Chapitre 3

Les métamorphoses de la neige, propriétés physiques et mécaniques

Claude Sergent
Eric Martin
Christophe Ancey

L'examen d'une coupe , réalisée dans un manteau neigeux, montre que celui-ci est constitué d'un empilement de strates de neige aux propriétés physiques et mécaniques différentes. Chacune de ces strates se constitue au cours d'un épisode neigeux. Les conditions météorologiques au moment de la chute ainsi que celles qui règnent ensuite lui confèrent ses caractéristiques. Celles-ci continuent d'ailleurs d'évoluer jusqu'à la fonte finale. Outre les conditions météorologiques proprement dites, l'exposition topographique joue un rôle important car elle peut influencer fortement l'effet des événements météorologiques. Le manteau neigeux est donc un matériau hétérogène. Les caractéristiques physiques et mécaniques d'une strate de neige dépendent en grande partie des types de cristaux de neige qui la composent. À partir de la neige fraîche qui se dépose, on assiste à des transformations des cristaux initiaux sous l'influence d'effets thermodynamiques et mécaniques. Ces transformations, ou métamorphoses, conduisent de la neige fraîche à la fonte par une évolution continue. Les phases de transition sont caractérisées par des combinaisons de cristaux (appelés aussi grains de neige) à des stades d'évolution différents.

3.1 Métamorphoses

La neige est un matériau poreux dont la température est toujours inférieure ou au plus égale à 0°C. Mélange d'air et de glace, uniquement à température négative, on dit alors que la neige est sèche. Cependant l'air contient de la vapeur d'eau et l'eau est alors présente sous deux de ses phases, gazeuse et solide. Lorsqu'il y a présence d'eau liquide, la neige est dite humide. La coexistence des trois phases de l'eau (gazeuse, liquide, solide), en équilibre thermodynamique, se traduit par une température de 0°C.

Lorsque la neige est sèche, les métamorphoses des grains de neige se font par l'intermédiaire de la phase vapeur alors que dans le cas de la neige humide, elles se font essentiellement par la phase liquide, la phase gazeuse étant généralement assez réduite. C'est la raison pour laquelle nous distinguerons deux types de métamorphoses : les métamorphoses de la neige sèche et les métamorphoses de la neige humide [1]. Outre ces transformations thermodynamiques, les cristaux de neige peuvent subir des transformations liées à des contraintes mécaniques dues au vent ou, lorsqu'ils sont enfouis, au poids des couches de neige supérieures. Il existe plusieurs facteurs ou moteurs des métamorphoses. Certains ne concernent que la neige sèche. Dans le cas de neige humide, la présence d'eau liquide associée à une isothermie à 0°C diminue ou empêche leur action et ce sont d'autres agents qui interviennent alors.

3.1.1 La neige sèche

Agents des métamorphoses de la neige sèche

En l'absence d'eau liquide, les transformations de la neige sont dues soit à des effets mécaniques, soit à des phénomènes thermodynamiques ou n'interviennent que deux phases de l'eau, solide et gazeuse [2].

Effet de rayon de courbure des cristaux

Nous avons vu précédemment (chap. 2) que l'air ne peut contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau (tension de vapeur saturante), ne dépendant que de la température. Au voisinage d'une surface de glace, cette quantité dépend aussi de la forme de cette surface, laquelle peut être caractérisée par son rayon de courbure. On considère que les formes convexes (pointes, bosses) ont des rayons de courbure positifs et que les formes concaves (creux) ont des rayons de courbure négatifs. Ceux-ci sont d'autant plus petits, en valeur absolue, que les convexités ou concavités sont prononcées. Au voisinage des convexités, les tensions de vapeur saturante sont d'autant plus élevées que les rayons de courbure sont petits et inversement au voisinage des concavités. Les quantités de vapeur d'eau ont donc tendance à être plus importantes au voisinage des fortes convexités qu'au voisinage des faibles convexités et surtout des concavités.

Le déséquilibre de répartition des tension de vapeur provoque l'établissement d'un flux de vapeur d'eau des zones convexes vers les zones concaves. La sous-saturation qui en résulte au voisinage des convexités se traduit par la sublimation

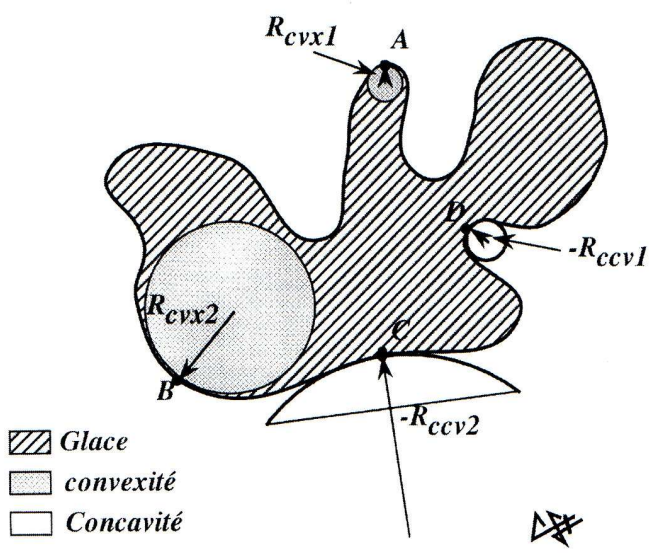

Figure 3.1 Schéma explicatif des rayons de courbure : Le rayon de courbure **Rcvx1**, en **A**, est le rayon du cercle qui s'inscrit au mieux dans la convexité en **A**. **Rcvx1** est plus petit que **Rcvx2** et la convexité au voisinage du point **A**, est plus marquée qu'au voisinage du point B. Pour les concavités aux points **C** et **D**, **Rccvl** est plus petit que **Rccv2** et la concavité est plus marquée au point **D** qu'au point **C**.

d'une partie de la glace. À l'inverse, la sursaturation qui apparaît au voisinage des zones moins convexes et concaves a pour conséquence la condensation solide, sur ces surfaces, de la vapeur d'eau en trop. A l'échelle des grains, ce processus se traduit par un adoucissement des contours, par la disparition des plus petits grains et même à un arrondissement des cristaux à l'issue d'un temps assez long. On constate qu'il y a transfert de glace des parties convexes vers les parties concaves par l'intermédiaire de la phase vapeur.

Une autre conséquence importante de l'effet de rayon de courbure est l'apparition de la cohésion de frittage. Lorsque deux grains de neige, que nous supposerons sphériques pour simplifier la démonstration, sont en contact, la zone de contact forme une concavité. La vapeur d'eau a donc naturellement tendance à se condenser autour du point de contact, créant ainsi un pont de glace entre les deux grains. On dit alors qu'il y a cohésion de frittage entre les deux grains. La rapidité de formation et l'importance des ponts de glace sont d'autant plus grandes que les grains de neige sont petits. Chaque fois qu'il y a contact entre les grains de neige, un pont de glace se forme conférant à la neige une certaine cohésion dont la qualité dépend du nombre de ponts de glace. Les neiges sèches constituées de petits grains ($< 0{,}3 - 0{,}4$ mm) ont donc en général une bonne cohésion de frittage, tandis que celles constituées de grains plus gros ont une plus faible cohésion de frittage.

Gradient vertical de température

Le gradient vertical de température d'une couche de neige caractérise la répartition verticale de température dans cette couche. D'une façon générale, la base du manteau neigeux est à une température proche de 0°C, alors qu'en surface, lorsque

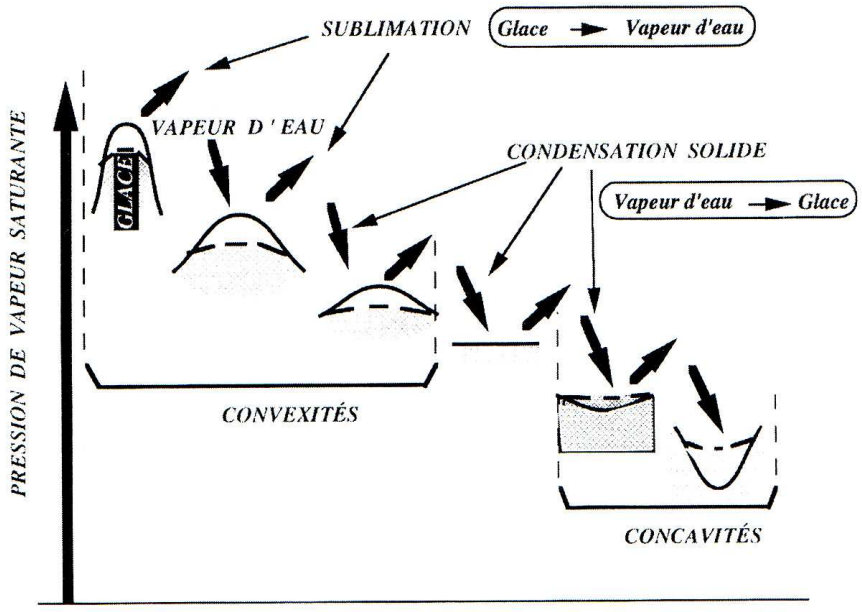

Figure 3.2 Schéma des transferts de glace, par la phase vapeur, des surfaces les plus convexes vers les surfaces moins convexes et concaves.

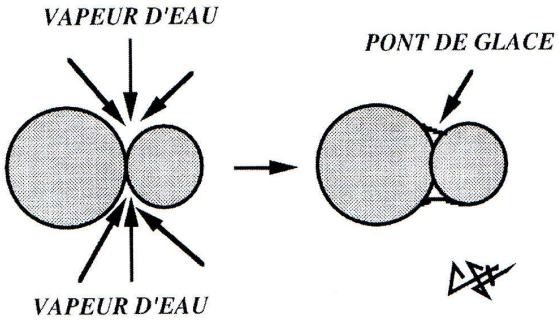

Figure 3.3 Schéma explicatif du phénomène de frittage. La concavité autour du point de contact entre les deux grains est le siège de la condensation solide de ta vapeur d'eau.

la neige est sèche, la température peut être assez basse avec des valeurs atteignant parfois -20 à -30°C. Le gradient vertical de température est exprimé par le rapport entre la différence de température entre deux niveaux et la distance verticale qui sépare ces deux niveaux. Il est lié à la qualité d'isolant de la neige, fonction de la quantité d'air qu'elle contient, et donc de sa masse volumique. C'est donc en général dans les couches de surface, peu épaisses et généralement constituées de neiges récentes, que l'on peut rencontrer les forts gradients. Plus en profondeur, les neiges étant plus denses, ils sont moins importants. Lorsqu'une couche de neige est humide, la présence d'eau liquide implique une température uniforme de 0°C et par conséquent un gradient nul (voir § 3.1.2).

Dans une couche de neige sèche soumise à un gradient vertical non négligeable, chaque grain de neige est plus chaud que celui qui est au-dessus de lui. À son voisinage immédiat, l'air qui est à la même température, peut contenir plus de vapeur d'eau que celui du grain supérieur. Le déséquilibre local des pressions de vapeur entraîne alors un transfert de vapeur du grain le plus chaud vers le grain

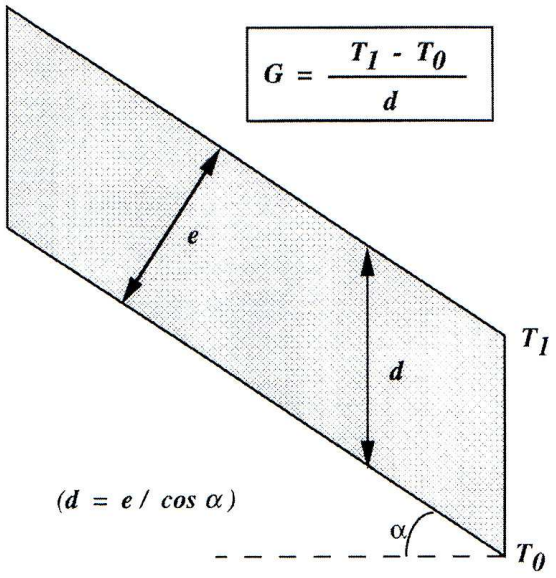

Figure 3.4 Méthode du calcul du gradient vertical de température pour une couche de neige située sur une pente.

le plus froid. Pour combler la perte de vapeur d'eau à son voisinage, le grain le plus chaud se sublime donc en partie. Au dessus, le grain plus froid élimine le trop plein de vapeur d'eau à son voisinage en subissant une condensation solide de ce trop plein, caractérisée par l'apparition d'angulosités (cristallisation dans le système hexagonal). On dit aussi que ce dernier subit un givrage. On peut observer qu'il y a transfert de glace de grain à grain par l'intermédiaire de la phase vapeur.

Température

Dans le cas de la neige sèche, la température a un rôle important sur les métamorphoses car elle les freine ou les accélère. La quantité maximale de vapeur d'eau qu'il peut y avoir au voisinage d'un grain de neige est fortement liée à la température de l'air environnant. Plus la température d'une couche de neige est proche de 0°C, plus les transferts de glace par la phase vapeur sont efficaces. L'adoucissement des contours des grains et leur arrondissement, liés à l'effet du rayon de courbure, sont alors plus rapides. Pour ce qui est de l'effet dû au gradient de température, les transferts de grains à grain sont aussi plus rapides. À titre d'exemple, deux couches de neige identiques, de 30 cm d'épaisseur et dont les températures base/sommet sont respectivement de $-5/-20$°C et de $-15/-30$°C, sont soumises au même gradient de température (50°C/m). Néanmoins, la première couche évoluera plus vite, sa température moyenne étant plus élevée que celle de la seconde.

Vent

Il s'agit dans ce cas d'un agent mécanique de transformation des cristaux de neige qui peut agir soit au moment des chutes de neige, soit après une chute de neige lorsqu'il est capable de reprendre la neige de surface dont la masse volumique et la cohésion sont encore assez faibles [3]. Les turbulences liées au vent provoquent la sublimation d'une partie des cristaux et des collisions entre ceux-ci. Les structures

dendritiques fragiles résistent mal aux chocs et se brisent. Plus le vent est fort, plus les collisions sont nombreuses, réduisant les cristaux à de petites particules de glace parfois très fines (diamètre $< 0{,}1$ mm). De même, pour ce qui concerne la sublimation si l'air est très sec. Lorsque cette neige se dépose, elle prend une cohésion de frittage. Celle-ci est d'autant plus forte et se fait d'autant plus rapidement que les particules sont petites. Le dépôt qui se constitue généralement dans des combes abritées des vents forts, peut avoir une consistance friable ou dure suivant la nature des grains de neige présents. C'est ce phénomène qui est aussi à l'origine de la formation des corniches.

Métamorphoses pendant la chute de neige

Lors d'une chute de neige par température négative, les cristaux, souvent agglomérés en flocons, peuvent être soumis à l'action mécanique du vent qui a pour conséquence, comme montré plus haut, de briser plus ou moins, suivant sa vitesse, les structures dendritiques fragiles. Si les destructions ne sont pas très importantes, on peut encore voir de nombreuses formes originelles dendritiques et on ne parle plus de cristaux de neige fraîche (symbole : +) mais des particules reconnaissables (symbole /). Si les destructions sont très importantes, la neige qui se dépose est constituée de très fines particules et il devient difficile de trouver encore des structures dendritiques. Ces cristaux ou grains de neige se nomment grains fins (symbole ∘), que l'on pourrait qualifier de mécaniques, étant donné leur origine et par différenciation avec ceux qui sont obtenus par des mécanismes thermodynamiques (voir § 3.1.1).

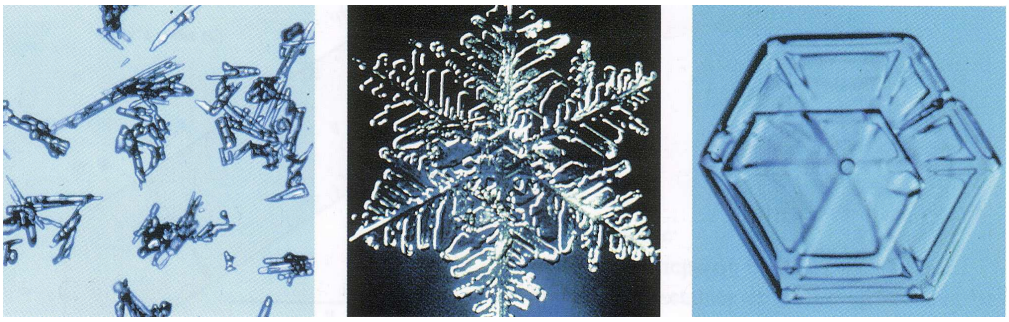

Figure 3.5 Différents types de cristaux de neige fraîche : plaquette, étoile, aiguilles. Photographie Météo-France/CEN/Edmond Pahaut.

Si on fait abstraction du vent, les cristaux de neige pendant leur chute, sont soumis à l'effet de rayon de courbure dont la conséquence est un adoucissement des contours. Cet effet est d'autant plus marqué que la température de l'air est proche de 0°C. Cependant, il est insuffisant pour faire disparaître toute forme dendritique et la neige qui se dépose est alors du type particules reconnaissables. Avec des températures assez basses (< -10 à -8°C) l'effet de rayon de courbure est peu efficace et la neige qui se dépose est généralement composée de cristaux peu transformés de neige fraîche. En fait, aux altitudes moyennes (1800–2000 m), les chutes de neige sont souvent accompagnées de vent plus ou moins forts et de températures de l'ordre de -3 à -6°C. Dans ces conditions la neige qui se dépose est constituée d'un mélange de fragments dendritiques et de cristaux aux contours

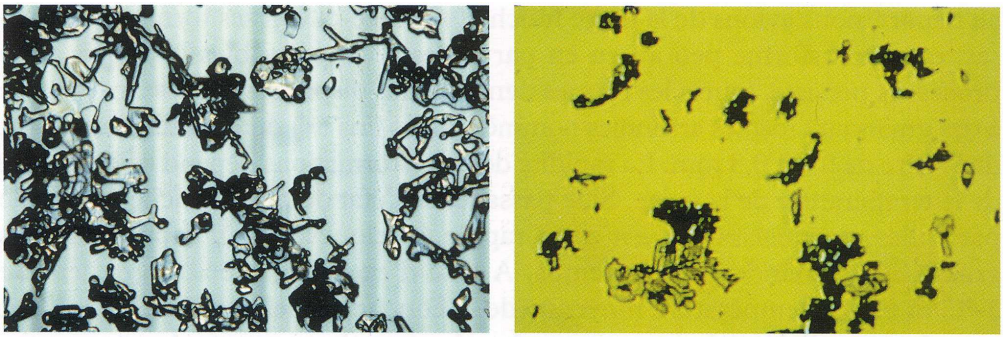

Figure 3.6 Particules reconnaissables photographiées à différents grossissements (à gauche). Grains fins (neige ventée) (à droite). Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond Pahaut.

adoucis, le tout étant souvent plus ou moins givré (gouttelettes d'eau surfondues captées pendant la chute).

Avec la réduction des structures dendritiques, la neige déposée voit ses distances inter-granulaires diminuer et, par conséquent sa masse volumique augmente. Une neige tombée sans vent par une température assez basse de l'ordre de $-15°C$ a en moyenne une masse volumique de l'ordre de 20 à 50 kg/m^3, alors qu'avec un vent de l'ordre de 10 m/s et une température de $-5°C$, elle peut atteindre des valeurs de 150 à 200 kg/m^3. Mais on constate qu'en moyenne, au moment de la précipitation, la neige a une masse volumique de l'ordre de 100 kg/m^3, ce qui permet d'appliquer la correspondance : 10 cm de neige/10 mm d'eau.

Autre conséquence de la diminution des distances inter-granulaires : le nombre des points de contact, autour desquels se produit le frittage, augmente et la cohésion aussi. Plus les transformations sont importantes pendant la chute (vent fort, température proche de 0°C), plus la neige déposée a une forte densité et une forte cohésion de frittage.

Il faut garder à la mémoire que plusieurs jours après une chute de neige, tombée sans vent et restée légère du fait de températures assez basses, le vent peut se lever et effectuer une reprise de cette neige pour la transporter, parfois sur de longues distances, et la déposer dans les endroits où il se calme. On assiste alors au même phénomène que lors des chutes de neige ventées avec le risque de surcharges locales pouvant donner lieu à des départs spontanés d'avalanche.

Métamorphose de faible gradient ($G < 5°C/m$)

Au sein d'une strate de neige sèche, les effets de rayon de courbure et de gradient de température sont simultanés mais antagonistes puisque l'un tend à arrondir les cristaux alors que l'autre tend à les rendre anguleux. C'est la valeur du gradient qui commande le type de transformation [4].

Pour de faibles gradients ($G < 5°C/m$), l'effet de rayon de courbure l'emporte sur l'effet de gradient, ce qui provoque un arrondissement des grains. Si au départ, nous avions de la neige fraîche (+), celle-ci voit ses formes s'émousser, et se transforme peu à peu en particules reconnaissables (/), puis, si le processus persiste, toutes les formes dendritiques disparaissent laissant la place à des grains aux

formes arrondies nommés grains fins (∘) dont les diamètres sont de l'ordre de 0,1 à 0,3 mm. La rapidité des transformations dépend évidemment de la température de la neige. Si le passage, de l'état de neige fraîche à l'état de particules reconnaissables, est assez rapide (quelques jours), l'apparition des grains fins demande plus de temps. À titre d'exemple, avec un gradient de 3°C/m et une température moyenne de la couche de neige de −3,5°C, il faut attendre une dizaine de jours pour obtenir un mélange particules reconnaissables/grains fins.

Dans cette métamorphose, la disparition des formes dendritiques se traduit par un rapprochement des grains, et par là même à une augmentation du nombre des points de contact autour desquels le frittage se produit. À l'échelle de la strate de neige, on observe alors un tassement général, avec une augmentation notable de la masse volumique qui atteint alors 200 à 300 kg/m^3 et le passage de la cohésion de feutrage (imbrication des dendrites) à la cohésion de frittage. Au début de la perte de cohésion de feutrage, on peut assister sur les pentes les plus raides à des instabilités à l'origine de purges spontanées. Mais, la prise de cohésion de frittage confère ensuite à la strate une meilleure stabilité. De plus, cette cohésion est d'autant meilleure que les grains sont petits puisque les points de contact sont nombreux. Seule ombre au tableau, ce type de neige manque de plasticité et supporte mal les contraintes.

Métamorphose de moyen gradient ($5°\mathbf{C/m} < G < 20°\mathbf{C/m}$)

Dans ce cas, la différence de température, selon la verticale, entre les grains devient sensible. Chaque grain est plus chaud que celui qui est au-dessus de lui. L'effet de gradient entre en concurrence avec l'effet de rayon de courbure et l'emporte. Les flux de vapeur liés aux différences de température entre les grains sont plus importants que ceux liés aux différences de courbure. La cristallisation de la vapeur d'eau aux points froids, caractérisée par l'apparition d'angulosités, est plus rapide que la sublimation liée à l'effet de rayon de courbure. Néanmoins, l'effet de courbure permet au début de la métamorphose de provoquer la sublimation des petits grains, induisant une augmentation moyenne des tailles de grains. Le résultat global est donc l'apparition d'un type de grains anguleux comportant des facettes faisant des angles à 120° (cristallisation dans le système hexagonal. Ces grains sont appelés grains à faces planes (symbole □).

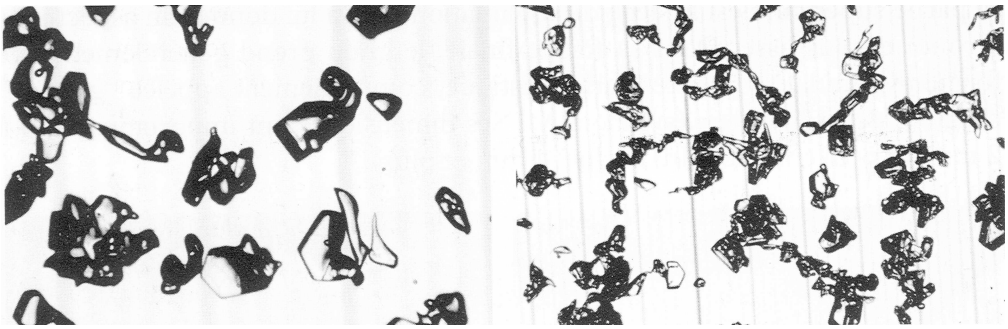

Figure 3.7 Grains à faces planes photographiés à différents grossissements. Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond Pahaut.

Cette métamorphose peut affecter la neige fraîche, les particules reconnaissables

et les grains fins. Dans les deux premiers cas, elle s'accompagne d'un tassement important de la couche de neige lié à la disparition rapide des structures dendritiques. Pour ce qui concerne les grains fins, la variation de densité est faible. Avec un gradient de 15°C/m, Il faut environ 10 jours pour qu'une neige fraîche se transforme en un mélange de particules reconnaissables et de grains à faces planes. Les grains à faces planes ont en moyenne des masses volumiques de l'ordre de 250 à 350 kg/m^3 . Leurs tailles sont sensiblement plus élevées que celles des grains fins, pouvant aller en moyenne de 0,4 à 0,6 mm de diamètre. Ceci à pour conséquence un moins grand nombre de points de contact et donc une faible cohésion de frittage. La présence de cette neige est une source d'instabilité lorsqu'elle est recouverte par d'autres chutes de neige. Une telle strate, dite couche fragile, est souvent observée comme plan de glissement dans les avalanches, notamment de type déclenchement accidentel. Cependant, lorsqu'une couche de grains à faces planes est soumise à un faible gradient, l'effet de rayon de courbure peut alors provoquer un retour vers des formes arrondies. S'ils sont encore assez petits, la cohésion de frittage peut à nouveau consolider la strate.

Métamorphose de fort gradient ($G > 20$ °C/m)

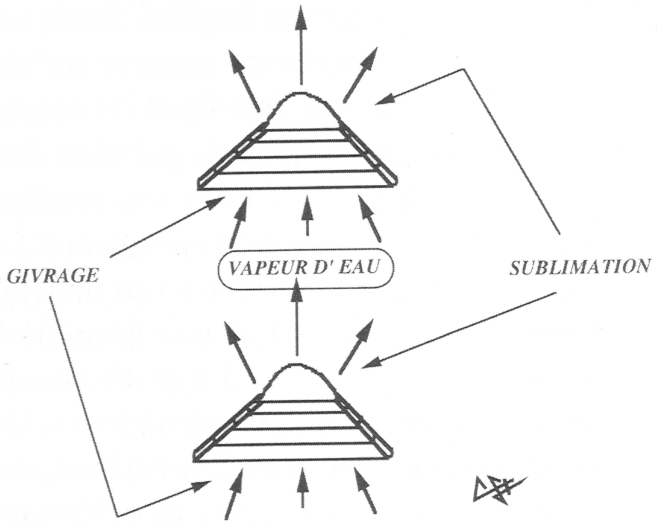

Figure 3.8 Schéma de formation des gobelets.

Dans ce cas, la différence de température entre les grains suivant la verticale est très marquée, et les flux de vapeur sont plus intenses. Le premier stade de transformation se caractérise par l'apparition rapide de grains à faces planes accompagnée d'un tassement notable pour ce qui concerne la neige récente (+ ou /). Puis, peu à peu, chaque grain voit sa base croître par condensation de la vapeur d'eau provenant du grain inférieur. En raison de l'intensité du flux de vapeur, cette condensation se fait sous la forme de marches de glace. D'autre part, sa partie supérieure est le siège de sublimation qui va lui donner un aspect plus arrondi et plus lisse. Dans sa forme finale, le grain prend généralement une forme pyramidale striée très caractéristique, communément appelée « gobelet » ou givre de profondeur (symbole △). Ses dimensions sont importantes (0,6 à 2 mm et peuvent atteindre parfois 4 mm et plus).

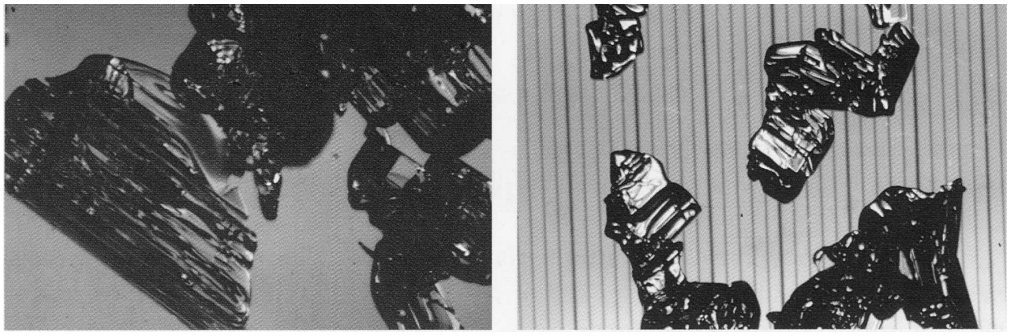

Figure 3.9 Gobelets (ou givre de profondeur) photographiés à différents grossissements. Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond Pahaut.

'A l'échelle de la strate de neige, ces grains de grosse dimension impliquent une très faible cohésion de frittage, les points de contact étant peu nombreux. Elle se comporte de façon caractéristique comme du gros sel et coule dans la main quand on essaye de la manipuler. Sa masse volumique, peu différente de celle des faces planes, varie entre 250 et 400 kg/m^3. C'est évidemment une neige qui, enfouie au sein du manteau neigeux, induit une instabilité latente importante. Surmontée d'une strate dure, elle est aussi à l'origine de nombreux départs d'avalanches suite à des surcharges naturelles ou accidentelles. La croissance des gobelets nécessite des échanges de vapeur d'eau de grain à grain ainsi que de l'espace pour se développer. La densité de la neige initiale, pour permettre ceci, ne doit pas être trop élevée. Dans des conditions naturelles, les neiges dont les densités excédent 350 kg/m^3 ont peu de chance d'évoluer en gobelets, tout au plus en grains à faces planes. Il faut noter que, même avec le rétablissement d'un faible gradient, les gobelets ne peuvent plus être transformés et que la strate gardera sa fragilité. Seule une humidification notable pourra les transformer. L'expérience montre qu'une couche de neige constituée de grains fins, d'une densité de 260 kg/m^3 et soumise à un gradient de l'ordre de 55°C/m, se transforme en couche de gobelets dont les tailles atteignent en moyenne 2 mm au bout de 26 jours. Un très fort gradient peut en quelques jours transformer une neige récente en grains à faces planes. Un exemple assez classique est celui d'une faible chute de neige (10 cm) qui se dépose sur un manteau neigeux humidifié, cette chute étant suivie d'un refroidissement sensible avec des températures de surface de l'ordre de −10°C. Le gradient subi est alors de l'ordre de 100°C/m (base de la couche à 0°C). En deux jours, des grains à faces planes peuvent apparaître et, avec le tassement, constituer une couche fragile, de l'ordre de quelques centimètres, très dangereuse pour l'avenir.

3.1.2 Neige humide

Lorsque de l'eau liquide est présente dans la neige, on dit qu'elle est humide et la température d'équilibre entre les trois phases présentes de l'eau (solide, liquide et gazeuse) est nécessairement de 0°C. Si ceci est vrai à l'échelle de la strate de neige humide, il n'en est pas de même à l'échelle des grains de neige pour lesquels les températures d'équilibre ou températures de fusion de la glace vont être légèrement inférieures ou même parfois supérieures à 0°C (entre quelques millièmes

et quelques dix millièmes de degré) suivant leur forme (convexité ou concavité) ou leur grosseur [5]. Ces très petites variations ainsi que la quantité d'eau liquide présente permettent d'expliquer les métamorphoses observées dans ce cas. On peut distinguer deux régimes de transformation liés à la quantité d'eau liquide présente, ou teneur en eau liquide (TEL) [6], ou encore à la composition du mélange eau, glace, air (vapeur d'eau).

Régime des faibles TEL

Dans le cas où la quantité d'eau liquide est faible (TEL massique < 2 %), celle ci, sous l'effet des forces de capillarité, se loge autour des points de contact, formant ainsi un ménisque d'eau entre les grains ainsi que dans les creux des grains. Dans cette configuration, les diamètres des grains et, surtout, les forces capillaires exercées entre les grains, vont avoir pour effet d'abaisser la température d'équilibre ou point de fusion de la glace. Plus la quantité d'eau est faible et plus les forces capillaires sont importantes et abaissent la température de fusion (de l'ordre du millième de degré au-dessous de 0°C). Les grains, dont les ménisques sont les plus petits en volume, auront donc tendance à fondre les premiers. Ce phénomène conduit à une harmonisation des quantités en eau des liaisons inter granulaires.

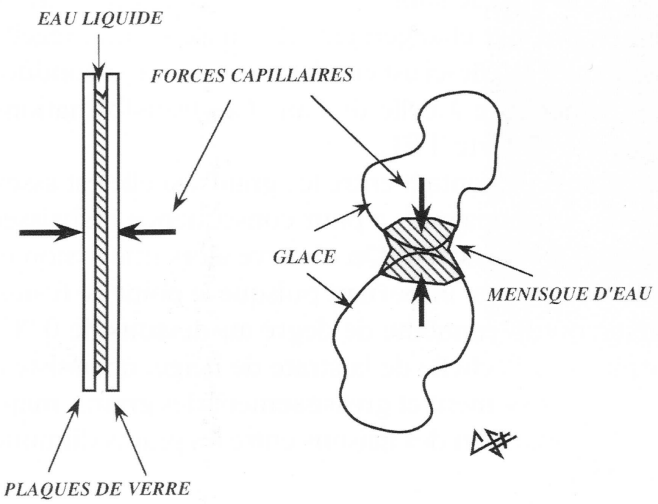

Figure 3.10 Lorsque l'on accole deux plaques de verre mouillées, on constate qu'il est très difficile de les séparer ensuite. Les forces capillaires se développent au sein du filin d'eau liquide et s'exercent sur les plaques. C'est le même phénomène qui se produit lorsque deux grains de neige humides sont en contact. L'eau liquide forme un ménisque autour du point de contact et les forces capillaires tendent à les maintenir accolés.

Pour ce qui concerne les grains, l'abaissement de la température du point de fusion est inversement proportionnel à leur diamètre. En conséquence les grains les plus petits auront tendance à fondre les premiers ainsi que les parties les plus convexes (leur petit raton de courbure les assimile à des grains de petit diamètre). Dans les deux cas, l'eau liquide libérée migre par capillarité vers les grains restants, ainsi que vers les zones concaves, provoquant leur arrondissement et leur grossissement en regelant.

Ces passages de l'état solide à l'état liquide, et inversement, induisent respecti-

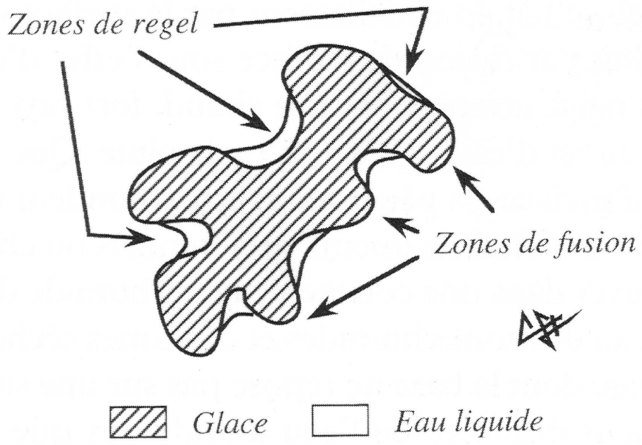

Figure 3.11 Schéma montrant, pour un grain de neige, les zones de fusion (convexités et les zones de recel (concavités).

vement absorption et libération de chaleur qui entretiennent la métamorphose. Les flux de chaleur entre les grains se font principalement par les liaisons eau/glace. À faible TEL, la phase liquide est très discontinue et cela nuit à 1a vitesse de la métamorphose. Si la TEL augmente, la métamorphose devient plus rapide en donnant de plus en plus la prédominance à l'influence du diamètre des grains. Ainsi dans le cas des faibles TEL, le grossissement des grains est assez lent du fait de la présence d'interfaces glace/air, mais devient plus rapide lorsque la TEL augmente. Cependant, même si la transformation est lente à l'échelle de la strate de neige, on observe un arrondissement des grains ainsi qu'un grossissement global. D'autre part, la présence de fortes pressions capillaires entre les grains maintient une assez bonne cohésion d'ensemble.

Régime des fortes TEL

Lorsque la TEL, devient importante (> 12 % en masse), c'est à dire lorsque la phase liquide devient continue, les interfaces glace/air n'existent plus ou très peu. Dans ce cas, la pression capillaire est faible et seul le rayon de courbure des grains a un effet sur la modification de la température du point de fusion de la glace (de l'ordre du dix millième de degré au-dessous de 0°C). Les grains les plus petits fondent alors au profit des plus gros sur lesquels il y a regel puisque la température de fusion y est plus élevée. De la même façon, les parties les plus convexes fondent au profit de celles qui le sont moins (notamment les parties concaves). Les flux de chaleurs, liés aux changements de phase (fonte, regel), se font facilement par la phase liquide. Celle-ci est en effet continue et sa conduction thermique est nettement supérieure à celle de l'air. Les transformations sont donc plus efficaces en régime de forte TEL.

La contrainte exercée aux points de contact entre les grains, si elle est assez forte (à la base d'une couche de neige épaisse), a pour conséquence d'abaisser la température du point de fusion à cet endroit. On observe alors une fusion et un élargissement des contacts. Cet effet est important puisque le point de fusion peut être de l'ordre du millième ou du centième de degré au-dessous de 0°C. Dans ce

régime de métamorphose, à l'échelle de la strate de neige, on assiste a une densification rapide avec arrondissement et grossissement des grains, mais, d'un point de vue mécanique, la disparition des liaisons entre les grains diminue fortement la cohésion globale.

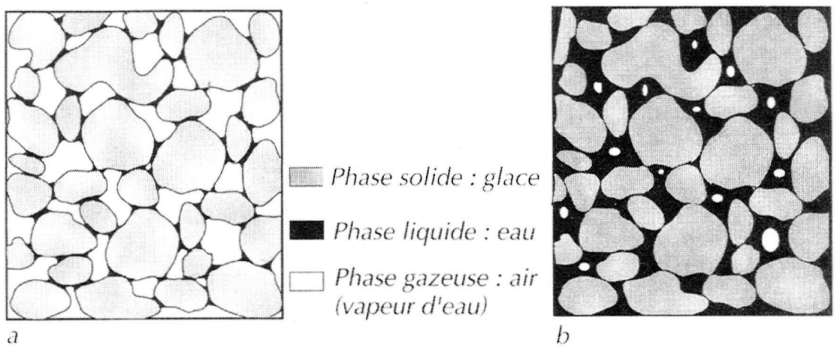

Figure 3.12 Schéma de la répartition des trois phases de 1'eau, dans le cas des faibles TEL (a) et dans le cas des fores TEL (b).

Métamorphose de la neige humide

L'humidification des strates de neige se fait essentiellement par la surface du manteau neigeux et de deux façons. Soit par fusion de surface sous l'effet d'un bilan énergétique positif des échanges neige/atmosphère (air chaud, fort rayonnement etc.), soit par l'apport direct d'eau liquide qu'est la pluie. Que ce soit l'eau de pluie, ou l'eau de fusion de surface, sa pénétration en profondeur ne se fait pas de façon homogène, mais par des cheminements préférentiels ou chemins de percolation. On peut donc trouver dans une couche de neige humide des TEL variables, voire sur un même niveau des zones humides et des zones sèches.

Cependant, pour une couche de neige dont la base ne repose pas sur une surface imperméable, il y a le plus souvent drainage de l'eau liquide dès que sa capacité de rétention en eau est dépassée [7]. La valeur de rétention en eau de la neige dépend de sa densité avant humidification et varie entre 12 % en masse pour des densités de l'ordre de 250 kg/m^3 et 7 %) pour des densités de l'ordre de 500 kg/m^3. Dans ces conditions, la métamorphose implique un arrondissement des grains assez rapide et on peut observer l'apparition de grains ronds (symbole ∘). Quant au grossissements très lent pour les basses TEL, il devient plus rapide avec les TEL proches de la valeur de rétention. L'expérience montre q'une neige récente, soumise à un humidification pendant 16 jours, se transforme en neige de grains ronds dont les diamètres atteignent environ 0,2 mm avec une TEL massique de l'ordre de 2 % et 0,6 mm si la TEL est de 10 %. À l'échelle de la strate de neige, on constate une augmentation progressive de la densité (jusqu'à 500 kg/m^3) et la cohésion, assez bonne aux faibles valeurs de TEL, tend à diminuer si cette dernière augmente.

Lorsqu'une strate de neige s'humidifiant repose sur une surface imperméable, ou sur une couche de neige dans laquelle l'eau ne peut pas s'écouler (grains plus gros ou neige moins dense, une couche saturée peut se former. Dans ces conditions la métamorphose se produit en régime de très forte TEL. D'une part, le grossissement des grains ronds est rapide et d'autre part, les liaisons de glace ainsi

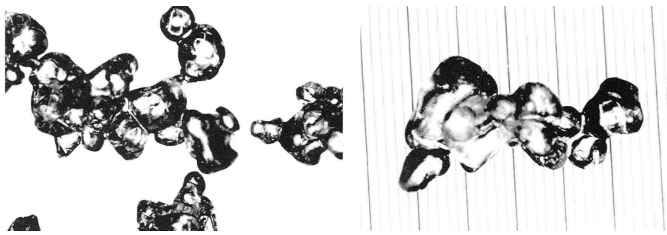

Figure 3.13 Grains ronds photographiés à différents grossissements. Les traits verticaux sont espacés de 0,2 mm. Photographies Météo-France/CEN/Edmond Pahaut.

que capillaires entre les grains disparaissent. À l'échelle de la strate, la densification importante, mais la cohésion devient très faible. On peut alors assister à des déclenchements d'avalanche de neige humide ou avalanches de fonte. Lorsque ces neiges humides subissent un refroidissement, l'eau liquide présente gèle progressivement, créant de solides liaison de glace entre les grains ronds avec formation d'agglomérats de plusieurs mm et parfois de croûtes de glace. La neige acquière alors une excellente cohésion dite de regel. C'est ce que l'on peut observer fréquemment au printemps avec l'alternance des réchauffements diurnes et des refroidissements nocturnes. Tous les types de neige peuvent être transformés par humidification en grains ronds et c'est d'ailleurs la seule transformation que peuvent subir des grains tels que les gobelets et la neige roulée. Les tailles des grains ronds sont généralement comprises entre 0,2 et 2 mm. Au cœur de l'hiver, un fort réchauffement accompagné de pluie peut donc être salutaire pour l'avenir d'un manteau neigeux fragilisé par la présence de telles strates. Il ne faut cependant pas négliger dans ce cas les risques de crue avalancheuse au moment du réchauffement.

3.2 Propriétés de la neige

Nous venons de voir comment le manteau neigeux, matériau poreux constitué de cristaux de glace, d'air (et parfois d'eau liquide), était formé et nous allons maintenant nous intéresser à ses propriétés physiques. Dans un premier temps, on passera en revue les propriétés mécaniques de la neige afin de mieux comprendre son comportement si spécifique. Dans un deuxième temps seront abordées ses propriétés thermiques.

3.2.1 Propriétés mécaniques de la neige

Généralités

Si l'on examine plusieurs échantillons de neige, on ne peut que rester perplexe devant le large éventail de comportements observés. Ainsi, on notera que la neige est un matériau compressible, hétérogène (à toutes les échelles), pouvant subir des restructurations irréversibles, et se présentant sous des consistances diverses. Examinons plus en détail ces diverses caractéristiques. La diversité des caractéristiques de la neige ne peut que rendre plus complexe l'étude fine de son comportement mécanique. Dans la pratique on examine la réponse du matériau selon les trois

sollicitations élémentaires : la compression, la traction, le cisaillement.

- Soumis à une *compression*, un échantillon de neige se tasse jusqu'à ce que la masse volumique atteigne une valeur maximale. Si la compression se fait rapidement, les grains n'ont pas le temps de se réorganiser et il y a rupture de l'échantillon. L'ordre de grandeur de la résistance à la compression est 10^5 Pa.
- Soumis à une *traction*, l'échantillon résiste jusqu'à une certaine limite fixée par sa cohésion. Meilleure est la cohésion, meilleure sera la résistance à la traction. Au-delà de ce seuil, l'échantillon casse. La résistance à la traction de la neige dépend de la vitesse de sollicitation : plus l'étirement sera rapide, plus brutale sera la rupture. En outre cette résistance est faible en comparaison de la résistance à la compression (la résistance à la traction est maximale pour des grains fins pour lesquels elle approche les 8×10^3 Pa).
- Soumis à un *cisaillement* important, un échantillon homogène se déforme jusqu'à la rupture. La *résistance au cisaillement* est essentiellement une fonction de la cohésion de la neige, mais d'autres paramètres (comme la masse volumique ou la forme des grains) jouent un rôle important. L'ordre de grandeur de cette résistance est 10^5 Pa. Si l'échantillon contient différentes strates, la résistance dépend des frottements à l'interface entre couches. La rupture se fera préférentiellement le long de ces interfaces.

On remarquera aussi que la réponse à une sollicitation est fonction du déplacement imposé, mais aussi de la vitesse de cette déformation. De même, il est important de retenir que la résistance de la neige et la déformation critique (au-delà de laquelle il y a rupture) dépendent entre autres de la vitesse de déformation.

Répartition des contraintes au sein du manteau

Quoique la force de gravitation s'applique uniformément au manteau neigeux, les contraintes au sein du couvert neigeux ne sont pas uniformes : elles varient afin de maintenir l'équilibre mécanique global au sein du manteau neigeux. Les accumulations, le relief, le déplacement imposé sur les pentes (reptation) provoquent des tensions supplémentaires (cisaillement, traction ou compression) qui évoluent en même temps que le manteau, par exemple à la suite d'une augmentation du fluage ou d'une diminution de la cohésion, etc. Quelques configurations simples permettent de comprendre l'apparition ou la répartition de ces contraintes.

- Un changement de pente donne naissance à des régions où les contraintes de traction ou de compression vont devenir prépondérantes. Si la pente augmente vers le bas (zone concave), la vitesse de reptation augmente et tend à mettre en traction le manteau. Inversement, si la pente diminue vers le bas (zone convexe), une région de compression apparaît. Comme la résistance à la traction est moindre, la zone convexe sera une zone privilégiée de rupture ; c'est pourquoi ce type de terrain est un facteur favorable au départ d'avalanches.
- Lorsque le manteau neigeux est en contact avec une paroi, on parle d'*ancrage* du manteau (même si la paroi n'a aucune action d'adhérence sur le manteau

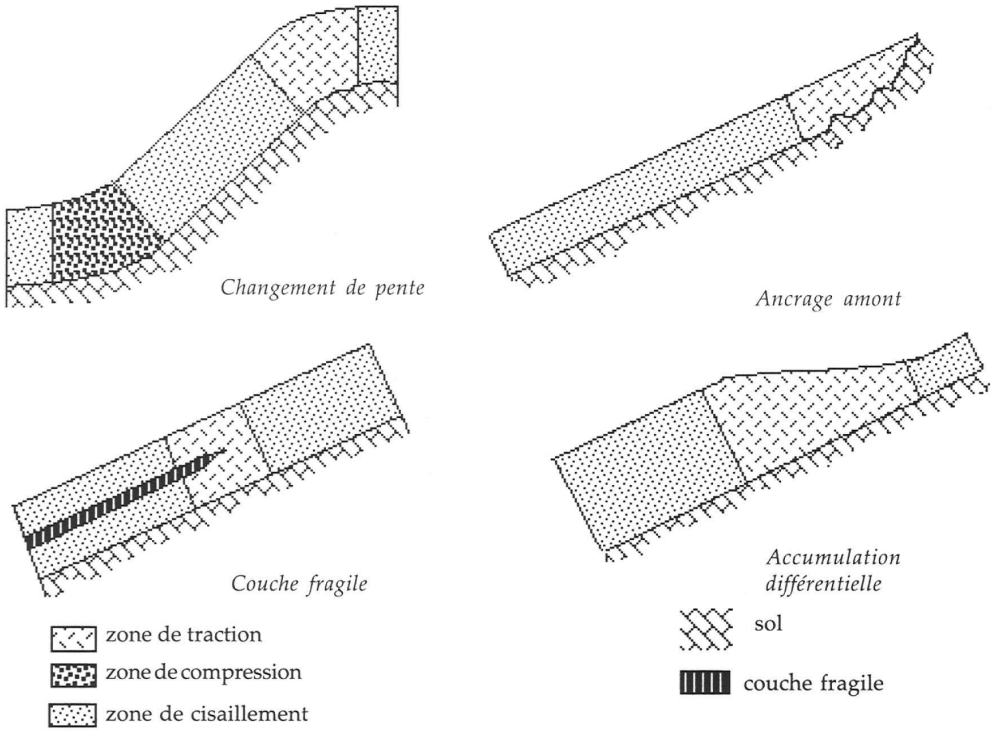

Figure 3.14 Schémas de principe de l'apparition des zones où le cisaillement devient important et conditionne l'instabilité éventuelle du manteau.

neigeux). Cette zone est généralement supposée être une zone de traction. Le terme d'ancrage est une notion « fourre-tout », qui recouvre des acceptions variées selon les personnes : adhérence du manteau ou action d'obstacles (comme des rochers proéminents) qui freinent le glissement du couvert neigeux. Dans l'ensemble, il faut retenir qu'un ancrage désigne tout ce qui sert à retenir le manteau neigeux.

– L'existence d'accumulations d'épaisseur différente sur une pente provoque des différences de fluage et de pression, donc apparition d'une zone de traction si la variation de hauteur de neige se fait selon la ligne de pente ou d'une zone de cisaillement si la variation intervient sur une même ligne de niveau.

– L'existence d'une couche fragile (neige de faible cohésion favorisant le glissement entre strates) induit également des différences de fluage, donc l'apparition d'une zone de traction à la liaison des deux zones.

3.2.2 Propriétés thermiques de la neige

La température joue un rôle important dans l'évolution de la neige et la diversité de ses caractéristiques. Les variations de température proviennent essentiellement des conditions atmosphériques. Donnons rapidement ici quelques indications sur les propriétés thermiques de la neige.

Capacité calorifique et chaleur latente

La différence de température entre l'air et l'intérieur du manteau entraîne des transferts de chaleur entre les deux milieux. Pour en rendre compte, on introduit la capacité calorifique que l'on peut définir comme la quantité de chaleur (en joule) reçue ou perdue pour une variation de température de 1°C. Pour la neige, matériau poreux, la capacité calorifique est considérée comme étant celle de la glace, c'est-à-dire : $C = 2{,}09$ J/g/°C, En outre, lorsqu'il y a un changement d'état, il faut fournir une quantité de chaleur (dite *chaleur latente*) L à l'eau (ou en dissiper) afin que le changement d'état se réalise.

Changement d'état	L (J/g)
Fusion	+334
Sublimation	+2834
Vaporisation	+2500
Condensation solide	−2834
Solidification	−334
Condensation liquide	−2500

Le changement d'état eau/glace nécessite une chaleur latente déjà importante, puisque dix fois supérieure à la capacité calorifique de la glace. Ainsi, il faut fournir $Q_1 = 21$ J pour faire passer la température d'un échantillon d'un gramme de glace de −10°C à 0°C, alors que $Q_2 = 334$ J sont nécessaires pour assurer la fusion d'un gramme de neige. La fonte de la neige nécessite donc des quantités importantes de chaleur.

Conductivité de la neige

La neige est un milieu poreux capable de conduire la chaleur : les échanges de chaleur se font par conduction dans les phases gazeuse et solide et par diffusion de la vapeur d'eau. Pour étudier comment se propage la chaleur dans un corps, le physicien introduit la *conductivité thermique* qui traduit la capacité du matériau à transmettre la chaleur. La conductivité thermique λ de la neige est faible : la neige est un excellent isolant car elle emprisonne beaucoup d'air. Cette conductivité est fonction de la densité de la neige : plus la neige a une masse volumique faible, plus elle contient d'air et plus elle est isolante. Pour de la neige fraîche, le pouvoir isolant est proche de celui du polystyrène. Pour fixer les idées, on a $0{,}05 < \lambda < 1$ W/m/°C pour la neige. En comparaison, on a λ(air)= 0,02, λ(glace) = 2,22 et λ(polystyrène)= 0,1 W/m/°C. C'est ce pouvoir isolant qui est exploité par exemple dans la construction des igloos ou qui permet de protéger la végétation des rigueurs de l'hiver.

3.2.3 Bilan énergétique du manteau neigeux

L'état thermique du manteau neigeux dépend étroitement des échanges avec l'atmosphère. Le bilan énergétique fait intervenir de nombreux termes : rayonnement solaire et infrarouge, température et humidité de l'air, vent, nébulosité, précipitations (figure 3.15). La neige interagit également avec le sol sous-jacent mais

les échanges sont faibles : dans le cas d'un manteau neigeux saisonnier, le flux thermique du sol est de l'ordre de quelques W/m^2. Il correspond essentiellement à la restitution de la chaleur emmagasinée par celui-ci durant l'été, le flux géothermique (chaleur provenant des couches internes de la Terre) étant beaucoup plus faible. Dans la plupart des cas, ce flux est suffisant pour maintenir la base du manteau neigeux à 0°C, voire d'y entretenir un fonte très faible mais continue pendant tout l'hiver. En haute montagne (ou par temps froid si le manteau neigeux est très peu épais) la base du manteau neigeux peut être à des températures négatives.

Rayonnement solaire

Une grande partie du rayonnement solaire incident est réfléchie par la neige. L'albédo (c'est-à-dire le rapport du rayonnement réfléchi sur le rayonnement incident) est fort : il varie de 0,9 pour une neige récente à 0,5 pour une neige de printemps. Par comparaison, l'albédo d'une surface herbeuse est de 0,2 à 0,3. Deux facteurs sont responsables de la diminution de l'albédo. Le premier est la présence d'impuretés (particules de carbone-suie, débris végétaux, etc.), le deuxième est la taille des grains : il diminue lorsque la taille des grains augmente. Même si dans tous les cas l'albédo de la neige est fort, il faut noter que ses variations ont des conséquences très importantes pour le bilan énergétique de la neige : si l'albédo varie de 0,9 à 0,5 la part du rayonnement solaire absorbé est multipliée par 5, passant de 10 à 50 % du rayonnement incident. La partie non réfléchie du rayonnement solaire ne pénètre pas au-delà d'une vingtaine de centimètres. Le rayonnement solaire a des variations importantes tout au long de l'année. La quantité d'énergie incidente (pour une surface horizontale) est multipliée par environ 5 entre décembre et avril. L'énergie effectivement absorbée par le manteau neigeux est multipliée par un facteur plus important à cause de la baisse de l'albédo. Ainsi, le rayonnement solaire est négligeable dans le bilan de surface en hiver, il est prépondérant au printemps.

Rayonnement infrarouge

Tout corps émet un rayonnement dont l'intensité et la gamme de longueurs d'onde dépendent de sa température. C'est le cas du soleil (température environ 5 000°C, cas traité dans le paragraphe précédent) mais aussi celui des corps de notre environnement (atmosphère, nuages, arbres, neige, températures de -40 à 40°C) ce dernier type de rayonnement étant appelé infrarouge ou thermique. De plus, l'énergie émise augmente avec la température. La neige absorbe entièrement ce rayonnement et en émet un. Le rayonnement reçu dépend des conditions atmosphériques. Par ciel clair il est très faible : la neige se refroidit jusqu'à ce que le déficit en rayonnement infrarouge soit compensé par d'autres flux (flux turbulents de chaleur par exemple). Dans le cas de brouillard ou de nuages très prés du sol, neige et nuage sont à peu près à la même température et le bilan est globalement équilibré.

Flux turbulents de chaleur sensible et latente

L'air peut réchauffer ou refroidir la surface du manteau neigeux, le sens des échanges dépend des températures et humidité des deux milieux. Cet échange ne se

fait pas par conduction (la conductivité thermique de l'air est extrêmement faible), mais par échanges turbulents. La chaleur est transmise par les nombreux tourbillons existant dans l'écoulement de l'air au-dessus de la neige. Ce transfert est d'autant plus efficace que la vitesse du vent est importante, mais la surface de la neige étant lisse, ces échanges restent assez faibles si on les compare à ceux se produisant sur d'autres surfaces (prairie par exemple). Il existe deux types d'échanges de chaleur. Le premier est le flux de chaleur sensible. Il est fonction de paramètres tels que la différence de température entre l'air et la neige, la stabilité de l'air et la rugosité de surface. Le deuxième est le flux de chaleur latente, qui dépend de la différence entre pression de vapeur d'eau à la surface de la neige et dans l'air. Il est associé à un transfert de masse : condensation solide (dépôt de givre) ou liquide, sublimation ou vaporisation selon les cas. En général, la température de surface de la neige est inférieure à celle de l'air, les échanges turbulents de chaleur sensible contribuent généralement à réchauffer la neige. Les échanges de chaleur latente sont plus variables, un air sec a tendance à faire sublimer la neige, et donc à la refroidir, alors qu'une couche de givre de surface est la preuve d'un apport passé de chaleur latente.

Précipitations

On peut considérer que les précipitations sont associées à des transferts de chaleur. Une chute de neige correspond plutôt à une perte d'énergie (apport de froid) pour le manteau neigeux, en ce sens qu'il faudra apporter plus d'énergie pour le faire fondre. La pluie, en plus d'humidifier le manteau neigeux et d'en modifier profondément les caractéristiques physiques lui apporte un peu de chaleur. Contrairement à une idée répandue, ce n'est pas l'action directe de la pluie qui fait fondre la neige : dans ce type de situation, la fonte est essentiellement dû au flux infrarouge provenant des nuages et aux flux turbulents de chaleur. 50 mm de pluie à 1°C font fondre moins de 1 cm de neige légère (100 kg/m^3).

Quelques situations typiques

Par rapport à un autre type de sol (prairie par exemple), la neige se caractérise par un albédo élevé (qui limite le rayonnement absorbé) et une surface lisse (qui limite les échanges turbulents de chaleur). De plus, ses faibles capacité calorifique et conductivité font que la température prés de la surface peut être très différente de celle de l'air (dans certaines conditions 10°C ou plus). En fonction de l'équilibre entre les différents termes, la quantité de chaleur entrant dans le manteau neigeux peut être positive (augmentation de la nébulosité, début de matinée) ou négative (refroidissement ou nuit de ciel clair).

Dans l'immense majorité des cas le bilan est équilibré et la température de surface de la neige est inférieure à celle de l'air : la perte d'énergie par rayonnement infrarouge est compensée par des apports de chaleur sous forme de flux infrarouge, solaire et turbulents. En cas de fohn, le rayonnement infrarouge incident et les flux turbulents augmentent fortement (nuages, augmentation de la température de l'air, vent), des quantités importantes de neige peuvent fondre dans ce genre de situations (quelle que soit la quantité de pluie). En période de fonte au printemps, c'est évidemment le rayonnement solaire qui joue un rôle déterminant pour la fonte

de la neige.

Figure 3.15 Les termes du bilan énergétique du manteau neigeux.

Bibliographie

[1] E. Pahaut, Les cristaux de neige et leurs métamorphoses, *Monographie de la Météorologie Nationale* **96**, 1975

[2] S.C. Colbeck, Theory of metamorphism of dry snow, *Journal of geophysical research* **88**, 1983

[3] G. Guyomarc'h, L. Merindol, Étude de transport de neige par le vent, *symposium de Chamonix*, CISA-IKAR, juin 1991, (1991, ANENA Grenoble) pp. 77–82.

[4] D. Marbouty, An experimental study of temperature-gradient metamorphism, *Journal of glaciology* **26** (1980).

[5] S.C. Colbeck, *Theory of metamorphism of dry snow*, (CRREL, report 313, 1973).

[6] E. Brun, Investigation on wet snow metamorphism in respect of liquid water content, *Annals of glaciology* **13** (1989).

[7] C. Coléou, Irreductible water saturation in snow : experimental results in a cold laboratory, *Annals of glaciology* **26** (1998).