

L'évolution du manteau neigeux et le déclenchement des avalanches

PAR

F. Delsol

C.E.N. Météorologie Nationale

Introduction

Les différents facteurs qui interviennent dans le mécanisme de déclenchement d'une avalanche sont nombreux : on peut les classer en 4 groupes principaux :

- Les paramètres topographiques : altitude, orientation, pente, courbure du terrain, nature du sol, végétation ; ce sont des éléments stables dans le temps aux érosions et reboisement près.
- Les paramètres météorologiques : précipitation, température, rayonnement solaire et infra rouge, vent et d'autres moins importants.
- Les paramètres nivologiques : épaisseur de la neige, répartition verticale des températures, densités, teneurs en eau liquide, porosité, type de cristaux . . .
- Les paramètres mécaniques : résistance au cisaillement, angle de frottement, cohésion, résistance à la traction, à la compression, viscosité.

Parmi tous ces éléments non indépendants, il en est un primordial : le type de cristal ; il est en effet l'intermédiaire entre les paramètres de nature thermo-dynamiques et ceux de nature mécanique qui définissent l'état de stabilité du manteau neigeux. Il traduit d'abord l'état d'évolution de la neige ; le cristal de neige en effet va dès son arrivée au sol changer de forme en réponse aux conditions nivométéorologiques auxquelles il est soumis, cette métamorphose entraîne alors une modification profonde de ses caractéristiques mécaniques et influe ainsi directement sur la stabilité de la neige.

Aussi choisirons-nous une classification des avalanches qui corresponde directement à ces différents types de cristaux :

- les avalanches de neige récente : les cristaux sont du type neige fraîche : étoiles, plaquettes, etc (+) et par-

ticules reconnaissables (λ). 80 % des avalanches sont de ce type.

- Les avalanches de plaques : les cristaux sont du type grains fins (\bullet) et gobelets (Δ) 75 % des accidents mortels sont dus à des plaques.
- Les avalanches de fontes : les cristaux sont du type grains ronds (\circ).

1 - La stratification de la neige

Au sol la neige s'accumule et constitue un empilement de strates : chaque strate correspond à une chute de neige différente et va évoluer de façon à peu près homogène ; les cristaux qui la composent, restent du même type et traduisent le stade d'évolution auquel elle est arrivée. Ce degré de transformation n'est pas forcément lié à l'ancienneté d'une strate, des inversions peuvent se produire, permettant une assez grande diversité de structures verticales de stabilité très différentes.

2 - Le dépôt de la neige à sa chute

Les cristaux de neige fraîche ont une grande variété de forme, et ils peuvent avoir un comportement mécanique au sol différent suivant qu'ils sont ou non pourvus de dendrites. On comprend intuitivement qu'une étoile peut grâce à ses branches s'accrocher plus facilement qu'une plaquette au sol ou à un autre cristal. Cette cohésion appelée par les nivologues "cohésion de feutrage" est la source même de l'instabilité de la neige fraîche. En effet elle correspond pour les cristaux dendritiques à un angle de frottement statique Φ élevé ($> 80^\circ$ pour une étoile) et un angle de frottement dynamique Φ' faible (environ 20° pour une étoile). Ces valeurs ont deux

conséquences : d'abord les neiges dendritiques s'accumulent plus facilement et sur des pentes plus raides, ensuite les cristaux sont alors en équilibre instable, la moindre source de mouvement (par exemple le vent, une chute de pierre, un skieur) suffira à déclencher le mouvement d'un nombre de cristaux de plus en plus grand : c'est le mécanisme du déclenchement de l'avalanche de poudreuse. Le départ est d'abord ponctuel puis l'avalanche s'élargit, la neige légère ($d \leq 0,1$) se mélange à l'air par turbulence, le mouvement est très rapide (jusqu'à plusieurs centaines de km/h).

3 - Après son dépôt, la métamorphose du cristal de neige

Cette transformation s'explique par deux types d'actions.

D'une part des actions mécaniques : un cristal de neige est fragile, d'autre part le jeu de déséquilibre entre les phases glace, liquide, vapeur qui vont en deux étapes par évaporation, condensation, fonte ou regel, remodeler un nouveau cristal après l'avoir détruit.

A) 1^{ère} étape: la métamorphose destructive

Les deux mécanismes se conjuguent pour provoquer cette destruction :

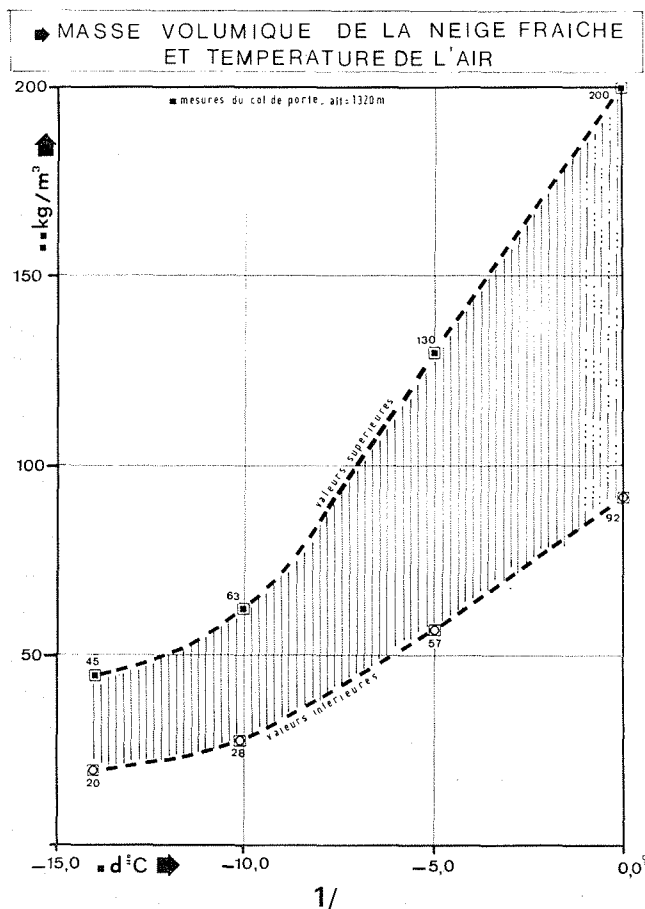
- l'action mécanique : le poids des cristaux qui viennent se déposer sur le manteau augmente les contraintes au sein de la couche et casse les dendrites. Le vent a aussi un effet brisant très rapide et très efficace;

- l'action thermique : la neige est constituée d'air plus ou moins sur-saturé en vapeur d'eau, de cristaux de glace et éventuellement d'eau liquide. Il n'y a pratiquement jamais équilibre entre ces différentes phases et des échanges plus ou moins rapides vont s'établir entre elles.

En l'absence d'eau liquide ($T < 4^{\circ}\text{C}$) seules les phases glace et vapeur sont en présence, et les conditions de déséquilibre vont varier sur le cristal lui-même, les pointes et les parties fines vont tendre à se sublimer, les zones plus épaisses à cristalliser : sous cette action les branches s'émoussent, se coupent, les formes se compactent, se réduisent à des grains plus ou moins anguleux. Cette transformation est lente (ordre de grandeur 8 jours).

En présence d'eau liquide : le même mécanisme s'opère entre la phase liquide et la phase glace, mais la tension superficielle de l'eau liquide provoque un arrondissement beaucoup plus net et la transformation est alors plus rapide (ordre de grandeurs 1 à 2 jours). Le bilan de ces différentes actions est toujours après un stade intermédiaire de cristaux brisés appelés par les nivologues particules reconnaissables (λ), ce que l'on appelle les grains fins (\bullet). La neige au cours de cette destruction se densifie (d passe de 0,1 à 0,2) et se tasse. La figure 2 montre ce tassement en fonction de la température de l'air d'après des mesures du C.E.N. au Col de Porte et au laboratoire de Chamrousse.

L'influence de cette transformation sur les paramètres mécaniques se traduit par la diminution des angles de frottement ϕ statique et ϕ' cinétique ; des avalanches de neige plus ou moins évoluée, se déclenchent, mais en même temps la différence entre ϕ et ϕ' décroît, et la couche de neige tend à se stabiliser.



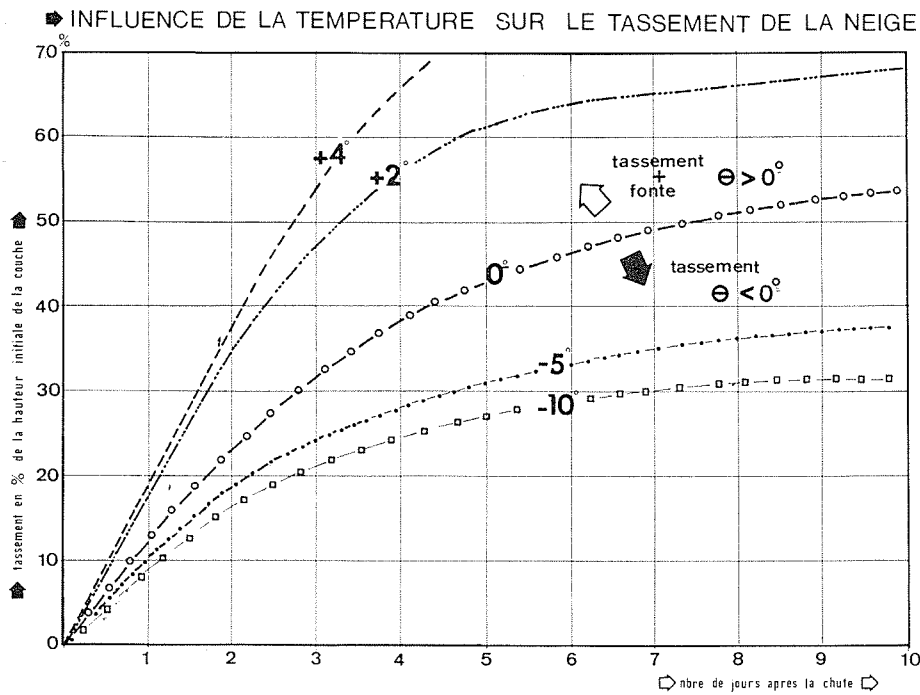
Les avalanches de plaques :

La métamorphose destructive et le tassement ont pour effet de modifier le type de cohésion entre les grains, la neige devient de moins en moins compressible et les grains tendent à se souder les uns aux autres ; le résultat final est une neige en plaque ayant une assez bonne cohésion interne ; la plaque tient alors d'une part grâce à ses ancrages amont, aval et latéraux, d'autre part grâce à son lien avec la couche inférieure et sa stabilité. La rupture de la plaque ou de ses ancrages, provoque l'avalanche si le frottement avec la couche inférieure est suffisamment faible. Deux cas principaux sont à distinguer :

- la plaque repose sur une neige stable, solide, mais le lien avec la couche est mauvais (neige glacée, givre de surface, herbe couchée).
- la couche inférieure est fragile et s'effondre : c'est le cas des plaques à vent et des sous-couches en gobelets.

Cas particulier de la plaque à vent :

La neige transportée par le vent vient se déposer dans les parties à l'abri du vent, et constitue une couche dense et solide de grains fins par dessus une neige moins évoluée qu'elle vient protéger : la structure verticale est instable ; que la plaque vienne à se briser sous l'effet d'une surcharge (nouvelle chute de neige, skieur) et l'ensemble s'effondre. Ces plaques peuvent être de grande dimension, se décrocher sur plusieurs centaines de mètres de largeur, l'épaisseur atteint couramment le mètre.



2/

B) 2^{ème} étape : les métamorphoses constructives

Cette reconstruction d'un nouveau cristal à partir des restes de l'ancien est le jeu exclusif des échanges entre les différentes phases glace-liquide et vapeur. Deux mécanismes fondamentalement différents sont possibles suivant la répartition verticale des températures dans le manteau neigeux. La neige est un très bon isolant thermique; à sa surface, en contact avec l'air, un bilan énergétique s'établit et la température de surface qui en résulte varie fortement entre 0°C et environ -40°C suivant les conditions météorologiques. Au sol, au contraire, l'élément prépondérant est le flux géothermique; il maintient presque toujours une température voisine de 0°C au bas du manteau. Deux cas de figure sont donc possibles, soit une isotherme voisine de 0°C, soit un gradient négatif plus ou moins important, les températures croissant avec la profondeur.

La métamorphose de gradient :

La neige reste toujours un corps très poreux : les neiges fraîches ont une densité comprise entre 0,05 et 0,15, les neiges en grains fins entre 0,15 et 0,30, les neiges les plus évoluées 0,30 à 0,50, la glace 0,9. La figure 3 résume ces valeurs à partir de mesures faites par le C.E.N. Le manteau neigeux contient donc en volume plus d'air que d'eau. Lorsqu'on le soumet à un gradient négatif, cet air sursaturé en vapeur va diffuser lentement du bas vers le haut, rencontrer des grains de plus en plus froids, et condenser par givrage sur ces grains. Les gradients nécessaires pour obtenir ce mécanisme sont inférieurs à -0,1°/cm et peuvent atteindre -1°/cm. La recristallisation s'effectue sur l'ensemble de la couche, les grains deviennent d'abord anguleux (grains à faces planes □) puis se développent jusqu'à ce qu'on appelle la neige en gobelets (∧). Les cristaux ainsi obtenus ont des formes assez diverses suivant la texture initiale de la neige, sa porosité et la température de formation ; (les

neiges trop denses n'évoluent presque pas). La forme la plus courante de ces cristaux est la pyramide hexagonale creuse à laquelle on doit d'ailleurs l'expression "neige en gobelets".

La métamorphose de gradient est une source importante d'accidents en montagne, car elle accroît l'instabilité des

NEIGE DEPOSEE

DISTRIBUTION DE LA MASSE VOLUMIQUE AVEC LE TYPE DE GRAINS

p kg/M ³	%										
	<50	50	100	150	200	250	300	350	400	450	>
+	7%	33%	49%	11%							
∧		2	19	43	22	14					68
●			2	8	20	22	23	17	7	1	117
○					2	6	14	31	33	11	3
∧					11	33	33	18	5		63

NOMBRE DE CAS: 190

3/

plaques; en effet l'échafaudage que constitue une couche de neige en gobelet est mécaniquement instable, car l'arrangement des grains ne correspond pas à la compacité maximale; l'ensemble s'apparente un peu à un château de carte, la moindre perturbation suffit à provoquer son effondrement. Ce danger est sournois parce que caché et durable, il peut persister toute une partie de l'hiver jusqu'au printemps.

La métamorphose de fonte :

C'est le stade ultime de l'évolution, elle correspond à l'isothermie à 0°C: l'eau liquide présente dans le manteau, d'abord en faible quantité (10 %), à cause de la tension superficielle de l'eau liquide arrondit les grains, les angles s'émoussent, une migration s'opère des petits grains vers les gros, les grains tendent aussi à s'agglomérer entre eux, la densité de la neige augmente. Dès qu'il y a regel, les grains se soudent : c'est la neige de printemps, très stable, la plus sûre pour le montagnard.

Si la fonte devient plus importante, ou s'il pleut, la quantité d'eau s'accroît dans le manteau, la neige se ramollit, la viscosité diminue, les liens entre les grains disparaissent, la neige glisse sur le sol d'abord lentement puis lorsque le phénomène s'accroît, l'écoulement se fait de plus en plus vite jusqu'à l'avalanche de fonte,

dernier type d'avalanche avant la fonte totale ou la névéification.

Bibliographie

- AKITAYA — Expérience sur le grossissement du givre de profondeur — Conférence de Sapporo 1966
- DAVID (P.), AUDIBERT (J.P.), PAHAUT (E.) — Enregistrement continu du glissement de la neige sur une pente herbeuse — Note EERM N° 355
- DELSOL (F.), PAHAUT (E.) POUATCH (B.) — Etude de la formation du givre de profondeur — Note EERM N° 353 sept. 74.
- DE QERVAIN — Structure de la neige, flux de chaleur et de masse. Banff 72.
- LLIBOUTRY (L.) — Traité de glaciologie (1965)
- PAHAUT (E.) — Les cristaux de neige et leur métamorphose. *Mono-graphie N° 96* de la Météorologie Nationale.
- REY (L.) — Les mesures dans le manteau neigeux et les avalanches — Compte rendu du Colloque de Briançon — *Revue ANENA* N° 11 juin 75
- ROCH (A.) — Analyse du mécanisme du déclenchement des avalanches — *Revue ANENA* N° 10 — avril 75
- SOMMERFLED — LA CHAPELLE. The classification of snow metamorphism

Discussion

Président : M.L. de CRECY

M. le Président remercie M. DELSOL pour son intéressant exposé et pour la très belle collection de diapositives qui l'a illustré. Il ouvre ensuite la discussion.

M. ROCH souligne la nécessité de ne pas confondre la compressibilité et la résistance d'une couche de neige. Lorsque la surface d'une couche de neige reste en place un mois ou un mois et demi, elle se transforme et perd de sa compressibilité; ainsi des couches tombées au début de l'hiver se transforment et restent fragiles pendant toute la saison froide. Les couches tombées plus tard vieillissent elles aussi en devenant plus compactes alors que les couches inférieures (de début d'hiver), métamorphosées, ne peuvent plus se compacter notablement. C'est bien là ce qu'a dit M. DELSOL dans des termes un peu différents.

Le cas le plus critique survient, répond M. DELSOL, lorsqu'il y a une strate supérieure relativement comprimée alors que la couche inférieure de l'est pas.

Par exemple, sur un versant nord, une chute de neige commence à tomber alors qu'il n'y a guère de vent. Puis le vent se met à souffler; la strate qui vient par dessus a tendance à être beaucoup plus rigide, moins compressible. Mais la strate qui est dessous ne se comprime pas toujours; elle conserve souvent une certaine compressibilité.

Quel est l'objectif des prévisions envisagées, demande M. CAZENAVE? S'agit-il de prévisions à long terme, comme guide pour des travaux d'équipement, ou à court terme au niveau de "l'exploitation".

Ces prévisions sont faites, répond M. DELSOL, pour une échéance de 36 heures dans les Alpes et 48 heures dans les Pyrénées, ce sont des prévisions à court terme. On peut, néanmoins, évaluer les risques

à long terme par l'étude de la formation de la sous-couche (premières neiges) et parler de bons ou de mauvais hivers; par exemple, l'hiver 74-75 a permis une bonne stabilisation de la sous-couche et il y a eu peu d'accidents; l'inverse, l'hiver 75-76 a été très meurtrier parce que la sous-couche s'était métamorphosée en gobelets dans les versants nord.

On peut aussi, observe M. le Président, envisager des prévisions à long terme pour les besoins de l'équipement sur une zone donnée. Toutes les conditions étant envisagées au pire (enneigement, météorologie, etc...), il s'agit de savoir si telle zone peut dans les 50 ans suivants être ou non atteinte par une avalanche; cela ressortit de la cartographie des avalanches en même temps que des conditions météorologiques extrêmes.

Au contraire, les prévisions faites par la Météorologie tendent à répondre à la question: "faut-il ouvrir ou fermer une piste de ski"?

De quels critères dispose un skieur arrivant devant une plaque à vent pour savoir si celle-ci est dangereuse ou non? demande M. GUILLOT. Cette question provoque un débat sur les risques encourus par les skieurs et sur la meilleure façon de les en avertir, au cours duquel interviennent MM. ROCH, DELSOL, PLAS, VALLA. La conclusion n'en est pas très claire et M. le Président conclut par un résultat d'expérience:

"Statistiquement, la fréquence maximum des avalanches — et des accidents consécutifs à ces dernières — se place au cours des week-ends... parce que durant ces derniers, le nombre de personnes se trouvant sur les champs de neige est aussi maximum..." Les week-ends consécutifs à d'abondantes chutes de neige sont les plus dangereux.