°, il faut d'énormes chutes de neige pour que l'avalanche se déclenche. Dans ces conditions, les couches recouvrant tout entier d'une montagne arrivent à la limite de l'équilibre. Le plus petit ébranlement met alors la neige en mouvement et le déclenchement se propage sur toute la montagne, d'autant mieux que dès que la neige est en mouvement, la résistance diminue et devient un frottement cinétique. Quand la vitesse augmente, la neige tourbillonne, se mélange à l'air et se comporte comme un gaz lourd, dont les frottements sont extrêmement petits, ce qui provoque la formation d'un terrible courant d'air et de neige. Ce sont les avalanches des situations catastrophiques.

On arrive au même genre de *déclenchement spontané par diminution lente de la résistance* de la neige, due à la métamorphose destructive ou à un réchauffement, figure 5b. La courbe intrinsèque s'abaisse jusqu'à ce qu'elle coupe la ligne de pente au point correspondant au poids de la neige.

L'hiver 1963-64 dans les Alpes donne un exemple typique de ce genre de déclenchement. Très froid et pauvre en précipitation solide, la couverture de neige s'était complètement métamorphosée en un échafaudage fragile de cristaux en prismes et en gobelets. Au printemps, un petit réchauffement suffisait à réduire la résistance des couches déjà proches de la limite de l'équilibre pour que des déclenchements se produisent. Il va sans dire que les moindres ébranlements provoquaient aussi des départs. C'est ainsi que se produisit l'avalanche dont furent victimes Barbi Henneberger et Bud Werner, le 12 avril 1964, au val Selin sur Celerina.

La courbe intrinsèque peut être coupée par une augmentation brusque et momentanée des contraintes, causée par un événement comme le passage d'un skieur, la chute d'un paquet de neige ou d'un rocher, ou encore l'effet d'une rupture périphérique, figure 5c. C'est alors un *déclenchement par accident*. Dans ces conditions, l'accident brise la résistance au cisaillement de la strate fragile, qui se réduit subitement à un frottement cinétique égale à $R = \sigma \tan \varphi'$. Dès ce moment, la possibilité du déclenchement dépend de l'étendue de la surface sur laquelle la strate fragile sous-jacente a été brisée, du degré de stabilité et de la compacité de la plaque.

10. LA PROPAGATION DU MOUVEMENT ET LES ACCIDENTS POUVANT PROVOQUER LES DÉCLÈNCHEMENTS

Sur une pente raide de neige meuble, sèche ou mouillée, on peut pousser la neige vers le bas avec les skis. Souvent, rien ne se passe. Mais si on accumule suffisamment de neige, le mouvement se propage.

Quand une couche compacte repose sur une strate moins compacte, le mécanisme du déclenchement de la plaque de neige est possible. Il faut que cette strate sous-jacente soit brisée sur une surface suffisante pour que l'excédent de contrainte libéré puisse briser la strate fragile à l'aval et qu'ainsi le mouvement se propage.

Dès que le degré de stabilité est plus grand que 1, les accidents les plus propices à provoquer un déclenchement sont les ruptures de traction aux parties convexes des pentes. Le choc d'une rupture de traction brise éventuellement la strate fragile sous-jacente, dans le sens de la pente, sur une distance dont la longueur nécessaire pour que la rupture se propage est vite atteinte, figure 6. Si la plaque qui se brise à la traction est molle, le choc est amorti. Plus la plaque est compacte, plus le choc de la rupture est fort et plus il a de chance de briser la résistance au cisaillement de la strate plus fragile sur une distance suffisante. Mais plus la couche est compacte, plus ses ancrages latéraux sont importants car la plaque doit se briser elle-même sur ses bords pour pouvoir se déclencher. Il faut donc que la rupture de traction se fasse sur une largeur d'autant plus grande que la plaque est plus compacte.

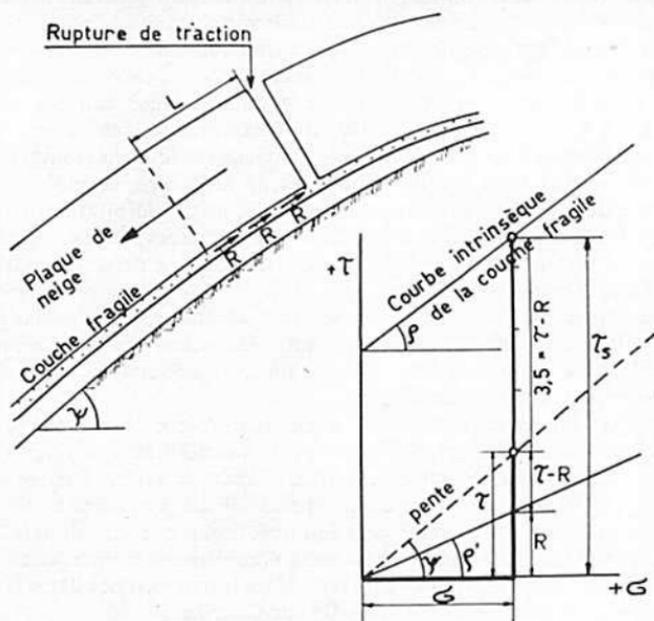


Fig. 6 — Schéma montrant la possibilité de la propagation de la rupture d'une strate fragile, à la suite du choc d'une rupture de traction dans la partie convexe d'une pente.

L'exemple suivant illustre bien l'importance de la rupture de traction. Lors d'un cours d'avalanche de l'armée, pendant la guerre 1939-45, le commandant, à l'époque

le major Jost, avait lancé deux pétards dans la pente du Derby-Schuss de la descente sur Küblis. Les explosions étant restées sans résultat, le commandant déclara qu'il traverserait cette pente avec un régiment. Sur ces mots, un guide de Davos, Hans Kerschbaum était monté au sommet de la pente et en sautant il déclencha une magnifique avalanche. Il avait sans doute provoqué une rupture de traction, qui s'était propagée latéralement sur une longueur plus que suffisante d'après la figure 7.

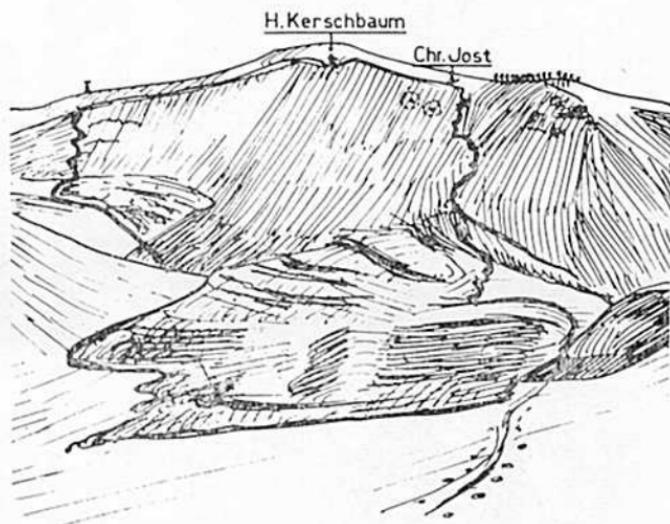


Fig. 7 — Croquis de l'avalanche du Derbyschuss, montrant les emplacements des deux explosions inefficaces et du guide Hans Kerschbaum qui déclencha l'avalanche en sautant, provoquant une rupture de traction.

11. CAS SPÉCIAUX

Les déclenchements provoqués par rupture de compression sont des exceptions, car la neige comprimée augmente de résistance. On a réussi à photographier une plaque de neige fendue en haut et latéralement, rampant lentement sur son fond et retenue uniquement par sa tranche inférieure. Le jour suivant, la plaque s'est brisée à sa partie inférieure et a glissé.

Un exemple de rupture latérale d'une plaque de neige est donné par l'accident du Meyerhofertäli près de Davos le 31 décembre 1955. (Avalanche n° 17).

Cinq skieurs et une skieuse descendent la piste en question. Dans le brouillard, ils sont trop haut dans la pente. Ils se rassemblent, la neige se tasse sous eux et après un temps l'avalanche les emporte. Deux skieurs se dégagent et peuvent raconter ce qui s'est passé.

La cassure de cette avalanche, de 80 cm d'épaisseur, se trouvait près de la crête, dans un couloir étroit. Les mesures donnent un degré de stabilité de 0,93. La plaque de neige ne pouvait être en équilibre sur son fond. Elle était amarrée latéralement dans le couloir. L'explication semble être que l'effondrement de la neige, à l'endroit où les skieurs étaient rassemblés, s'était propagé vers le haut et avait brisé les ancrages latéraux dans le couloir. La masse libérée avait mis la neige de la pente en mouvement.

Avant et après cet accident, aucune autre avalanche ne s'était déclenchée dans ce versant de plus d'un kilomètre de largeur, même à la suite de l'explosion de pétards, lancés de la crête.

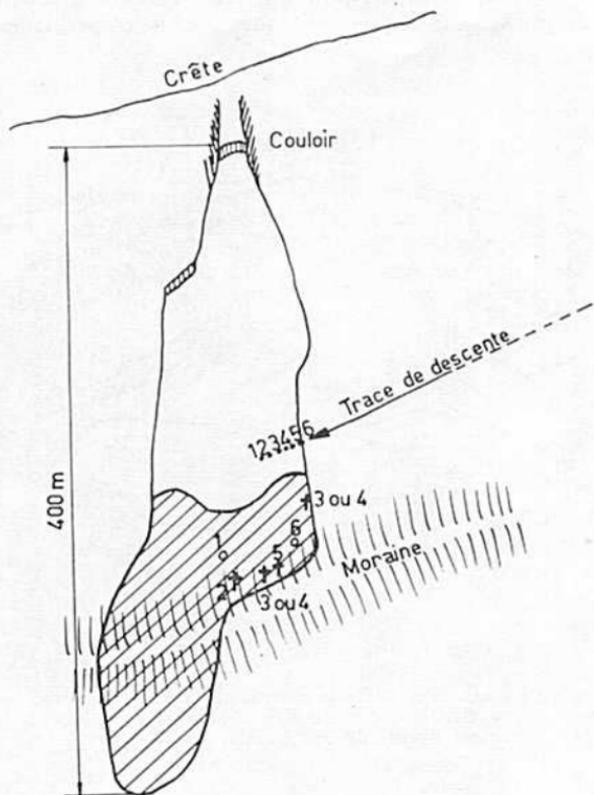


Fig. 8 — Croquis de l'accident du Meyerhofertali du 31.12.1955 (n° 17) :

- Lieu de rassemblement des 6 skieurs;
- ooooo Endroits où furent retrouvés les deux rescapés;
- +++++ Endroits où furent retrouvées les victimes (exemple de déclenchement par rupture latérale).

13. CONCLUSION

J'espère avoir montré la complexité du mécanisme du déclenchement des avalanches et avoir posé quelques jalons pour la compréhension de ce phénomène.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) HAEFELI, R., Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke. *Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau an der Eidgen. Techn. Hochschule* Nr. 2. Edition A. G. Gebr. Lehmann & Co, Zürich und Leipzig (1942).
- (2) HAEFELI, R., Stress Transformations, Tensile Strengths, and Rupture Processes of the Snow Cover. *Ice and Snow*, W.D. Kingery. The M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts (1963).

- (3) BUCHER, Ed., Beitrag zu den Theoretischen Grundlagen des Lawinenverbau. *Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geotechnisch Serie-Hydrologie*, Lieferung 6 (1948).-
- (4) BUCHER, Ed., Diskussionsbeitrag zum Lawinenverbau. *Schweiz Zeitschrift für Forstwesen*, Nr. 1, Jahrgang 1947.
- (5) QUERVAIN, M. de, Die Festigkeits eigenschaften der Schneedecke und ihre Messung. *Geofisica Pura e Applicata — Milano*, Bd. XVIII (Somigliana-Festband), 1950.
- (6) QUERVAIN, M. de, Auftreten und Abklingen der Lawinengefahr in des Schweizeralpen. *Winterbericht des Eidg. Inst. für Schnee- und Lawinenforschung*, 1950-51, Weissfluhjoch/Davos.
- (7) LACHAPPELLE, E. R., Snow Avalanches, a handbook of forecasting and control measures. U.S. Dept of Agriculture, Forest Service, Agriculture Handbook no 194. U.S. Government Printing Office, Washington 1961.
- (8) PAULCKE, W., *Lawinengefahr, ihre Entstehung und Vermeidung*. München (1926).

DISCUSSION

R. HAEFELI — The index of stability is indeed a valuable criteria to estimate the equilibrium of the neutral zone o the snow cover. Unfortunately this index can be applied neither to the tension zone nor to the pressure zone. The stability of snow slabs before the rupture (that is of the tension zone) presents a very complex problem. For the purpose of solving it, a factor of safety can be introduced like in soil mechanics. This factor is the ratio between the tensile strength of the fracture section on the one side and the tensile stress on the other side. The tensile strength can only be ascertained by direct measurement, while the active tensile stress can be calculated approximately (average value) by the creep theory (Der Schnee und seine Metamorphose, Seite...) 1939.

This solution is very rough due to the fact that in reality the weakest point of the fracture line on one hand and the tensile stress of this point on the other hand are decisive for the equilibriums of the slab and should be introduced in the safety factor.

We must take into account that the formation of the snow slab avalanches is in its first approach not a problem of shear strength in the sliding surface but of the tensile strength within the fracture surface. The latter stays vertical (perpendicular) to the slope. The opening of the crack and the failure process is progressive. The breaking down of the sliding layer and the overcoming of the shear strengths along the sliding surface is no longer a static but a dynamic process, due to the heavy shock produced by the opening of the crack.