

Rappels de nivologie

Daniel Goetz¹

***Résumé.** La survenue d'une avalanche résulte de la conjonction de trois facteurs : la présence d'une certaine épaisseur de neige dans une pente d'inclinaison suffisante, le caractère instable de tout ou partie de cette épaisseur de neige et la rupture de cet équilibre instable. Pour comprendre chacun de ces facteurs, il est nécessaire de bien connaître d'une part la neige et ses propriétés, d'autre part les avalanches et leurs mécanismes.*

L'étude de la neige s'étend depuis sa formation dans l'atmosphère jusqu'à sa disparition par fonte une fois au sol. L'étude du processus de formation de la neige dans l'atmosphère fait apparaître qu'elle peut se présenter sous l'une des trois formes principales suivantes : aiguille/colonne, plaquette et étoile, forme sous lesquelles elle tombe au sol.

Puis, entre ce stade initial de formation et celui final de fonte, la neige déposée va subir plusieurs types de transformations. La "neige fraîche" subit tout d'abord une phase de destruction mécanique plus ou moins poussée, qui la transforme en "particules reconnaissables". La destruction est due d'abord au vent, qui souffle fréquemment en montagne, et qui va casser les cristaux de neige, modifiant ainsi leur forme, et compacter la neige. Cette phase de destruction est également causée par le poids de la neige, lorsque celle-ci continue à s'accumuler au-dessus.

Ensuite, la neige subira des transformations d'origine thermodynamique, durant lesquelles des transferts de glace vont se faire au sein d'un même grain de neige ou bien entre grains différents, en utilisant le mécanisme des changements de phase solide-liquide ou solide-vapeur, dans un sens et dans l'autre.

Un des types de transformation d'origine thermodynamique est celui qui s'opère en neige humide, avec une température de la neige égale à 0°C. Il met en œuvre le changement de phase solide-liquide. Il est à la fois unique, simple, rapide et irréversible : il s'agit de la métamorphose de fonte, qui transforme tout type de neige en "grains ronds".

Lorsque la neige est sèche, donc à température strictement négative, le mécanisme thermodynamique en jeu fait appel au changement de phase solide-vapeur. Dans ce cas, les transformations possibles sont multiples, d'une manière générale beaucoup plus lentes, et, pour certaines d'entre elles, réversibles. Elles aboutissent à une transformation progressive mais radicale de la forme des grains de neige, ainsi que des liaisons de ces grains entre eux, ce qui a des conséquences importantes sur la cohésion de la neige et sa résistance. Ces transformations, appelées "métamorphoses", sont au nombre de trois. C'est le gradient vertical de température au sein de la neige qui va déterminer laquelle va se produire :

- si ce gradient est faible, les grains de neige vont prendre une forme allongée et se souder entre eux. On obtient alors, au bout de plusieurs jours, des petits grains de bonne cohésion, appelés "grains fins" ;
- si le gradient est assez important (on le qualifie alors de "moyen"), on obtient dans ce cas, au bout de un à trois jours, des grains assez gros, plats et présentant des angles : les "faces planes". Contrairement aux grains fins, ils ne sont pas soudés entre eux ; leur cohésion est donc mauvaise ;
- si le gradient est fort, il se forme dans un premier temps également des faces planes ; mais celles-ci continuent à grossir, et évoluent vers des grains très gros, striés et creux : les "gobelets". Comme les faces planes, ils ne sont pas soudés entre eux ; leur cohésion est en conséquence également mauvaise, encore plus mauvaise que celle des faces planes.

¹ Météo France, Centre d'Études de la Neige, F-38400 Saint-Martin-d'Hères
Tél. : +33 (0)4 76 63 79 26 ; fax : +33 (0)4 76 51 53 46 ; e-mail : Daniel.Goetz@meteo.fr

La réversibilité de ces métamorphoses si le gradient de température dans la neige change dépend du type de grain : la transformation grains fins-faces planes est réversible ; en revanche, la transformation faces planes-gobelets ou grains fins-gobelets ne l'est pas : seule la métamorphose de fonte pourra faire évoluer des gobelets (en grains ronds).

Ainsi, à peine déposée au sol, la neige évolue plus ou moins rapidement vers un des différents types de grains possibles. En conséquence, et parallèlement, ses propriétés physiques (mécaniques et thermiques) évoluent elles aussi. C'est ce qui explique que l'on peut rencontrer autant de types de neiges aux qualités si différentes.

Pour caractériser un type de neige, sa masse volumique est une grandeur fondamentale. Elle est très variable selon la neige : le rapport entre la plus légère et la plus lourde des neiges est en effet de l'ordre de 20. L'âge de la neige est un facteur d'évolution important de ce paramètre : aux neiges récentes les faibles masses volumiques, aux neiges anciennes les fortes masses volumiques. Le phénomène de tassement est la première explication de ce constat. Les métamorphoses que subissent les grains de neige font aussi évoluer la masse volumique, mais de manière plus ou moins marquée selon le type de métamorphose. Enfin, le vent, selon sa force et sa durée, provoque également une augmentation plus ou moins importante de la masse volumique de la couche de neige de surface.

La teneur en eau liquide de la neige est un autre paramètre important pour qualifier une neige. Lorsqu'elle est nulle, cela signifie que l'on est en présence de neige sèche. Si elle n'est pas nulle, la neige est humide, et sa température est exactement de 0°C. La cohésion d'une neige humide dépend fortement de sa teneur en eau liquide : si elle est faible, la neige a une assez bonne cohésion et est collante ; si elle est plus importante, la cohésion devient rapidement mauvaise, voire très mauvaise lorsque la neige est gorgée d'eau.

Parmi les caractéristiques mécaniques de la neige, la cohésion en est une capitale. Pour la neige, elle peut être de l'un des quatre types suivants :

- cohésion de feutrage ; elle concerne la neige fraîche ou très récente, elle est faible et peu durable ;
- cohésion de frittage ; elle concerne les particules reconnaissables et surtout les grains fins, elle est souvent élevée et durable ;
- cohésion capillaire ; elle concerne les grains ronds humides, elle est assez bonne si la teneur en eau liquide de la neige est faible, mauvaise dans le cas contraire ;
- cohésion de regel ; elle concerne les grains ronds regelés, elle est élevée, voire très élevée.

L'importante capacité de la neige à se tasser est typique de ce matériau ; elle provient de la grande quantité d'air que contient la neige (entre 50 et 90 %). Elle est cependant très variable selon le type de neige : une neige récente, légère, se tasse beaucoup plus, et beaucoup plus rapidement, qu'une neige ancienne, déjà dense.

Une autre propriété mécanique est également caractéristique de la neige : sa bonne résistance à des forces de compression (qu'elle subit dans les zones de terrain concaves comme les bas de pentes) et, au contraire, sa très mauvaise résistance à des forces de traction (qu'elle subit dans les zones de terrain convexes comme les ruptures de pente).

En ce qui concerne les propriétés thermiques de la neige, il faut d'abord retenir que celle-ci est un excellent isolant, à cause de la grande quantité d'air qu'elle contient. Il faut également savoir qu'elle a une faible capacité calorifique : la neige se réchauffe ou se refroidit facilement. Son comportement dans le domaine radiatif est également particulier :

- vis-à-vis du rayonnement solaire, elle en réfléchit la majeure partie, grâce à son albédo élevé. Cependant, celui-ci varie avec le type de neige : effectivement très élevé dans le cas de la neige fraîche (90 %), il l'est moins dans le cas d'une vieille neige constituée de grains ronds (50 %) ;
- dans le domaine de l'émission de rayonnement infrarouge, la neige se comporte comme un corps noir, émettant, donc perdant, constamment une grande quantité d'énergie.

L'ensemble de ces propriétés explique l'existence de gradients de température importants au sein de la neige.

Les échanges neige/atmosphère sont fortement influencés par ces propriétés thermiques de la neige spécifiques. Dans ce domaine entrent également en jeu les paramètres et phénomènes atmosphériques, comme la température et l'humidité de l'air, ainsi que le vent (qui joue le rôle d'un accélérateur des échanges thermiques). Les précipitations, tant solides que liquides, ont également une influence importante sur les transformations de la neige. Quant au flux thermique de sol, qui touche la base du manteau neigeux, son influence est très limitée car, bien qu'il soit permanent, sa puissance est faible. Il est capable de réchauffer la base du manteau neigeux jusqu'à 0°C, mais est bien incapable de la faire fondre : le manteau neigeux fond toujours par le haut.

L'analyse du phénomène avalanche passe par celle de l'équilibre d'un bloc de neige sur une pente. Celui-ci est assuré tant que les forces de résistance qu'il peut développer (forces de cohésion, de frottement et d'ancrage au sol et latéraux) arrivent à équilibrer la force de traction qui tend à l'entraîner vers l'aval, à savoir la composante de son poids parallèle à la pente. Cette analyse permet de comprendre les causes possibles de rupture de cet équilibre, et donc le départ en avalanche.

Cette rupture peut avoir deux causes : augmentation des forces de traction vers le bas ou bien diminution des forces de résistance de la neige. L'augmentation des forces de traction peut être due à une nouvelle chute de neige ou de pluie qui va alourdir la neige en place ; ce peut être aussi le passage d'un skieur, la chute d'une corniche ou l'effet d'un explosif. La diminution des forces de résistance peut être occasionnée par une perte de cohésion de la neige (due, par exemple, à une importante humidification de celle-ci), par une diminution des forces de cohésion inter-strates (provenant généralement de la percolation d'eau liquide dans le manteau neigeux), ou par un affaiblissement des ancrages latéraux de la neige (le plus généralement par fonte).

Les avalanches peuvent être classées en différents types, qui font référence au type de neige au départ de l'avalanche, donc au type d'instabilité et de rupture de l'équilibre. On en distingue essentiellement trois :

- l'avalanche de neige récente, pour laquelle c'est généralement l'accumulation en trop grande quantité d'une neige de très faible cohésion qui est à l'origine du départ. Un cas particulier est l'avalanche de poudreuse, caractérisée par un aérosol pendant l'écoulement ; pour cela, il faut à la fois une neige très légère et une pente d'inclinaison et de longueur suffisantes ;

- l'avalanche de plaque, dont le déclenchement nécessite à la fois une structure instable particulière du manteau neigeux (la "structure de plaque"²) et la survenue, à un moment donné, d'une surcharge, qui peut n'être que très brève et faible comparée au poids d'une plaque : passage d'un skieur, chute d'une corniche, souffle d'une explosion. On distingue l'avalanche de plaque friable, si la plaque se disloque complètement durant l'écoulement, du fait d'une assez faible cohésion de la neige constituant la plaque, et l'avalanche de plaque dure dans le cas contraire où l'on retrouve des blocs de neige dure dans le dépôt ; sous nos climats, c'est essentiellement le vent qui est à l'origine de la formation des plaques ;

- l'avalanche de neige humide (ou de fonte), pour laquelle c'est la perte de cohésion due à l'apparition d'eau liquide en trop grande quantité qui est à l'origine de la rupture de l'équilibre.

Dans la réalité, les choses sont souvent moins simples, avec d'une part des avalanches dont les caractéristiques appartiennent à un type d'avalanche pour certaines et à un autre type d'avalanche pour d'autres, et d'autre part des avalanches dont le type change entre le début et la fin de l'écoulement (par exemple avalanche de neige récente au départ, se terminant en avalanche de fonte au niveau de la zone d'arrivée).

Il faut également savoir que certains paramètres liés au terrain peuvent aggraver le risque de départs d'avalanches : angle et profil de pente, nature du sol et de la végétation, exposition au soleil et aux vents.

² une structure de plaque est un empilement d'une ou plusieurs couches présentant une cohésion de type frittage (particules reconnaissables denses et/ou grains fins) sur une couche fragile constituée de grains de neige sèche de faible cohésion (telle que neige fraîche, particules reconnaissables peu denses, faces planes, gobelets, givre de surface enfoui).

Nivology reminds

Daniel Goetz³

Summary. The occurrence of an avalanche results from a combination of three factors: the presence of a certain quantity of snow on a steep enough slope, the unstable nature of all or part of this snow and the rupture of the unstable equilibrium. To understand each of these factors, it is necessary to know on the one hand snow and its properties, on the other hand avalanches and their mechanisms.

Study of snow extends from its formation in the atmosphere to its disappearance by melting once on the ground.

Studying the process of formation of snow in the atmosphere shows that it can be in one of the following three shapes: needle / column, plate, stellar / dendrite, shape in which it falls to the ground.

Then, between this initial stage and the final melting one, the deposited snow will undergo several types of transformations. The "new snow" first undergoes a more or less advanced phase of mechanical destruction, which transforms it into "decomposing and fragmented precipitation particles". The destruction is primarily due to the wind, which blows frequently in the mountains and breaks the snow crystals, changing its shape and compacting it. This phase of destruction can also be caused by the weight of snow when it keeps on accumulating on top.

Then the snow will undergo changes of thermodynamic origin, during which ice transfers will take place within a single snow grain or between different grains, using the mechanism of solid-liquid or solid-vapour phase change, in both directions.

An example of thermodynamic transformation occurs in wet snow, i.e. a snow at 0°C. It involves the solid-liquid phase change. It is unique, simple, fast-acting and irreversible: it is the melt metamorphosis, which transforms any type of snow in "melt forms".

When the snow is dry, thus at strictly negative temperature, the involved thermodynamic mechanism uses the solid-vapour phase change. In this case, there are several possible transformations, which are generally much slower, and, for some of them, reversible. They lead to a gradual but radical transformation of the snow grains shape, as well as links of these grains together, which has important consequences for snow bounding and strength. These transformations, called "metamorphoses" are three in number, depending on the vertical temperature gradient within the snow:

- *if this gradient is low, snow grains will take a rounded and elongated shape and will weld together. We obtain after several days small very bounded grains called "rounded grains";*
- *if the gradient is large enough, we obtain in this case, after one to three days, fairly large and flat grains with angles: the "faceted crystals". Unlike rounded grains, they are not welded together, their bounding is poor;*
- *if the gradient is large, faceted crystals also formed initially, but they continue to grow and evolve into very large striated and hollow skeleton grains: the "depth hoar". As the faceted crystals, they are not welded together; their bounding is therefore low too, even lower than the one of faceted crystals.*

The reversibility of these metamorphoses if the temperature gradient in the snow changes depends on the type of grain: the metamorphosis rounded grained into faceted crystals is reversible; however, the metamorphoses faceted crystals into depth hoar and rounded grains into depth hoar are not reversible: only the wet metamorphosis may evolve depth hoar (into melt forms).

Thus, as soon as it reaches the ground, snow evolves more or less quickly into different possible types of grain. Consequently, in parallel, its physical properties (both mechanical and thermal) also evolve. This explains why we can meet so many types of snow with so different qualities.

³ Météo France, Centre d'Études de la Neige, F-38400 Saint-Martin-d'Hères
Tél. : +33 (0)4 76 63 79 26 ; fax : +33 (0)4 76 51 53 46 ; e-mail : Daniel.Goetz@meteo.fr

To characterize the snow, density is a key item. It varies a lot depending on the snow: the ratio between the lightest and the heaviest one is about 20. The age of snow is an important factor in the evolution of this parameter: recent snows have low densities, old ones have heavy densities. Settlement explains first this finding. Snow grains metamorphoses also change the density, but to a greater or lesser extent depending on the type of metamorphosis. And last but not least the wind, according to its speed and duration, also causes a more or less large increase of density of surface snow.

Water content is another important parameter to describe the snow. When equal to zero, it means that we deal with dry snow. If it is not zero, the snow is wet and its temperature is exactly 0° C. Bounding of a wet snow highly depends on the water content: if it is low, snow has a quite good bounding and is sticky; if it is more important, bounding is quickly becoming poor, or very poor when snow is water-saturated.

Among the mechanical properties of snow, bounding is a capital property. For snow, bounding can be one of these four types:

- felting bounding; it concerns new snow, it is weak and not lasting;
- sintering bounding; it concerns decomposing and fragmented precipitation particles and especially rounded grains; it is often high and lasting;
- capillary bounding; it concerns wet state of melt forms; it is quite good if water content of snow is low, it is low otherwise;
- freeze bounding; it concerns frozen state of melt forms; it is high or very high.

The large capacity of the snowpack to settle is typical of this material ; it comes from the large amount of air present in the snow (between 50 and 90%). It is however very variable depending on the type of snow: a recent and light snow settles much more and much faster than an old snow, already dense.

Another mechanical property is also a typical feature of snow : its rather high strength to compressive forces (snow undergoes compressive forces in concaves areas like foots of slopes) and, on the contrary, its very low strength to tensile forces (it undergoes tensile forces in convex areas where the incline changes).

Regarding the thermal properties of snow, we must first learn that snow is an excellent insulator, because of the large amount of air in it. We should also be aware that it has a low heat capacity: snow gets easily warmer or cooler. Its behaviour in the radiative field is also particular:

- with regard to solar radiation, snow reflects the major part of it, thanks to its high albedo. However, albedo varies with the type of snow : it is actually very high for new snow (90%), but it is lower in the case of an old snow with melt forms (50%);
- in the field of infrared radiation emission, snow behaves as an emitting black body, always losing a lot of energy.

All these properties explain why there are large temperature gradients in snow.

Snow / atmosphere exchanges are strongly influenced by these specific thermal properties of snow. In this area also come into play atmospheric parameters and phenomena such as air temperature, air moist and wind (which acts as an accelerator of heat exchanges). Precipitations, both solid and liquid, also have significant influence on snow transformations. As for the soil heat flux, which affects the bottom of the snowpack, its influence is very limited because, although it is permanent, its power is low. It can heat the base of the snowpack to 0° C but is unable to melt it: the snow always melts by the top.

The analysis of the avalanche phenomenon requires to analyse the equilibrium of a snow block on a slope. The block is balanced as long as strength forces that it can develop (bounding forces, friction forces, ground and side anchorage forces) can balance the tensile force that tends to carry it downhill, namely the parallel to slope weight component. This analysis helps to understand the possible causes of failure of this balance, and thus the avalanche release.

This failure may have two causes: increase of forces pulling downhill or decrease of snow strength. The increase of forces pulling downhill may be due to a new snowfall or rainfall, which will load down the present snow; this increase also happens when a recreationist passes, when a cornice falls down or an explosive is triggered. The decrease of snow strength can come from a bonding decrease in the snow (due for example to significant water content increase), from a decrease of between-strata bonding forces (generally coming

from water percolation in the snowpack), or from a weakening of lateral anchors of snow (most commonly due to melting).

Avalanches can be classified regarding to the type of snow in the avalanche starting zone, so to the type of instability and the type of balance failure. We mainly distinguish three types of avalanches:

- new snow avalanches; they are usually caused by too much accumulation of low bounding new snow. A special case is the powder avalanche, characterized by a powder cloud during the flow; and for this it requires both very light snow and a slope with a sufficient steepness and a sufficient length;*
- slab avalanches; their triggering needs both a particular unstable snowpack structure (called "slab structure") and the occurrence of an overloading, which can be very short and weak compared to the weight of the slab: when a recreationist passes, when a cornice falls down, when an explosive is triggered. We distinguish friable slab avalanches, if slab is completely broken up in the flow, due to a rather low bounding of the slab snow, and hard slab avalanches in the opposite case, when we find hard snow blocks in the deposit; in our climates, slab forming is essentially caused by the wind;*
- wet snow avalanches; when there is too much water in snow, bounding decreases strongly and such avalanches releases.*

In fact, things are often not so straightforward: in the one hand there are avalanches whose some typical features belong to a certain type of avalanche and others typical features to another type of avalanche, and on the other hand there are avalanches whose type changes between the beginning and the end of the flow (e.g. new snow avalanche at the beginning, ending wet snow avalanche at the arrival area).

It should also be noted that some terrain parameters may increase the frequency of avalanche releases: e.g. slope incline and slope profile, kind of soil and vegetation or sun and wind exposures.

1. La neige, formation et évolution

1.1. Les processus de condensation

1.1.1. Les différents états de l'eau

L'eau existe sous trois états, aussi appelés formes ou phases :

- solide (glace)
- liquide (eau)
- gazeux (vapeur d'eau). La vapeur d'eau est un gaz incolore et invisible (à ne pas confondre avec la buée, constituée de gouttelettes microscopiques).

Les passages d'un état à l'autre (fig. 1) s'accompagnent d'absorption ou de dégagement de chaleur (chaleur latente).

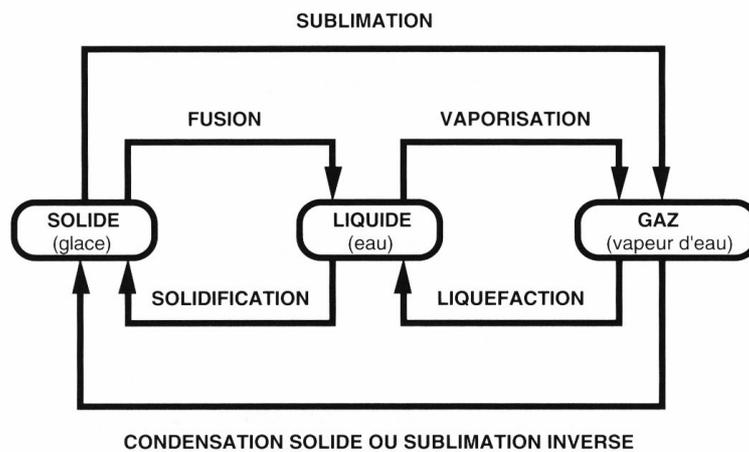


Figure 1 : Les différents changements d'état de l'eau

1.1.2. La saturation

Dans l'atmosphère l'eau existe sous ses trois phases. Les nuages sont formés de gouttelettes ou de cristaux de glace, ou des deux à la fois et apparaissent lorsque l'air est saturé en vapeur d'eau.

La saturation intervient lorsque l'air atteint sa capacité maximale de contenu en vapeur d'eau qui ne dépend que de sa température. La valeur maximale de contenu en vapeur d'eau étant atteinte, toute quantité supplémentaire se condense alors sous forme solide ou liquide.

T °C	+ 20°	+ 10°	0°	- 5°	- 10°	- 20°
Q/eau	17,2g/m ³	9,4g/m ³	4,8g/m ³	3,4g/m ³	2,4g/m ³	1,1g/m ³
Q/glace	-	-	4,8g/m ³	3,3g/m ³	2,2g/m ³	0,9g/m ³

Valeurs maximales de contenu en vapeur d'eau de l'air (par m³) en fonction de la température (au-dessus d'une surface plane d'eau ou de glace)

Remarque :

Plus une masse d'air est chaude, plus elle peut contenir de vapeur d'eau.

Imaginons une particule d'air dont la température est de +20°C et contenant 9,4 g de vapeur d'eau par m³, elle n'est pas saturée. Si elle subit un refroidissement (ascendance, contact avec un sol froid...), abaissant sa température à +10°C, elle devient alors saturée (cf. tableau). Si le refroidissement se poursuit jusqu'à 0°C, il s'en suivra une condensation du "trop plein" de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes et la quantité d'eau liquide présente dans la particule d'air sera alors de 4,6 g par m³ (9,4 g - 4,8 g).

1.1.3. Conditions de condensation liquide et solide

Pour qu'il y ait réellement condensation, la saturation en vapeur d'eau n'est pas suffisante. En effet, le phénomène n'a lieu qu'en présence d'éléments microscopiques sur lesquels peut se produire la condensation. Ceux-ci sont de deux types :

- Les noyaux de condensation :

Ce sont des particules dont le diamètre est de l'ordre de 0,01 à 2 microns (sels, particules organiques, poussières industrielles).

- Les noyaux de congélation :

D'un diamètre de l'ordre de 0,1 à 10 microns, ils se distinguent des noyaux de condensation par leur grosseur et une structure généralement cristalline, comparable à celle de la glace.

Aux températures comprises entre 0 et -12°C, la condensation se fait essentiellement sous forme liquide sur ces noyaux, quel que soit leur type. Ce phénomène de persistance d'eau liquide à température négative est appelé phénomène de surfusion. Ce n'est qu'au-dessous de -12°C que les noyaux de congélation deviennent actifs et permettent la solidification des gouttelettes en **germes** de glace de forme hexagonale. Le nombre de noyaux de congélations devenant actifs augmente avec l'abaissement de température. Les gouttelettes formées sur les noyaux de condensation restent liquides jusqu'à -40°C. En dessous de cette température, elles se solidifient toutes à leur tour.

1.1.4. Formation des cristaux de neige et grossissement :

Les germes de glace se développent en cristaux de neige par condensation solide de la vapeur d'eau en excédent dans le nuage. Cet excédent provient surtout de l'état de saturation mais aussi de l'évaporation de certaines gouttelettes en surfusion et de la sublimation de plus petits cristaux. Cela est dû au fait que la coexistence entre les gros cristaux, les plus petits cristaux et les gouttelettes surfondues est un

état instable. En résumé, les plus gros cristaux grossissent aux dépens des gouttelettes et des plus petits cristaux.

1.2. La neige fraîche (symbole +)

1.2.1. Les types de croissance

Le cristal initial ou germe est un cristal de forme hexagonale. Suivant les températures qui règnent pendant son grossissement, certaines de ses parties ont une croissance privilégiée. Cela donne naissance à des cristaux typiques (figure 2).

Les parties privilégiées peuvent être :

- les bases \Rightarrow cristaux de type aiguille ou colonne
- les faces latérales \Rightarrow cristaux de type plaquette
- les arêtes \Rightarrow cristaux bien connus de type étoile.

Selon leurs séjours dans une ou plusieurs plages de températures différentes, les cristaux de neige peuvent avoir des formes combinées diverses, parfois complexes, dues aux différents types de croissance subis.

Les différents types de croissance (fonction de la température)

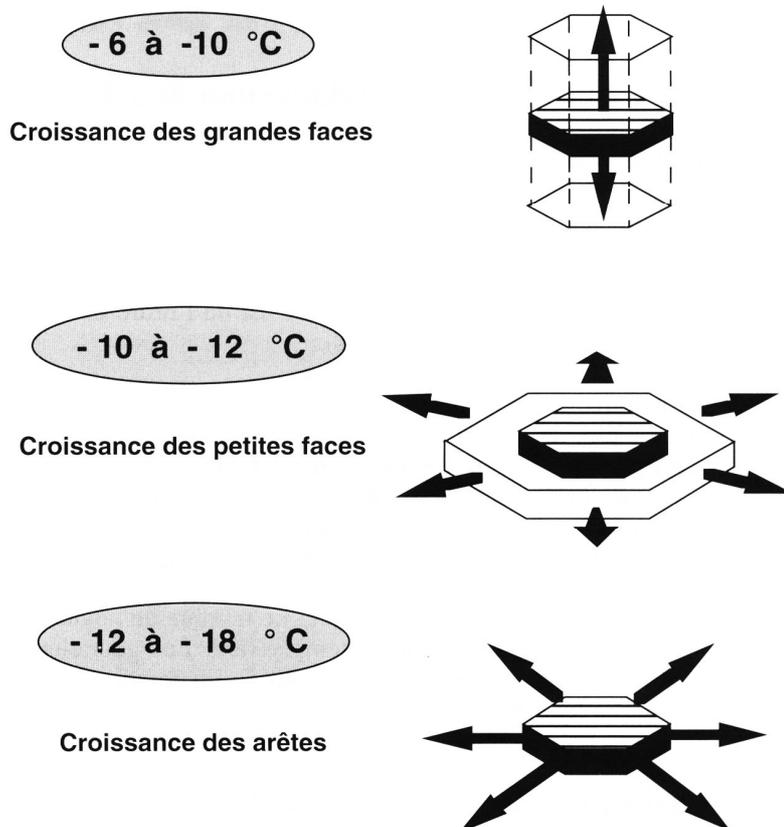


Figure 2 : Les différents types de croissance à partir du germe de glace

1.2.2. Les différents types de cristaux

Les formes des cristaux observés peuvent faire l'objet d'une classification. Celle établie par l'O.M.M.(Organisation Météorologique Mondiale) est la plus utilisée (figure 3).

Parmi les cristaux de cette classification, le cristal particulier qu'est la **neige roulée**, fréquente en hiver, nécessite quelques précisions. Ce type de neige se forme dans des masses nuageuses turbulentes contenant des cristaux de glace et des gouttelettes surfondues. Au gré des turbulences, les gouttelettes entrent en contact avec les cristaux sur lesquels elles se congèlent. Dans les masses nuageuses très turbulentes (cumulus, cumulonimbus), ce phénomène est intense et dure assez longtemps pour que le cristal disparaisse complètement sous une gangue de petites particules sphériques de glace opaque. Le cristal de neige roulée a la forme d'une boule de mimosa. De par la nature des nuages où elle se forme, la neige roulée tombe la plupart du temps sous forme d'averse.

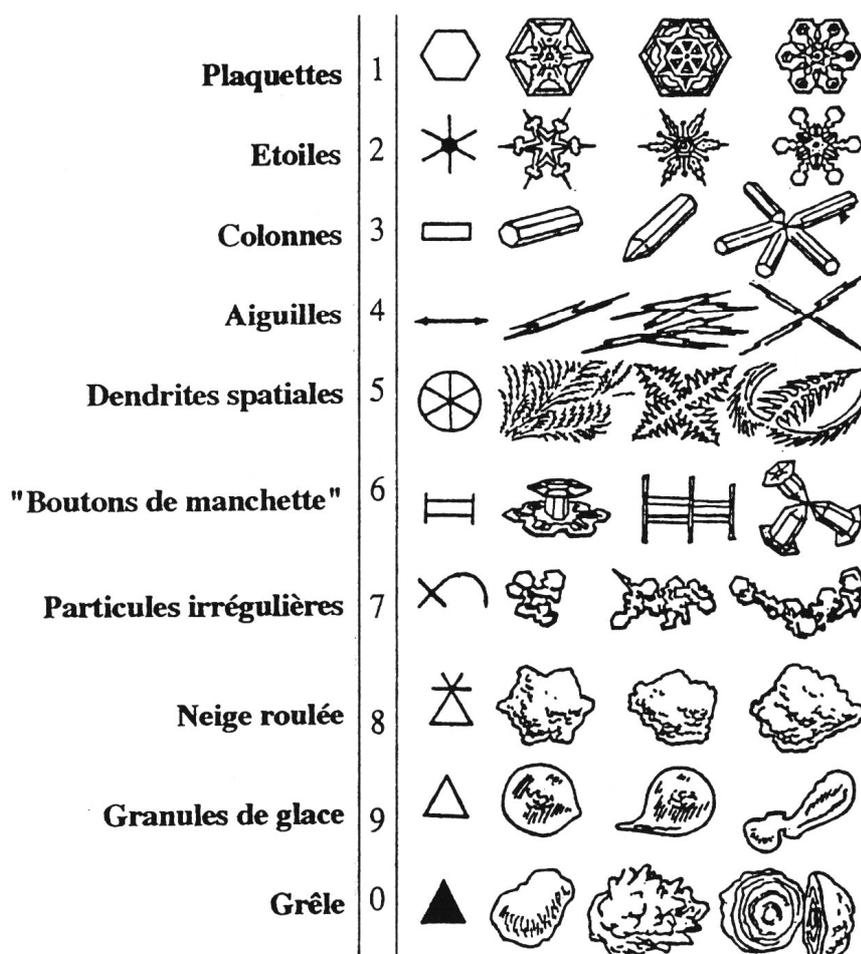


Figure 3 : Tableau de classification des cristaux de neige fraîche selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (O.M.M.)

Au sein du manteau neigeux, ces cristaux ne subissent que peu de transformations et constituent, de par leur forme sphérique et l'absence de cohésion entre eux, des plans de roulement et de glissement très favorables au déclenchement des avalanches.

Une autre cristal, non mentionné dans ce tableau présente aussi un certain danger potentiel : le **givre de surface** (symbole ∇). Le processus de sa formation est le suivant : lorsque le ciel est dégagé la nuit, la surface de la neige subit un refroidissement important. L'air situé à son contact se refroidit aussi et parvient parfois à la saturation en vapeur d'eau. Celle-ci se condense alors en paillettes de givre sur les cristaux de surface. Elles peuvent atteindre des dimensions de plusieurs cm. Couchées par les chutes de neiges ultérieures, elles pourront constituer aussi un plan de glissement idéal pour le déclenchement des avalanches.

1.3. Influence des conditions atmosphériques au cours des chutes de neige

Lorsque les cristaux de neige agglomérés en flocons sont suffisamment lourds pour vaincre les courants ascendants qui règnent dans le nuage (quelques cm/s à quelques m/s), ils tombent.

Si les températures restent négatives jusqu'au sol, les flocons s'y déposent et persistent pour constituer le manteau neigeux.

Mais au cours de leur chute, les flocons subissent l'influence de deux paramètres météorologiques importants : le vent et la température.

1.3.1. Action du vent :

Celui-ci exerce une action mécanique importante sur les cristaux. Il augmente en effet les chocs entre eux, provoquant la cassure des structures fragiles.

Quand le vent est fort, cet effet est important et les cristaux de neige se fragmentent en petites particules de glace. Elles sont d'autant plus petites que le vent est plus fort. Au moment du dépôt, ces petites particules se soudent rapidement entre elles par de nombreux ponts de glace. Ce phénomène, expliqué au paragraphe 1.4.1.1.b., est appelé "frittage" (figure 4). Suivant la force du vent, la neige ainsi déposée peut être très compacte et avoir une forte cohésion.

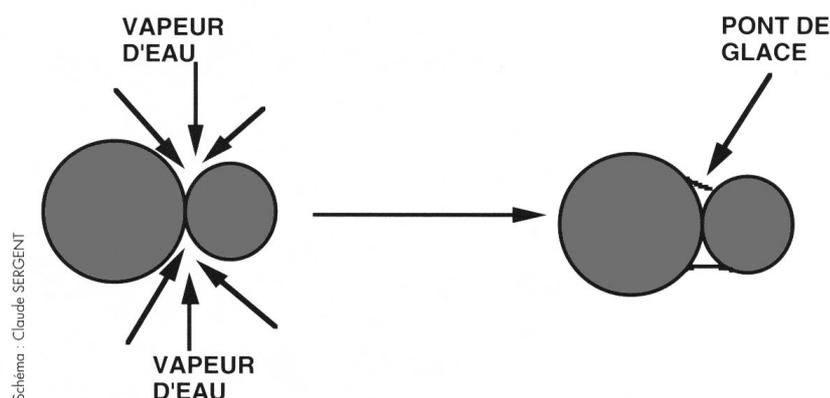


Figure 4 : Mécanisme de formation d'un pont de glace entre deux grains

1.3.2. Action de la température

Sans vent, avec des températures basses (inférieures à -5°C), les flocons ne subissent pas de forte transformation au cours de leur chute. C'est donc une neige peu dense qui se dépose au sol. En revanche, lorsque les températures sont proches de 0°C , les cristaux de neige se modifient déjà au cours de la chute, parfois même ils s'humidifient (température de l'air supérieure à 0°C) et la masse volumique de cette neige peut être importante (150 à 200 kg/m^3).

1.4. Évolution et métamorphoses de la neige au sol

Le manteau neigeux est un empilement de strates de neige. Chacune d'elle correspond à un épisode neigeux et a une évolution propre jusqu'à la fonte totale. Cette évolution, succession de métamorphoses du cristal initial jusqu'à la fonte finale, dépend des conditions météorologiques vécues. Celles-ci sont en effet déterminantes pour l'état thermique de chaque strate de neige et donc pour le type de métamorphose.

Pour la neige déposée sur le sol et transformée, on emploie le terme de grain de neige plutôt que de cristal.

Au cours des chutes de neige, les cristaux subissent souvent une destruction partielle sous les effets conjugués du vent et, dans une moindre mesure, de la température (effet de rayon de courbure, voir paragraphe 1.4.1.1.b.). Les grains ainsi obtenus comportent encore des formes qui rappellent les cristaux initiaux et sont en conséquence appelés "**particules reconnaissables**" (symbole I). Toute métamorphose de neige fraîche passe obligatoirement (parfois brièvement) par le stade de particule reconnaissable.

1.4.1. Les métamorphoses de la neige sèche

Une neige sèche est une neige qui ne contient pas d'eau liquide (Teneur en Eau Liquide (T.E.L.) = 0 %). La présence d'eau liquide dans la neige se traduit toujours par une température égale à 0°C. Aux températures négatives, la neige sera donc toujours une neige sèche.

Pour la neige sèche, un certain nombre d'agents ou de "moteurs" vont déterminer ses métamorphoses.

1.4.1.1. Agents des métamorphoses de la neige sèche

1.4.1.1.a. Agents mécaniques

- Le vent peut exercer sur la neige sèche au sol la même action que lors des chutes de neige (paragraphe 1.3.1.). Si la neige de surface est de faible cohésion, le vent, suivant sa force, la soulève et la transporte. Si elle est peu transformée, les chocs au cours du transport provoquent la fragmentation des cristaux en petites particules de glace. Au moment où elles se déposent, les particules se soudent rapidement entre elles (frittage), constituant une neige compacte et rigide. Ce phénomène peut se produire plusieurs jours après une chute de neige tant que cette neige demeure transportable. Ceci est le cas lorsque les températures restent assez basses sous un ciel dégagé (régime anticyclonique froid d'hiver).
- Le poids des couches de neige supérieures contribue à la fragmentation des cristaux des couches inférieures. D'où tassement, densification, et prise de cohésion par frittage.

1.4.1.1.b. Agents thermodynamiques

- La géométrie des cristaux ou des grains (effet de rayon de courbure)
La quantité maximale de contenu en vapeur d'eau de l'air au voisinage du cristal, ou du grain, varie aussi en fonction de sa géométrie. Les structures les plus aiguës (convexités) acceptent plus de vapeur d'eau à leur voisinage que les parties plates ou creuses (concavités). Les dendrites et les parties anguleuses ont donc tendance à se sublimer (passage de la glace à la vapeur d'eau). La vapeur d'eau disponible diffuse puis se condense (passage de la vapeur d'eau à la glace) sur les parties moins anguleuses et surtout dans les parties concaves. Ce phénomène provoque un adoucissement progressif des formes des grains qui étaient à l'origine dendritiques ou anguleuses. En outre, les points de contact entre les grains constituent des formes concaves où la condensation solide de la vapeur d'eau se produit. Des ponts de glace se forment ainsi entre les grains et constituent le phénomène de **frittage** (figure 4 et 5).

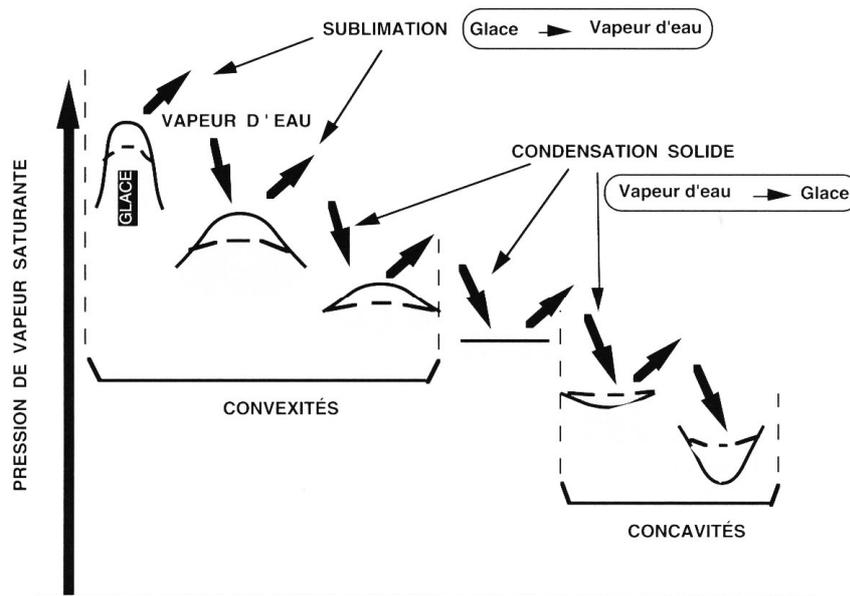
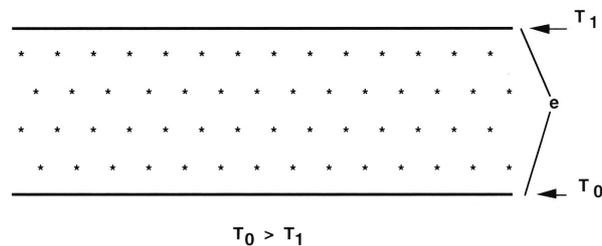


Figure 5 : Effet du rayon de courbure : transfert de glace par la phase vapeur entre les zones convexes et les zones concaves

- Le gradient vertical de température dans la neige
 La température influence la vitesse des changements de phase. Ainsi, plus la neige est à température proche de 0°C et plus la métamorphose, quel que soit son type, est rapide. En outre, la répartition de la température, ou les différences de températures qui peuvent être plus ou moins importantes dans une couche de neige, conditionnent le sens des échanges de glace entre les grains en passant par la phase vapeur d'eau. Les grains des zones les plus chaudes sont le siège d'émission de vapeur d'eau par sublimation de parties de glace. Les grains des zones les plus froides sont le siège de condensation solide de la vapeur d'eau ainsi disponible. La répartition des températures dans une couche de neige est mise en évidence par le calcul du gradient vertical de température (figure 6).



Gradient vertical de température = $\frac{T_0 - T_1}{e}$ (° C/m)

(degrés Celsius par mètre)

Figure 6 : Calcul du gradient vertical de température

1.4.1.3. La métamorphose de gradient moyen ($0,05^{\circ}\text{C}/\text{cm} < \text{GT} < 0,2^{\circ}\text{C}/\text{cm}$)

Dans ce cas, chaque grain de neige est à une température faiblement supérieure à celle du grain situé immédiatement au-dessus de lui (figure 8).

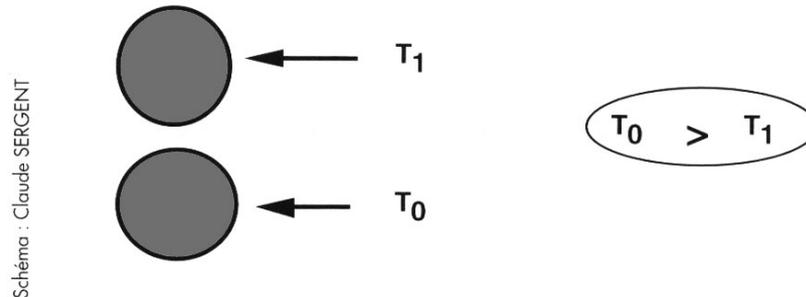


Figure 8 : Différence de température entre deux grains superposés dans le cas d'un gradient moyen ou fort

L'effet de rayon de courbure est contrarié par le déséquilibre de température (gradient). Chaque grain est à la fois le siège de sublimation et de condensation solide. Chaque grain se sublime en partie. Cette vapeur d'eau libérée se condense sur le grain supérieur plus froid. En même temps il capte la vapeur d'eau libérée par le grain du dessous. Les échanges de glace se font, par le biais de la phase vapeur, de grain à grain et du bas vers le haut (figure 9).

Les grains résultants montrent de nombreuses facettes, dont les angles sont le plus souvent de 120° . Ils sont appelés grains à **faces planes** (symbole : \square). Leur diamètre est de l'ordre de 0,3 à 0,6 mm.

Pour une telle métamorphose, il faut que les transferts de glace entre les grains par la phase vapeur puissent se faire. A l'origine, les neiges doivent donc avoir une masse volumique inférieure à $300\text{-}350 \text{ kg}/\text{m}^3$. Seules les neiges de type \pm , I , \cdot pourront donc subir cette métamorphose.

Par ailleurs, cette métamorphose s'accompagne d'un tassement de la neige (surtout s'il s'agit de \pm ou I), et surtout d'une perte de cohésion importante.

L'état de grains à faces planes n'est pas irréversible. En effet, soumis à un faible gradient, ils se transforment en grains fins.

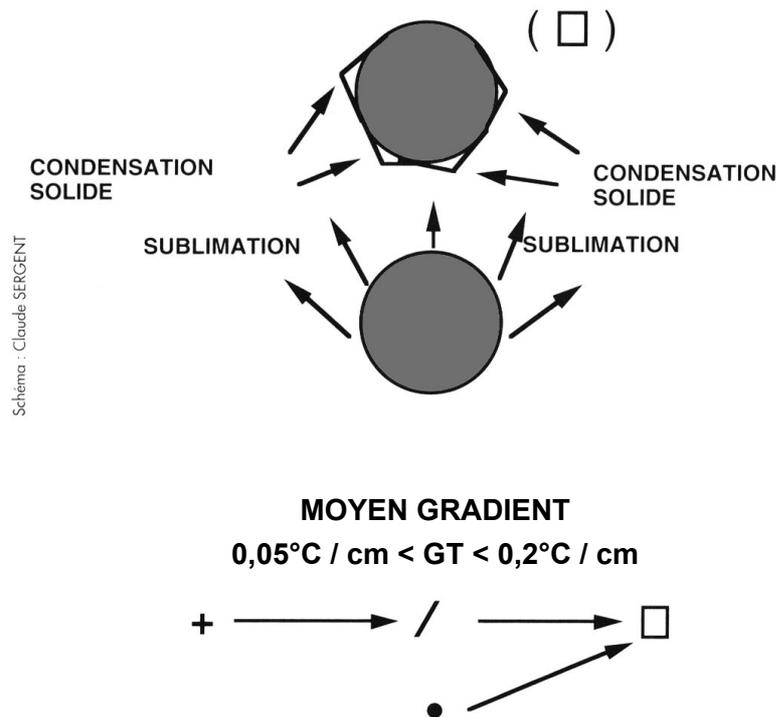


Figure 9 : Mécanisme de formation des grains à faces planes (Moyen Gradient)

1.4.1.4. La métamorphose de fort gradient ($GT > 0,2^\circ\text{C}/\text{cm}$)

Dans ce cas, la différence de température verticale entre chaque grain est importante et les phénomènes sont plus intenses que pour le moyen gradient. Les échanges de glace entre 2 grains par la phase vapeur sont plus importants et plus rapides. Chaque grain voit sa partie supérieure se sublimer et s'émousser tandis que sa base est le siège de la condensation solide de la vapeur d'eau libérée par le grain du dessous. Celle-ci se fait de manière rapide, en raison du fort gradient, et se traduit par la formation de marches, ou échelons, de glace successives à la base du cristal (figure 10). Les stries ainsi formées sont caractéristiques de ce type de grains.

Les grains prennent alors une structure de pyramide creuse et sont appelés **gobelets** ou givre de profondeur (symbole \wedge). Ces grains sont généralement de grande dimension, de 0,5 mm pour les plus petits à près de 4 mm pour les plus gros. Ils sont sans cohésion entre eux et se comportent comme du gros sel. Véritables "roulements à billes", ils présentent eux aussi un grand danger pour la stabilité des strates supérieures. Seule la présence d'eau liquide peut les faire évoluer.

Les neiges qui peuvent être l'objet d'une telle métamorphose doivent aussi avoir une masse volumique inférieure à $300\text{-}350 \text{ kg/m}^3$ (+, /, .).

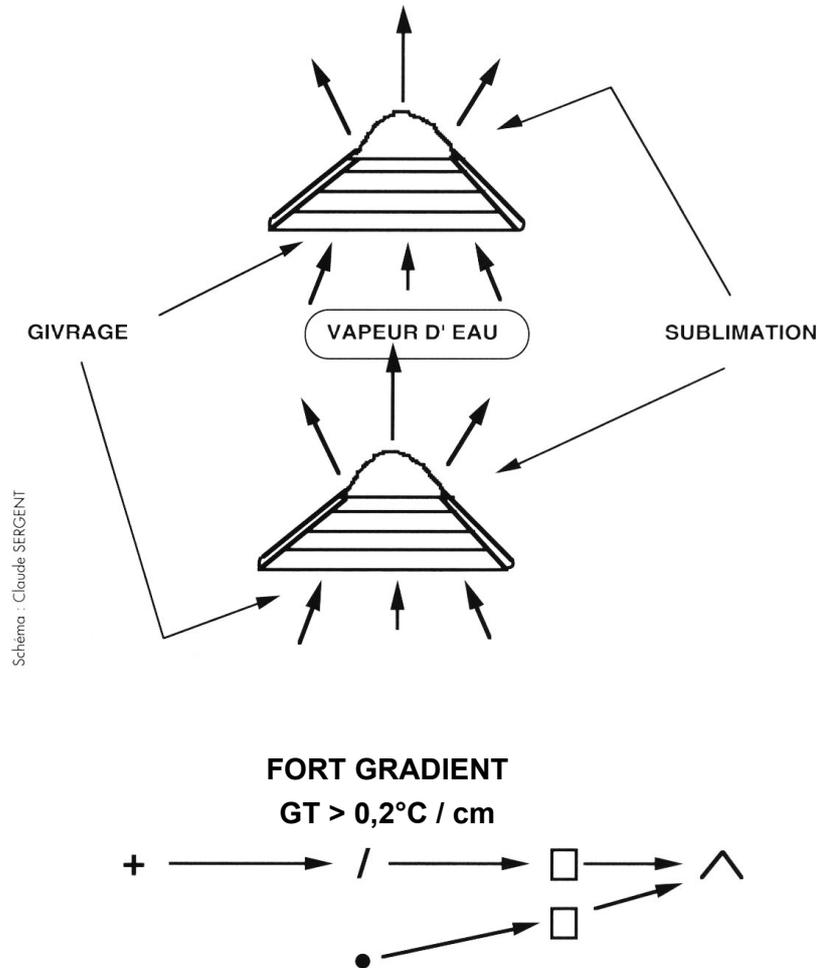


Figure 10 : Mécanisme de formation des gobelets (ou givre de profondeur)

1.4.2. La métamorphose de la neige humide

Une neige humide est une neige qui contient de l'eau liquide (teneur en eau liquide ou T.E.L. > %). Sa température est donc toujours de 0°C (0°C = température d'équilibre du mélange eau/glace). La neige peut s'humidifier avec la pluie, ou par la fusion d'une partie de ses grains sous l'effet du rayonnement solaire ou d'une température de l'air positive. Cette eau liquide, sous forme d'un film capillaire, entoure les grains et comble les parties concaves. Les parties les plus convexes des grains ainsi que les plus petits grains fondent en priorité et participent à l'arrondissement et au grossissement progressif des plus gros grains (figure 11). On obtient alors des **grains ronds** (symbole **o**) dont le diamètre varie généralement entre 0,3-0,4 mm pour les neiges fraîches humidifiées et 1-2 mm pour les vieilles neiges (névés).

La vitesse de grossissement des grains est proportionnelle à la quantité d'eau liquide présente. Cette métamorphose conduit à un fort tassement et à une augmentation important de la masse volumique de la neige. C'est la seule métamorphose qui est

capable de faire disparaître la neige roulée citée au paragraphe 1.2.2. ainsi que les gobelets.

La cohésion entre les grains, assurée par la présence de l'eau liquide, est dite capillaire. Elle est bonne tant que la T.E.L. est faible (cf. deux plaques de verre mouillées et accolées) mais devient mauvaise lorsque la T.E.L. est importante (avalanches de printemps sur les pentes raides et ensoleillées).

S'il survient un regel, l'eau liquide qui assurait les liaisons entre les grains se solidifie et l'on obtient une cohésion de regel. Elle est souvent très bonne, mais sa qualité dépend en fait de la quantité d'eau liquide présente avant le regel. Elle peut ainsi être excellente (croûte de regel parfois épaisse).

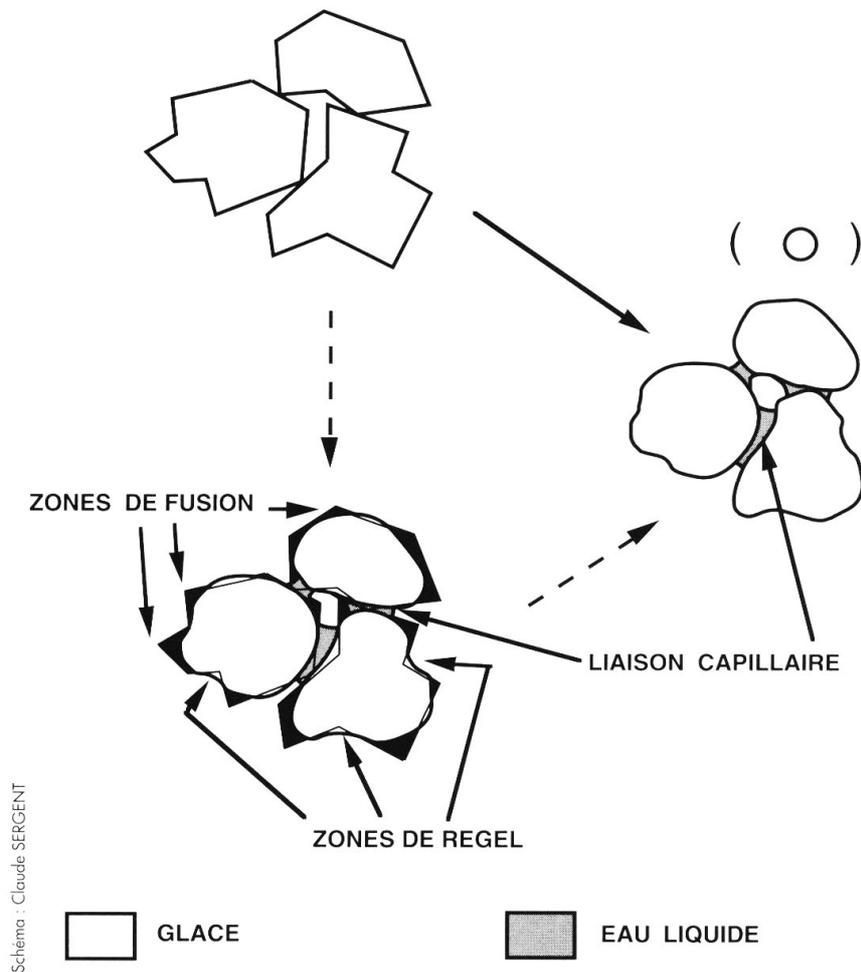


Figure 11 : Mécanisme de formation des grains ronds

Tableau des symboles des différents grains de neige



NEIGE ROULEE



NEIGE FRAICHE



PARTICULES RECONNAISSABLES



GRAINS FINS



GRAINS A FACES PLANES



GOBELETS

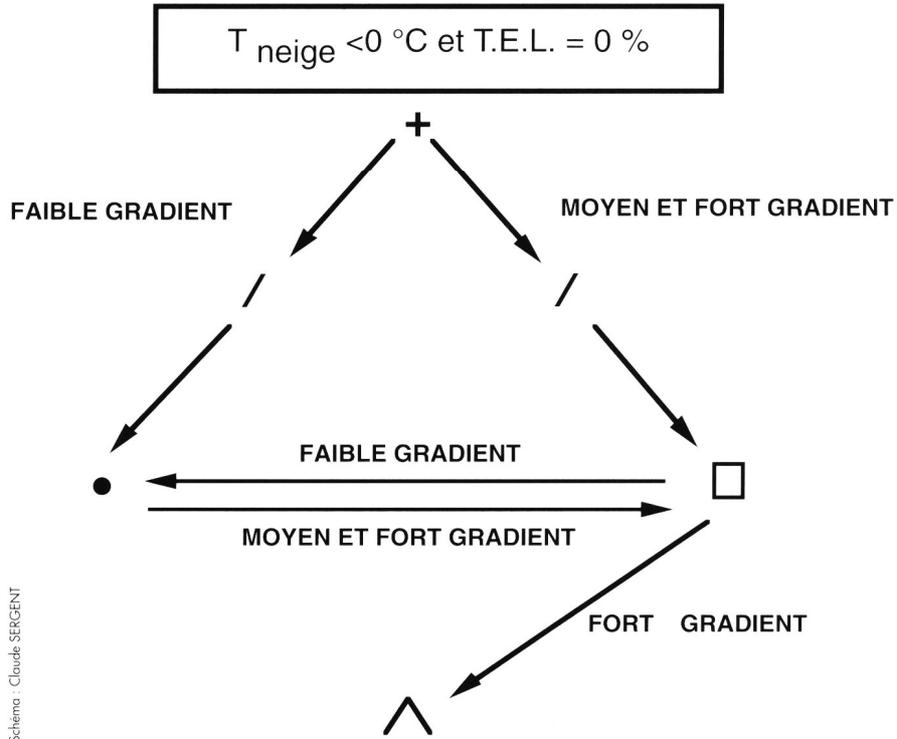


GRAINS RONDS



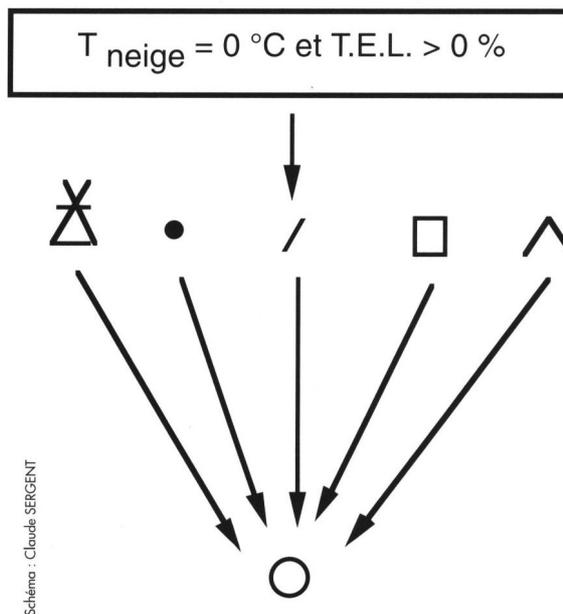
CROUTE DE REGEL AVEC SYMBOLE
DU GRAIN CONSTITUTIF

Métamorphoses de la neige sèche



Faible gradient	$GT < 0,05 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$
Moyen gradient	$0,05 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm} < GT < 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$
Fort gradient	$GT > 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{cm}$

Métamorphose de la neige humide



2.1.2. La teneur en eau liquide de la neige (T.E.L.)

La neige est dite humide lorsqu'elle contient de l'eau liquide. Elle est alors à 0°C qui est la température d'équilibre du mélange glace, eau et air.

On détermine l'humidité de la neige en mesurant sa teneur en eau liquide (T.E.L.) volumique ou massique (en %).

$$\text{T.E.L. massique} = \frac{\text{Masse d'eau liquide}}{\text{Masse totale de neige (glace, eau liquide, air)}}$$

$$\text{T.E.L. volumique} = \frac{\text{Volume d'eau liquide}}{\text{Volume total de neige}}$$

C'est généralement la T.E.L. volumique qui est mesurée.

2.2. Propriétés mécaniques de la neige

2.2.1. La cohésion de la neige

La cohésion de la neige dépend de la qualité des liaisons entre les grains. On en distingue quatre types :

- La cohésion de FEUTRAGE

Cohésion fragile des cristaux de neige fraîche ou des particules reconnaissables. Elle est due à l'imbrication de leurs nombreuses aspérités et dendrites. Elle est fragile et disparaît vite dès qu'il y a métamorphose (figure 14).

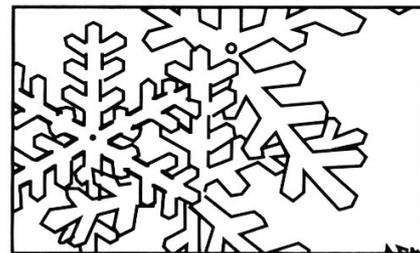


Figure 14 : Cohésion de feutrage

- La cohésion de FRITTAGE

Elle concerne essentiellement les grains fins et particules reconnaissables et se caractérise par la présence de soudures (ou ponts de glace) entre les grains. Elles sont le fruit de la condensation solide de vapeur d'eau aux points de contact entre les grains. Elle est assez bonne mais propice à la propagation des cassures (figure 15).

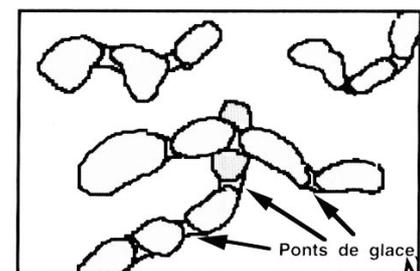


Figure 15 : Cohésion de frittage

- La cohésion CAPILLAIRE

C'est une cohésion résultant de la présence d'une pellicule d'eau qui entoure les grains et assure la liaison entre ces derniers. Sa qualité dépend de la T.E.L. : pour de faibles valeurs elle est assez bonne, mais elle diminue rapidement si la T.E.L.

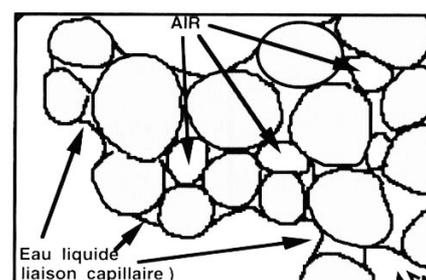
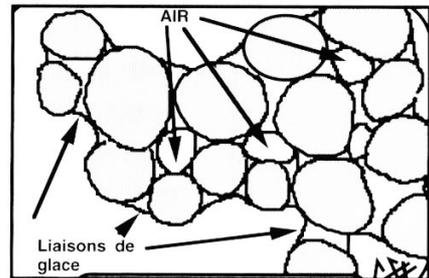


Figure 16 : Cohésion capillaire

augmente. Elle peut concerner tous les types de neige, mais elle est typique des grains ronds (figure 16).

- La cohésion de REGEL

Lorsqu'il y a gel de l'eau liquide présente dans la neige, les grains se soudent entre eux. Cette cohésion de regel (figure 17) est excellente si la TEL était auparavant importante. Dans ce cas, la métamorphose de fonte avait pu fortement transformer les grains en grains ronds, et l'on a alors une croûte (de regel) de grains ronds. Avec



Schémas : Claude SERGENT

Figure n°17 : Cohésion de regel

une T.E.L. faible à l'origine, la cohésion de regel est plus fragile et peut concerner des grains peu arrondis et qui ont gardé en grande partie leur forme initiale.

2.2.2. Tassement, compression et traction

La neige résiste assez bien à la compression mais très mal à la traction. Sur les pentes, les zones de convexité sont des zones de traction et les concavités sont des zones de compression (figure 18). La neige est un matériau d'autant plus compressible qu'elle est récente et de masse volumique faible.

Le tassement de la neige s'opère naturellement :

- dans les couches profondes, sous le poids des couches supérieures ;
- dans l'ensemble du manteau neigeux, sous l'effet des métamorphoses.

Pour des neiges fraîches, on peut constater des tassements naturels de l'ordre de 15 à 20 % de la couche en 24 h.

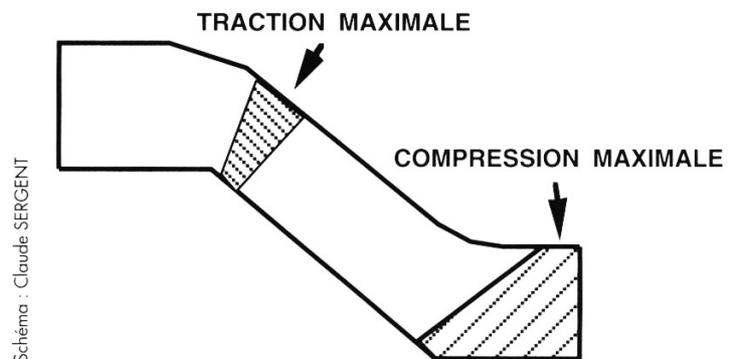


Schéma : Claude SERGENT

Figure n° 18 : Zones de contrainte maximale sur une pente de neige

La compression et le tassement de la neige lui confèrent une plus grande résistance (cf. damage).

2.2.3. Plasticité et viscosité de la neige

Suivant son degré de vieillissement et sa température, la neige peut se déformer plus ou moins bien sans rupture (plasticité) ou s'écouler plus ou moins facilement sur une pente (viscosité). Les différences de viscosité des diverses strates de neige qui composent le manteau neigeux induisent des vitesses de glissement différentes sur les pentes (figure 19).

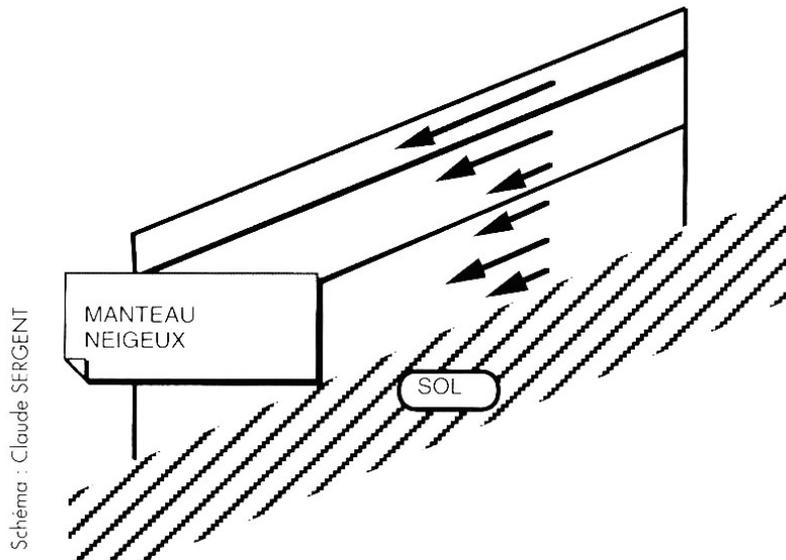


Figure 19 : Vitesses d'écoulement dans les différentes strates du manteau neigeux

2.2.4. Glissement et reptation

Sur une pente, le manteau neigeux glisse dans son ensemble (glissement) et chaque strate subit un tassement et un écoulement propre (reptation). Ces mouvements, combinés aux accidents de terrain (convexités, concavités, rochers, etc.), conduisent à des déformations et à la création de contraintes au sein du manteau neigeux pouvant aller jusqu'à la rupture d'une ou plusieurs strates de neige.

2.2.5. Les forces de frottement de la neige

Le maintien de la neige sur une pente dépend du type de grain et de l'angle de cette pente. Pour chaque type de neige, il existe une valeur de l'angle de pente au-delà de laquelle elle ne peut tenir (angle de frottement statique).

De même, mis en mouvement, les grains de neige auront tendance à s'arrêter à partir d'un certain angle de pente (angle de frottement cinétique), qui dépend du type de grain et de la vitesse initiale.

L'examen de ces deux variables montre que les pentes les plus dangereuses (stabilité précaire et écoulement favorisé) ont des angles compris entre 25 et 45° (figure 20).

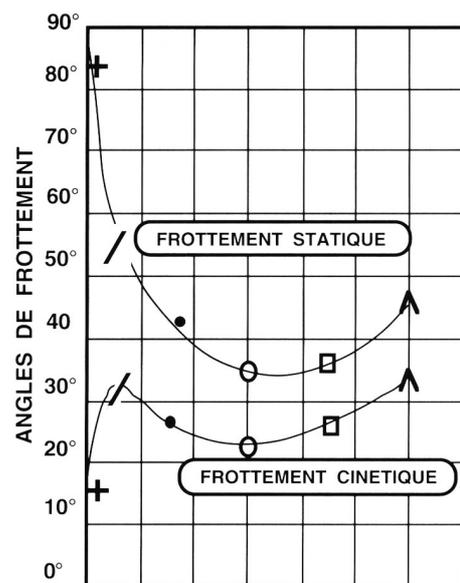


Figure 20 : Forces de frottement de la neige selon le type de grain (d'après André Roch).

2.3. Propriétés thermiques de la neige

2.3.1. Isolation thermique

Le matériau neige contient de l'air qui en fait un isolant thermique. Cette qualité sera d'autant meilleure que la quantité d'air sera importante et donc que la masse volumique sera faible. La neige fraîche dont la masse volumique est généralement de l'ordre de 100 kg/m^3 (89 % d'air) sera un isolant bien meilleur que la neige de névé à 500 kg/m^3 (45 % d'air).

2.3.2. Capacité calorifique et chaleurs latentes

La quantité d'énergie ou de chaleur nécessaire pour élever la température de la neige de 1°C est de 0,5 calorie, ou 2,1 joules, par gramme (capacité calorifique).

Pour passer d'un état (ou phase) à un autre, l'eau dissipe ou absorbe de la chaleur (chaleur latente). L'ordre croissant d'état énergétique de l'eau est :

glace - eau liquide - vapeur

Les changements d'état dans ce sens se feront avec absorption de chaleur et avec dégagement de chaleur dans l'autre sens.

CHANGEMENT D' ETAT	NATURE DU FLUX DE CHALEUR	CHALEUR LATENTE	
		(CAL / g)	(Joules/ g)
FUSION	ABSORPTION	80	334
EVAPORATION	ABSORPTION	598	2500
SUBLIMATION	ABSORPTION	678	2834
CONDENSATION LIQUIDE	DEGAGEMENT	598	2500
SOLIDIFICATION	DEGAGEMENT	80	334
CONDENSATION SOLIDE	DEGAGEMENT	678	2834

Tableau des valeurs des chaleurs latentes des différents changements d'état

2.4. Les échanges neige / atmosphère

L'état thermique du manteau neigeux conditionne les métamorphoses et dépend du bilan de ses échanges énergétiques avec l'atmosphère.

2.4.1. Le rayonnement solaire

Le jour, la neige reçoit le rayonnement solaire qui contient les rayonnements ultraviolet, visible et infrarouge.

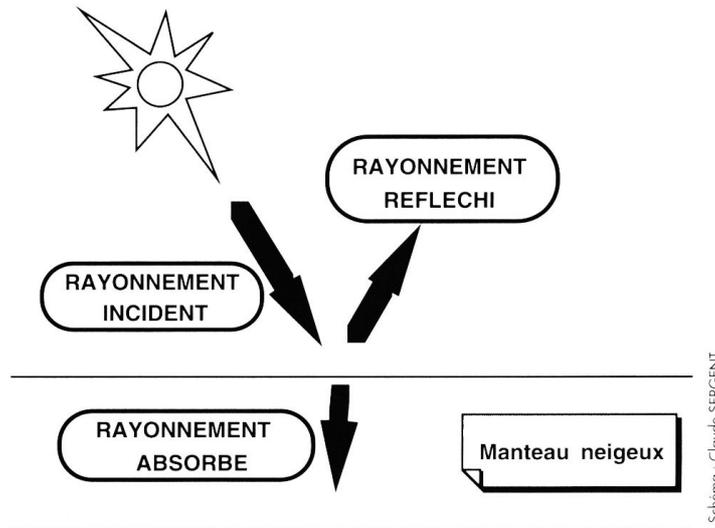


Figure 21 : Interaction rayonnement solaire / neige

Le manteau neigeux renvoie vers l'atmosphère une grande partie de ce rayonnement et absorbe l'autre partie, qui contribue à son échauffement. La capacité de la neige à réfléchir le rayonnement s'appelle l'albédo, rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement incident (figure 21). Sa valeur varie entre 0,9 et 0,5 et dépend essentiellement de la neige de surface (type de grains et degré de pollution. La neige fraîche contenant peu d'impuretés absorbe moins de rayonnement solaire (10 à 20 %) qu'une neige évoluée et sale de type grain rond (40 à 50 %).

L'inclinaison de la pente par rapport aux rayons du soleil joue en outre un rôle important dans la quantité d'énergie solaire absorbée. L'énergie solaire incidente est beaucoup plus importante par unité de surface lorsque le rayonnement est perpendiculaire à cette surface. Cela explique l'échauffement rapide de la neige des pentes raides d'orientation sud-est, le matin, malgré un soleil bas.

$$\text{Albédo} = \frac{\text{Rayonnement réfléchi}}{\text{Rayonnement incident}}$$

2.4.2. Le rayonnement thermique

Comme tous les corps, la neige émet en permanence, de jour comme de nuit, un rayonnement infrarouge dit rayonnement thermique. Cette émission de rayonnement s'accompagne d'une perte d'énergie de la neige et se traduit, en l'absence de compensation telle que le rayonnement solaire, par une baisse de température parfois importante de sa surface (nuit claire et sans vent).

L'atmosphère, notamment la vapeur d'eau, et les nuages offrent le même phénomène d'émission de rayonnement thermique. La totalité de ce rayonnement

émis vers la neige est absorbée par celle-ci. C'est pourquoi les nuits nuageuses et humides ne permettent pas un abaissement important de température de la neige de surface. Dans ce cas, l'émission de rayonnement thermique de la neige est compensée par celle de la couverture nuageuse et de la vapeur d'eau (figure 22).

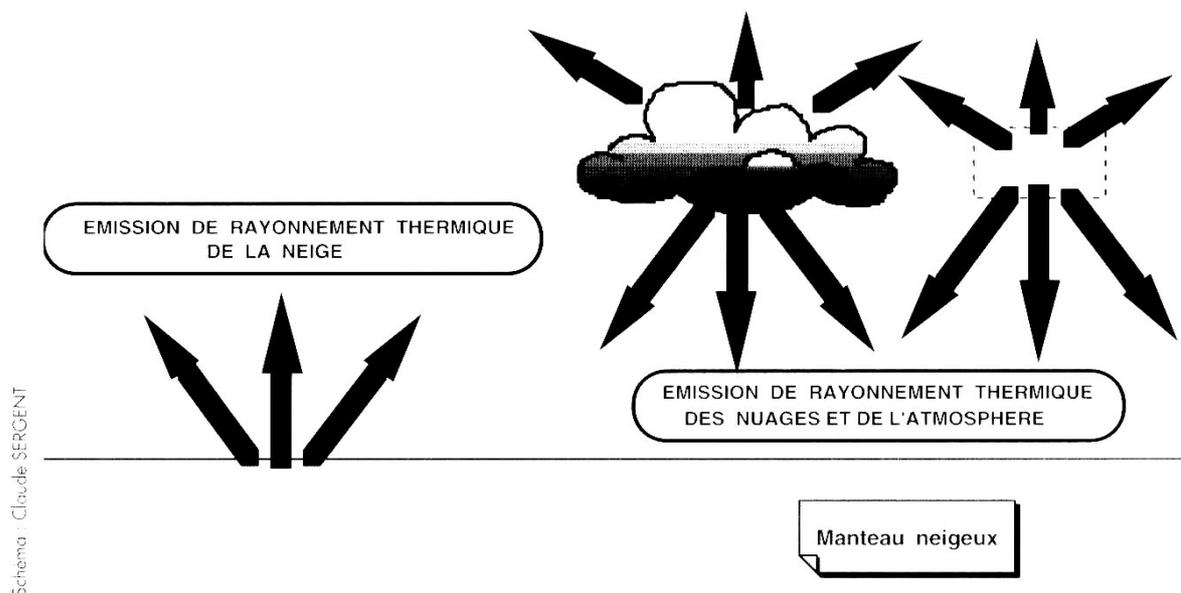


Figure 22 : Interaction rayonnement solaire / neige

2.4.3. La pluie et la neige

L'effet principal de la pluie sur le manteau neigeux est de l'humidifier. L'énergie qu'elle apporte sert surtout à réchauffer la neige, car la fusion qu'elle provoque est un phénomène qui demeure limité. Ainsi, une pluie de 10 mm à +5°C ne fait pas fondre plus de 1 cm de neige à 0°C et de masse volumique égale à 100 kg/m³. Par contre, elle provoque un fort tassement qui donne l'impression que la neige a fondu. Les chutes de neige refroidissent ou réchauffent le manteau neigeux. Le sens des échanges dépend des températures respectives de la neige qui tombe (généralement égale à la température de l'air), et de la neige de surface du manteau neigeux (figure 23).

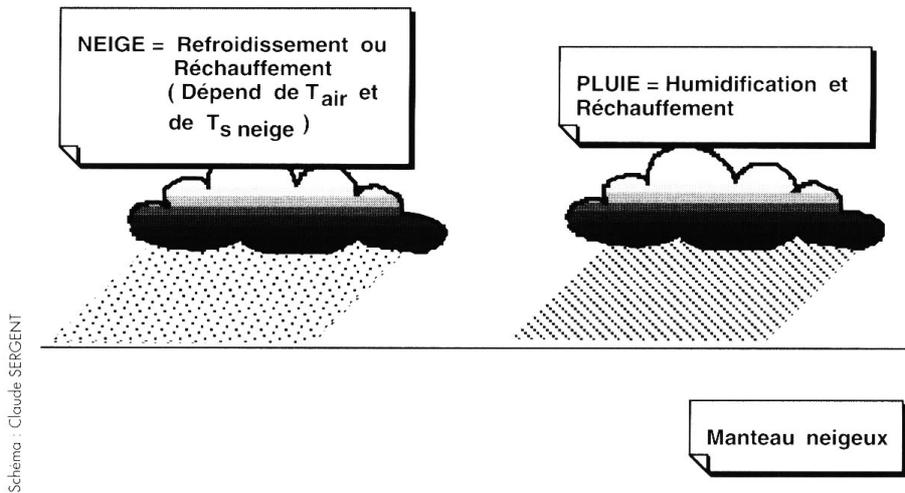


Figure 23 : Interaction précipitations / neige

2.4.4. Température de l'air, humidité et vent

La neige peut se réchauffer (au plus jusqu'à 0°C) ou se refroidir au contact de l'air qui s'écoule à sa surface. Ces échanges dépendent de la différence de température entre les deux milieux (chaleur sensible), de l'humidité de l'air (chaleur latente) et de la vitesse du vent qui a pour effet d'accélérer les échanges. Néanmoins, la neige étant un bon isolant, réchauffement ou refroidissement seront lents à se propager à l'intérieur du manteau neigeux (figure 24).

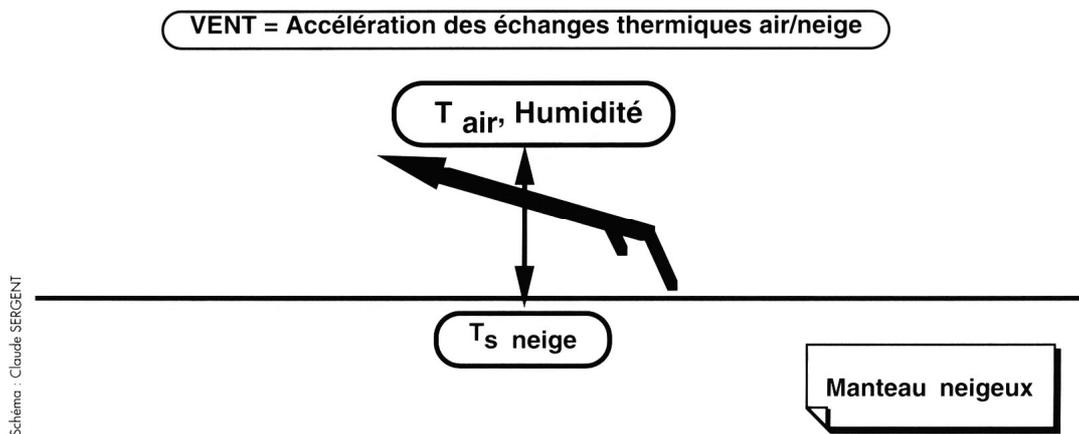


Figure 24 : Action du vent sur les échanges air / neige

2.4.5. Flux thermique de sol

La terre maintient en permanence un flux d'énergie à la base du manteau neigeux par l'intermédiaire du flux thermique de sol. Bien que faible, cet apport de chaleur permet de maintenir la base du manteau neigeux à 0°C. Rappelons à ce sujet que contrairement à la croyance générale, ce flux thermique ne permet pas au manteau neigeux de fondre à la base de façon importante. La fusion significative du manteau neigeux se fait toujours à partir des couches superficielles.

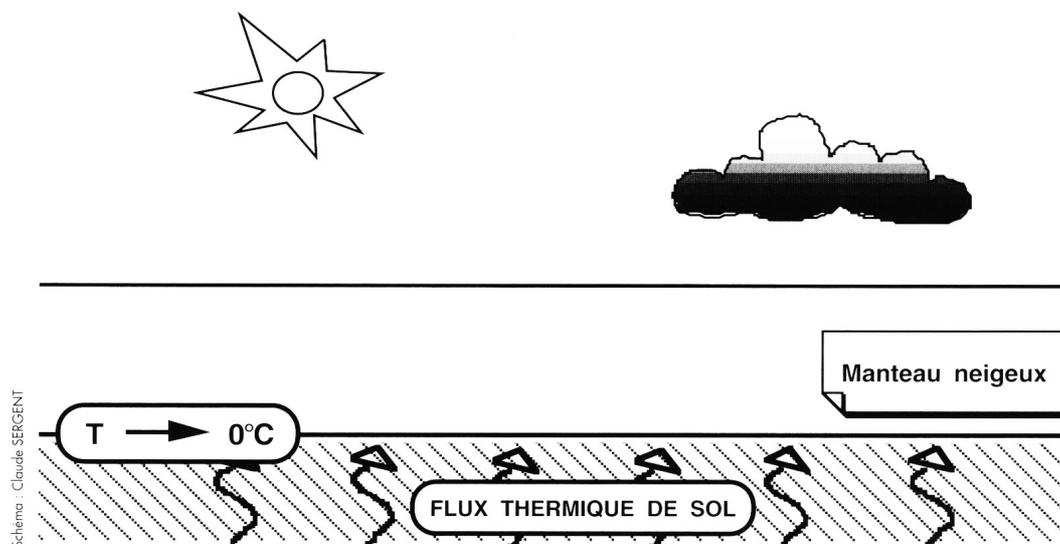


Figure 25 : Action du flux thermique de sol à la base du manteau neigeux

Les échanges neige atmosphère

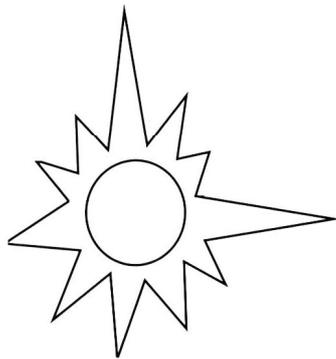
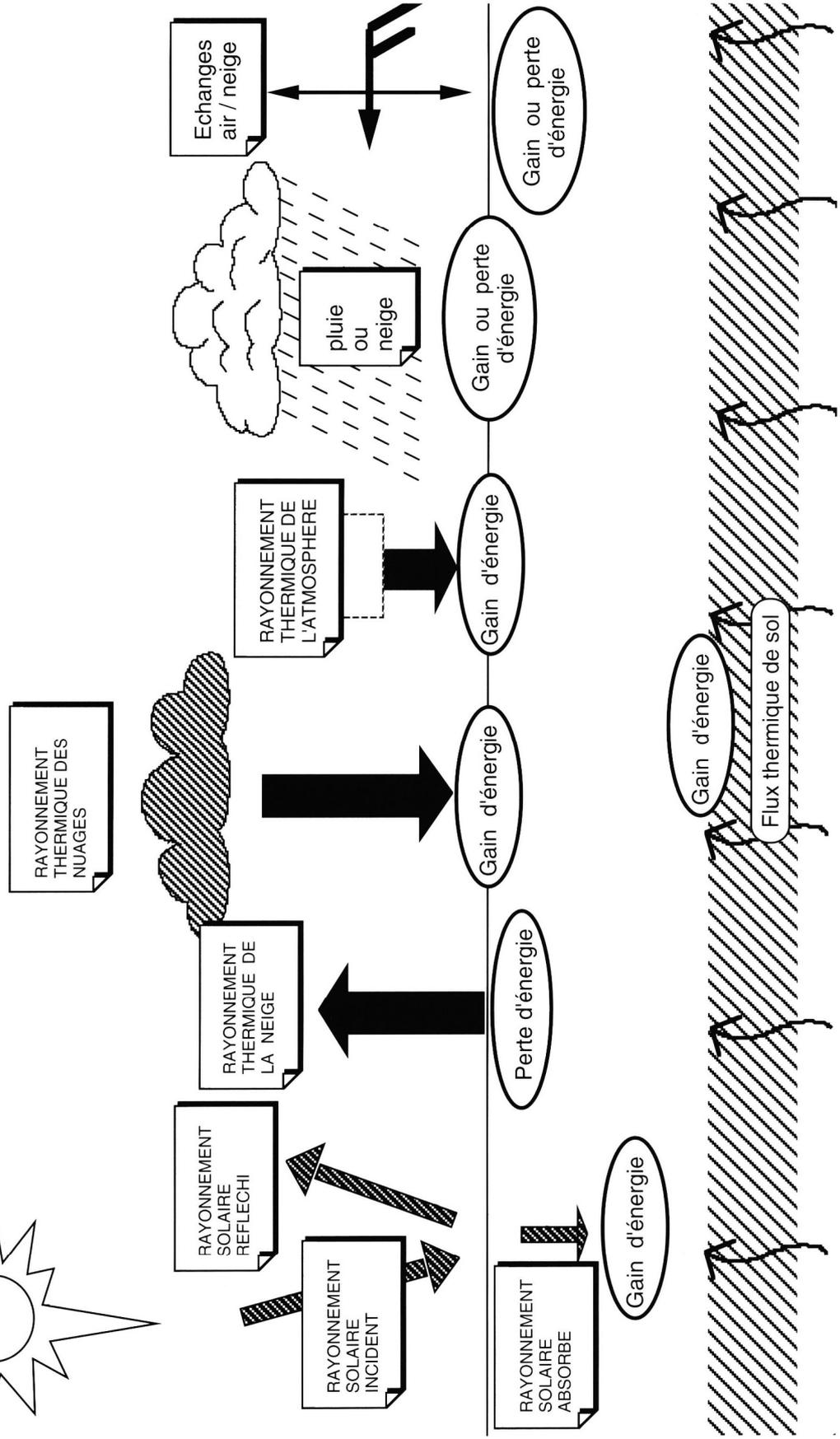


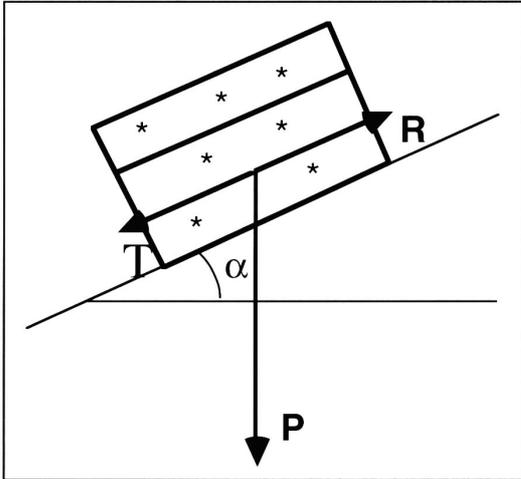
Schéma : Claude SERGENT



3. Les avalanches

3.1. Équilibre du manteau neigeux

3.1.1. Forces en présence



- P : poids de la neige
 T : traction exercée sur le manteau neigeux
 R : ensemble des forces de résistance
 α : inclinaison de la pente

Ce schéma, très simplifié, résume les différentes forces qui interviennent dans l'équilibre du manteau neigeux. Il s'agit surtout de deux forces antagonistes :

- la force de traction T, composante du poids parallèle à la pente et qui s'exprime par : $T = P * \sin \alpha$
- l'ensemble des forces de résistance (ou de réaction) R qui dépendent, d'une part de la cohésion de la neige et des différentes strates entre elles, et d'autre part du frottement de la neige au sol et des ancrages du manteau neigeux.

La compréhension des phénomènes mécaniques qui expliquent le déclenchement des avalanches est relativement (voire très) complexe parce que la neige peut avoir des propriétés mécaniques très différentes, qui se modifient avec le temps.

L'équilibre des forces est stable lorsque la force T n'excède pas la force limite R.

Conditions d'instabilité :

La neige tient sur la pente, la plupart du temps, car les forces de résistance équilibrent la force de traction. L'équilibre est remis en cause lorsque la résistance diminue ou que la traction augmente.

Les mécanismes qui amènent une instabilité du manteau neigeux, donc sa mise en mouvement, sont de deux ordres :

a) accroissement des contraintes exercées sur le manteau neigeux (la force T)

- augmentation du poids par surcharge : chute de neige ou de pluie (phénomène relativement lent)
- passage d'un skieur (phénomène brutal)
- chute de corniche (phénomène brutal)

- effet d'une explosion (onde de choc)

b) diminution des résistances (forces R)

Le phénomène est progressif et peut être causé par :

- perte de cohésion consécutive à une métamorphose
- diminution de la cohésion de feutrage
- diminution de la cohésion de frittage —————> métamorphose de gradient
(moyen ou fort) ou de neige humide
- diminution de la cohésion capillaire —————> métamorphose de neige humide
- perte d'ancrages (latéraux, amont ou aval)
- diminution du frottement inter-strates ou au sol (présence d'un film d'eau liquide)
- effet d'une explosion.

3.2. Les différents types d'avalanches

Les types d'avalanches correspondent schématiquement à différentes étapes de la vie de la neige déposée au sol et sont classés en trois ensembles :

- les avalanches de neige récente
- les avalanches de plaques (dont la plaque à vent est un cas particulier)
- les avalanches de fonte.

Cette classification fait référence au type de neige au départ de l'avalanche, mais les critères ne sont pas totalement exclusifs. Ainsi, la plaque friable, constituée de neige récente ayant pris un peu de cohésion par l'effet du vent, se trouve classée avec les avalanches de neige récente, mais son comportement mécanique s'apparente plus aux avalanches de plaque.

Le classement des avalanches présenté ici est volontairement simplifié, car les divers mécanismes peuvent se superposer et ainsi toutes les étapes intermédiaires existent : une avalanche de neige récente ou une plaque peuvent être humides, une coulée de neige fraîche peut déclencher une plaque (voire une avalanche de neige humide comme au tunnel du Mont Blanc en mai 1983), etc.

L'avantage du classement proposé est de faire appel au mécanisme même à l'origine du départ en avalanche. D'autres types peuvent être proposés, en fonction du trajet (couloir, pente, versant), du dépôt ou du départ, ou en fonction de la morphologie du mouvement.

3.2.1. Les avalanches de neige récente

Une avalanche de neige récente peut aussi bien être une coulée inoffensive qu'une énorme masse de neige aux conséquences dévastatrices, voire meurtrières, qui met en mouvement des milliers de tonnes de neige et dont la pression peut atteindre plusieurs tonnes par mètre carré.

Elles se produisent à n'importe quel moment de la journée, pendant ou peu après des précipitations. Suivant la température au moment des précipitations (ou immédiatement après), l'avalanche peut être qualifiée de sèche ou humide selon la valeur de la T.E.L. en surface du manteau neigeux.

3.2.1.1. Description

- Zone de départ : dans la plupart des cas, il s'agit d'un départ ponctuel, et la masse de neige en mouvement provoque le déséquilibre des couches latérales. Si un début de cohésion de frittage a eu lieu, la cassure peut être linéaire (plaque friable).
- Zone de transition : suivant la qualité de la neige (humide ou sèche), les traces sont plus ou moins visibles.
- Zone de dépôt : dans la zone d'arrêt, la neige s'accumule en un cône. Le volume du dépôt peut parfois atteindre plusieurs milliers de m³ et les dégâts occasionnés peuvent être considérables. L'aspect du dépôt pourra être différent suivant la qualité de la neige :
 - humide —> boules qui s'accumulent en un dépôt plus ou moins long et haut.
 - sèche —> l'étalement à la zone d'arrêt se fait sur un large périmètre et sur une épaisseur assez homogène ; le dépôt est souvent peu visible.

*Cas particulier des **avalanches de poudreuse**, appelées aussi avalanches en aérosol :*

Il s'agit d'avalanches très spectaculaires, qui se déclenchent lorsque certaines conditions sont réunies : neige légère, de masse volumique généralement inférieure à 100 kg/m³, angle et longueur de pente suffisants. Ces qualités sont associées à de la neige tombée par des températures froides. Il est à noter que le danger de déclenchement des avalanches de poudreuse peut persister plusieurs jours, notamment dans les versants nord.

A partir d'une certaine vitesse qui dépend de la qualité de la neige (60 à 80 km/h pour une neige froide et légère), cette neige se mélange à l'air et s'écoule comme un gaz lourd en formant un aérosol. C'est ce qui caractérise ce type d'avalanche : son écoulement est en partie aérien, alors que, pour tous les autres types, l'écoulement se fait près du sol. L'avalanche peut atteindre des vitesses importantes (parfois supérieures à 200 km/h). Elle acquiert une énergie considérable et repousse l'air devant elle en créant une onde de choc. C'est davantage cet effet de surpression lié

à sa vitesse plutôt que la masse de neige déplacée qui causera des dégâts importants. En l'absence de dommages matériels ou corporels, le passage d'une avalanche de poudreuse est souvent difficile à déceler. Sur son parcours, elle ne laisse ni boules, ni blocs de neige et la zone d'arrêt a une superficie très large sans accumulation nettement visible.

Lorsqu'elles se produisent au-dessus d'un site habité, suite à des quantités de neige accumulées exceptionnelles, elles peuvent descendre très bas et provoquer des catastrophes, comme à Val d'Isère en février 1970. En 1978, une chapelle du XV^{ème} siècle a ainsi été emportée à Saint-Jean-d'Arves, ce qui prouve qu'on ne peut pas toujours se fier au passé en la matière.

3.2.1.2. Causes de déclenchement

Le mécanisme de déclenchement est assez simple. La neige peut tenir sur des pentes assez raides grâce à la cohésion de feutrage. Mais cet équilibre est précaire, et la moindre perturbation ou l'alourdissement par la neige qui continue de tomber suffit à déclencher le mouvement.

Le seuil de déclenchement varie en fonction de :

- l'importance de la chute.

L'épaisseur de la précipitation pendant un épisode neigeux joue un rôle essentiel. À titre indicatif et pour des neiges fraîches et légères :

- 30 à 60 cm : le risque d'avalanches concerne plus particulièrement les pentes fortes, c'est aussi le seuil de déclenchement préventif ;

- 60 à 90 cm : Le risque s'étend aux pentes moyennes et les avalanches peuvent atteindre les voies de communication ;

- plus de 90 cm : le danger est général pour tout le massif concerné par de telles chutes. Les avalanches peuvent alors être catastrophiques et atteindre des zones abritées.

- l'intensité de la chute.

C'est la vitesse avec laquelle la neige se dépose en un point donné. Le risque de déclenchement croît avec l'intensité. Ainsi une chute de 60 cm tombée (sans vent) pendant une période de 2 à 3 jours engendre un risque de départs d'avalanches moindre que la même quantité tombée en 10-12 heures.

- la température de l'air (au moment de la chute).

Lorsque la température est proche de 0 °C, le danger d'avalanche s'estompe assez vite puisque le tassement qui s'opère consolide la couche de neige fraîche.

Inversement, si la température de l'air est d'environ -10 °C, la neige reste sèche, légère, et le danger persiste beaucoup plus longtemps.

3.2.2. Avalanches de plaque

Une plaque de neige, formée à la suite d'une métamorphose de faible gradient, ou bien sous l'action du vent, est constituée de neige relativement compacte (grains fins et éventuellement particules reconnaissables) de masse volumique comprise entre 150 et 400 kg/m³. Le phénomène de plaque peut apparaître très tôt, dès qu'un début de cohésion de frittage existe (**plaque friable**). Elle a une cohésion généralement bonne, mais peut avoir une consistance poudreuse dans la cas de plaques friables. Il y a danger de rupture chaque fois que cette plaque de neige, peu plastique, est mal solidarifiée avec la sous-couche, car celle-ci est fragile. Peut constituer une couche fragile toute strate de neige constituée de : gobelets, faces planes, givre de surface enfoui, neige roulée, neige fraîche, particules reconnaissables peu denses.

Ces plaques sont très dangereuses pour le skieur car :

- d'une part elles sont difficilement repérables (surtout si une petite couche de neige fraîche les recouvre) et leur degré d'instabilité est difficile à estimer, puisqu'il dépend des conditions internes du manteau neigeux, notamment le degré de fragilité de la sous-couche fragile sur laquelle repose la plaque ;
- d'autre part, elles ne se déclenchent que lorsqu'elles subissent une surcharge, donc au moment du passage du skieur.

Une bonne connaissance de l'évolution interne de la neige en fonction des conditions météorologiques observées est indispensable pour mieux apprécier le risque de déclenchement d'avalanches de plaque.

3.2.2.1. Description

- Zone de départ : la cassure est toujours linéaire, très nette et peut se propager très vite, grâce à la cohésion de la neige. La fracture est parfois étendue et dépend de la topographie du terrain (plus de 1 km pour l'avalanche de La Mongie, le 15 février 1976).
- Zone de transition et d'arrêt : dans le cas de plaques dures, le trajet de ce type d'avalanches est jalonné de blocs de formes parallélépipédiques et de tailles variées. Ces blocs se retrouvent souvent sous cette forme dans la zone de dépôt (si la vitesse n'a pas été trop importante et le trajet trop long). S'il s'agit de plaque friable, comme son nom l'indique, la masse de neige a tendance à se fragmenter rapidement et se transformer en un écoulement pulvérulent.

*Cas particulier des **plaques à vent***

Le vent est un facteur important à l'origine de la formation des plaques. En effet, le transport de la neige par le vent, pendant ou après la chute, brise les cristaux, réduit sensiblement leur taille et permet à la neige redéposée de prendre rapidement une certaine cohésion, souvent forte. Ce phénomène est peu dépendant de la

température de l'air. Pour bien comprendre la formation des plaques à vent, il faut revenir sur le phénomène de frittage. Rappelons qu'il s'agit de la formation d'un pont de glace entre deux grains de neige en contact. La vitesse de formation dépend de la température, mais surtout de la taille des grains dont elle est une fonction décroissante (plus la taille des grains diminue, plus la vitesse de frittage augmente). Par conséquent des petits grains de neige, résultant de l'action du vent, prendront une bonne cohésion très rapidement (en quelques secondes), ce qui explique par exemple la formation des corniches.

Sur les zones exposées au vent, il y a ablation d'une partie de la neige et formation de congères derrière des obstacles, dans les zones abritées du vent. Sur les crêtes, par exemple, côté sous le vent, des corniches se forment et en contrebas, la neige transportée s'accumule, créant des plaques à vent.

Si, d'une manière générale, les plaques se forment sur le versant abrité du vent (si la direction est restée constante), au voisinage des crêtes, ce n'est pas une règle absolue et l'on peut rencontrer des plaques bien plus bas que sous les crêtes principales, mais aussi parfois sur les versants exposés au vent, à la faveur d'une rupture de pente.

Une bonne connaissance du domaine et une observation rigoureuse des conditions de vent et de "transportabilité" de la neige aideront à mieux localiser les secteurs à risque. La présence de chasse-neige (crêtes qui fument) en altitude ou de vent pendant une chute de neige permet de supposer que des plaques sont en cours de formation. Par ailleurs, certains indices permettront de confirmer la présomption de plaques à vent :

- corniches sur les sommets les plus exposés.
- état de surface particulier du manteau neigeux (vaguelettes, neige tassée sur les versants soufflés).

Il n'est pas nécessaire que le vent soit très violent : avec un vent de seulement 25 km/h, une plaque peut se former en quelques heures (les grains de neige se déplaçant alors dans les 20 à 30 premiers cm au-dessus du sol, par saltation).

3.2.2.2. Causes de déclenchement

Il y a risque de déclenchement de plaque chaque fois que son ancrage inférieur est de mauvaise qualité, c'est-à-dire quand elle repose sur une couche de faible cohésion, dite "couche fragile" (voir début du paragraphe 3.2.2.).

Si la couche fragile est enfouie à plus d'un mètre sous la surface, la contrainte d'un skieur sera, le plus souvent, bien amortie. Il faut néanmoins garder en mémoire que le vent a certainement réparti la neige de manière très inégale dans la pente, et que la couche fragile peut se trouver plus près de la surface à certains endroits.

Une plaque se déclenche si un autre ancrage faiblit et disparaît, ou à la suite d'une

surcharge extérieure, comme :

- l'augmentation des contraintes due à une nouvelle chute de neige ;
- le passage d'un ou plusieurs skieurs (alourdissement et effet de cisaillement).

La configuration du terrain joue alors un grand rôle :

- les ruptures se produisent en général un peu en contrebas des convexités, où le manteau neigeux, constitué de grains soudés par frittage, est soumis à des efforts en traction auxquels il résiste particulièrement mal (contrairement aux efforts en compression) ;
- les zones de transition entre éboulis et alpage (changement de rugosité du sol) peuvent également expliquer des localisations particulières.

Des études menées sur le terrain permettent de dire que le danger de déclenchement de plaques est plus fréquent sur des pentes comprises entre 30 et 45 degrés. Au-dessous de 30°, la plaque s'effondre généralement sans glisser, tandis qu'au-dessus de 45°, si le danger ne disparaît pas complètement, il sera le plus souvent limité car les versants se purgent habituellement pendant ou juste après les chutes de neige. Malheureusement, les domaines d'évolution à ski se situent dans cette fourchette de pentes et ceci explique que plus des trois-quarts des accidents d'avalanche mortels sont imputables à ce type d'avalanche.

3.2.3. Avalanches de fonte

Ce type d'avalanche concerne des manteaux neigeux composés, en partie ou totalement, de grains ronds (issus de la métamorphose de neige humide). Le risque de départ est directement lié à la présence d'eau sous forme liquide.

3.2.3.1. Description

- Zone de départ : en général, le départ est ponctuel, mais il peut arriver qu'il y ait une cassure linéaire, car l'humidification des couches n'est pas toujours homogène et une certaine cohésion (de frittage) peut encore partiellement subsister. Les pentes les plus exposées au soleil (sud-est à ouest) seront les premières à se déclencher.
- Zone de transition : ces avalanches suivent des parcours privilégiés bien localisés (fonds de thalwegs, torrents) et sont des agents d'érosion importants en montagne. La fréquence des déclenchements peut empêcher la végétation de repousser sur leur trajet et mettre la roche à nu. La pression exercée sur les obstacles rencontrés lors du parcours représente des dizaines de tonnes par m². Ceci explique l'arrachement de blocs de rochers ou d'arbres. S'agissant d'un mélange à faible viscosité, ces masses de neige peuvent se déclencher sur des pentes à peine supérieures à 25°.
- Zone d'arrêt : les avalanches de ce type transportent jusqu'au fond des vallées

d'énormes quantités de neige associées à toutes sortes de matériaux arrachés sur la zone de départ ou sur le trajet. La zone de dépôt est constituée de blocs informes, de masse volumique importante (jusqu'à 500-600 kg/m³), qui se chevauchent sur un cône d'avalanche de plusieurs mètres de hauteur. Il se peut ensuite que la neige persiste longtemps dans la vallée, alors qu'aux alentours la végétation a déjà pris les couleurs estivales.

3.2.3.2. Causes de déclenchement

C'est l'augmentation de la teneur en eau liquide (T.E.L.) qui est à l'origine des départs. Les couches de neige soumises à une forte saturation en eau vont avoir tendance à perdre toute cohésion. Ceci est d'autant plus vrai que l'eau a tendance à s'écouler à travers la neige et à s'accumuler au-dessus des couches imperméables (croûtes de regel ou sol) qui constitueront alors d'éventuels plans de glissement. Le ruissellement de l'eau de fonte va jouer dans ce cas le rôle de lubrifiant.

De plus, le poids de cette eau est inégalement réparti au sein du manteau (concentration vers les creux - stockage dans des strates à forte capacité de rétention), ce qui occasionne des surcharges locales qui affecteront la stabilité.

À ces augmentations de contraintes s'ajoute un affaiblissement des résistances puisque l'on passe d'une cohésion de regel ou de frittage, le plus souvent très bonne, à une cohésion capillaire, généralement peu élevée.

Ces avalanches s'observent essentiellement au printemps (lorsque le rayonnement est le plus intense et de plus longue durée et que l'albédo de la neige est le plus faible) et plus particulièrement l'après-midi (l'énergie absorbée par le manteau étant alors à son maximum). Néanmoins, si certains facteurs météorologiques ont contrarié le regel nocturne, des déclenchements peuvent se produire à toute heure de la journée. L'exposition de la pente joue également un rôle important, les versants sud et ouest étant particulièrement concernés. L'inclinaison de la pente est aussi un facteur déterminant dans le déclenchement des avalanches de fonte : les pentes raides sont naturellement concernées en premier.

L'observation de la T.E.L. du manteau neigeux, à différentes altitudes et expositions, peut être une bonne façon de préciser le risque de départs d'avalanches de ce type.

Paradoxalement, ces avalanches, qui mettent en mouvement les plus grandes masses de neige, sont relativement moins dangereuses que les autres. En effet, les trajets qu'elles empruntent sont plus prévisibles, de même que, dans une certaine mesure, le moment où elles se produisent. De plus, leur vitesse est plus faible, ce qui laisse, dans certains cas, le temps au skieur de s'échapper de la zone d'écoulement.

3.3. Facteurs de déclenchement

Les facteurs susceptibles d'engendrer une avalanche, peuvent être divisés en 2 catégories :

- les paramètres variables (conditions météorologiques passées et prévues, stratification du manteau neigeux).
- les paramètres fixes (topographie).

3.3.1. Paramètres météorologiques

Parmi les paramètres à surveiller on peut citer :

- **les précipitations** : le poids de nouvelles chutes de neige (ou de pluie) risque de compromettre l'équilibre du manteau neigeux. Par ailleurs la pluie, dès lors qu'elle n'est pas faible, aura le même effet que l'eau de fonte sur la stabilité du manteau neigeux (percolation, accumulation dans des zones de rétention et ruissellement sur une couche imperméable) ;
- **le vent** : sur une neige légère et non consolidée, l'effet combiné de transformation mécanique des cristaux, de répartition inégale du manteau neigeux et de reprise des cristaux déposés au sol augmentera localement le risque de départs naturel ou de déclenchements accidentel d'avalanches (de plaque) ;
- **la température de l'air** : elle a des effets complexes et parfois contradictoires sur la stabilité de la neige. Proche ou supérieure à 0 °C, elle agit sur la couche de surface et conduit à des coulées superficielles ou à des avalanches de fonte. Lorsqu'elle est nettement négative, elle favorise les métamorphoses de gradient et facilite l'apparition de grains anguleux de faible cohésion. De plus, les températures froides maintiennent longtemps le risque de départs d'avalanches de neige récente en retardant le tassement des couches de neige fraîche. La température de l'air n'est pas le seul élément qui intervient dans le bilan thermique du manteau neigeux : il faut également citer l'humidité de l'air, la nébulosité, l'exposition du site, le vent (accélération des échanges thermiques entre l'air et le manteau neigeux).
- **Le rayonnement solaire** : l'effet du rayonnement est plus ou moins fort en fonction de la saison (voir chapitre "Propriétés physiques"), de l'inclinaison de la pente, de la qualité de la neige (albédo) et de la présence de nuages le jour ou la nuit (une nuit de ciel clair = fort gradient en surface du manteau neigeux en hiver, = regel nocturne au printemps).
- L'altitude de **l'isotherme 0°C**, la **limite pluie-neige** sont des éléments à surveiller et à prendre en compte également.

Ces différents facteurs météorologiques se combinent assez souvent entre eux pour conduire à une situation avalancheuse.

3.3.2. Paramètres nivologiques

Des paramètres internes au manteau neigeux expliquent aussi assez souvent la survenue d'avalanches :

- formation de sous-couches sans cohésion (faces planes, gobelets) à la suite de métamorphoses de gradient fort ou moyen ;
- présence d'inter-strates fragiles, qui résistent mal au cisaillement et sont propices au glissement. Elles proviennent de la mauvaise adhérence d'une chute de neige sur une surface lisse (croûte de glace, de radiation, etc.), ou d'un film d'eau qui s'accumule au-dessus de couches imperméables, ou encore d'une petite couche de neige roulée, de givre de surface enfoui, etc.

3.3.3. Paramètres de terrain

Certains paramètres liés au terrain peuvent aggraver le risque d'avalanche :

- profil de la pente : une pente convexe (la traction exercée sur le manteau est alors plus élevée) augmente le risque de départ. Rappelons également que plus la pente est forte, plus le manteau neigeux est soumis à une traction importante !
- exposition du versant : la transformation (tassement) est plus rapide en versant sud (mais avec le risque de coulées de neige mouillée). En revanche, en versant nord, la neige reste plus souvent et plus longtemps froide, sans cohésion et faces planes et gobelets peuvent s'y développer. Le risque de déclenchement, dans ce cas, persiste longtemps. L'exposition aux vents dominants a également des conséquences sur la localisation des accumulations de neige et des plaques en fonction de la direction locale du vent ;
- état du sol : certains états du sol favorisent également les départs d'avalanches, comme les herbes longues couchées par la première chute de neige, les grandes dalles de schiste lisses, etc. Mais cela ne concerne que les avalanches de fond (c'est-à-dire partant sur toute l'épaisseur du manteau neigeux) que l'on peut observer au début de l'hiver et parfois aussi au cours de la saison ;
- végétation : la végétation basse (arbustes, rhododendrons, arcoses, etc.), si elle est recouverte entièrement, s'oppose au tassement des premières chutes de neige et favorise la métamorphose de fort gradient. L'ancrage inférieur du manteau neigeux est alors mal assuré et il y a risque de rupture brutale lorsque le poids de la neige fera plier les branches. En revanche, la forêt, à condition qu'elle soit suffisamment dense, favorise l'ancrage du manteau neigeux et modère les effets du vent ;
- d'autres paramètres peuvent aussi intervenir, notamment l'altitude pour son lien avec la température, et l'inclinaison de la pente (en résumé, plus c'est raide, plus il faut se méfier) et son influence sur l'effet du rayonnement solaire, etc.

Bibliographie

- [1] SIVARDIERE F., (2009), *"Avalanches - Connaître et comprendre pour limiter le risque"*, Éditions Glénat.
- [2] ANCEY C. (coordonnateur), (1998), *"Guide neige et avalanches - connaissances, pratiques, sécurité"*, Éditions Édisud.
- [3] SCHWEIZER J., (1998), *"Déclenchement de plaques par les skieurs"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 82, pp. 2-7.
- [4] SERGENT C., (1998), *"Les métamorphoses de la neige"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 83, pp. 2-10.
- [5] DUCLOS A., (1999), *"Déclenchement de plaques « à distance »"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 86, pp. 2-5.
- [6] DUCLOS A., (1999), *"Couches fragiles : informations pour le montagnard"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 88, pp. 14-18.
- [7] VIDAL L., (2000), *"Influence de la rigidité d'une plaque sur le comportement d'une couche fragile"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 91, pp. 20-24.
- [8] REY L., COLEOU C., (2004), *"Aide à la reconnaissance des divers grains de neige"*, revue de l'A.N.E.N.A. , N° 107, pp. 8-11.