

# Influence des croûtes de regel sur la formation de couches fragiles persistantes

Pascal Hagenmuller, CEN/CNRM, Météo-France – CNRS

## Introduction

Une croûte se forme suite au regel d'une couche de neige gorgée d'eau liquide. La présence d'eau liquide peut résulter soit de la fonte de la couche elle-même, soit d'un apport d'eau direct par la pluie ou par percolation dans le manteau neigeux. Pour les pratiquants de la montagne, la croûte est facilement identifiable car elle est nettement plus dense, dure et moins « blanche » que les autres couches de neige. Enfouie dans le manteau neigeux, cette couche caractérisée par une cohésion de regel très élevée pourrait sembler ne pas modifier, voire augmenter, la stabilité du manteau neigeux. Et pourtant, même si les couches avoisinantes sont initialement bien liées par frittage à la croûte, il arrive que cette discontinuité marquée dans la stratigraphie entraîne la formation de grains anguleux à proximité directe. Ces couches, de faces planes ou de gobelets, ainsi formées, et si elles sont recouvertes par une « plaque », peuvent significativement augmenter le risque d'avalanche, comme observé sur le terrain (Birkeland, 2012). Parfois, une croûte de regel se forme et cela n'impacte pas défavorablement la stabilité du manteau neigeux.

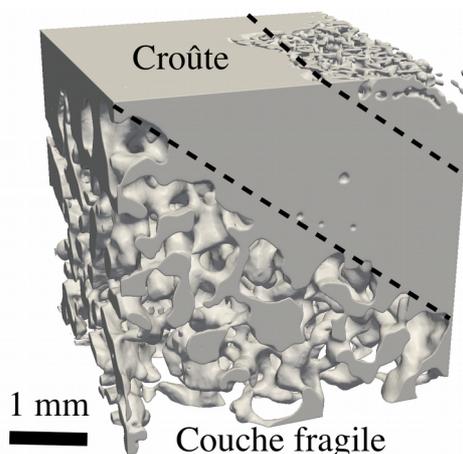


Figure 1: Image 3D d'une couche fragile sous une croûte, ayant causé le départ d'une avalanche (Le Manqué, Chamrousse, hiver1999-2000)

Pour expliquer comment une croûte peut entraîner la formation de grains anguleux, qui pourront éventuellement constituer la couche fragile d'une structure de plaque, les scientifiques proposent deux principaux mécanismes, détaillés ci-après. L'article se concentre sur des aspects de métamorphisme (thermodynamique). Pour l'influence mécanique d'une croûte sur l'initiation et la propagation d'une rupture, le lecteur pourra se référer au dossier sur la mécanique des plaques d'avril 2017.

## Ancien réservoir de chaleur proche de la surface du manteau neigeux

Une croûte, avant d'être regelée, contenait de l'eau liquide et donc aussi beaucoup de chaleur (latente). En effet, il faut beaucoup plus de « froid » pour faire geler de l'eau liquide, que pour faire baisser la température de la glace. Si cette couche humide est recouverte d'une fine couche de neige fraîche et que la température de surface est basse (par exemple, nuit claire, air froid), il se forme un fort gradient thermique dans la couche en surface, car le haut de cette couche est à une température nettement négative et sa base est à 0°C, tant que la couche humide n'est pas regelée (Fig. 2). Ce gradient thermique peut être très fort et former rapidement, parfois en une seule nuit, des faces planes. Ce gradient ne durera pas très longtemps car la neige humide finira par regeler et atteindre une température négative plus proche de celle en surface. Ici, c'est le fait que la croûte ait été humide, donc à 0°C, qui entraîne la formation de faces planes,

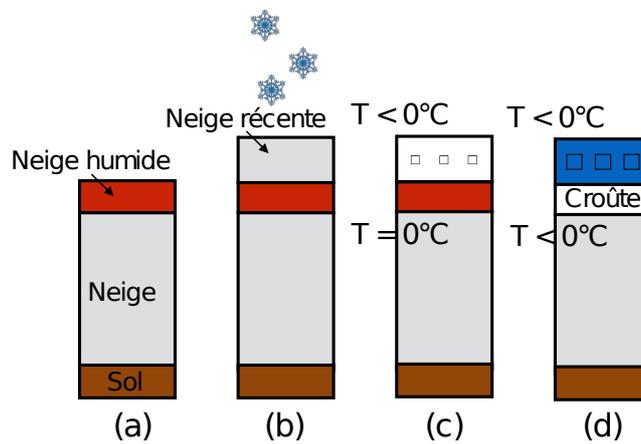


Figure 2: Exemple de formation d'une couche de grains anguleux proche d'une croûte : (a) neige humide en surface, (b) petite chute de neige, (c) fort gradient de température dans la couche de neige récente (d) regel de la neige humide et fin de formation des faces planes.

### Amplificateur de gradient thermique préexistant et barrière de flux de vapeur

Une fine croûte de glace dans le manteau neigeux constitue une forte discontinuité dans la stratigraphie : les propriétés de la neige varient brutalement quand on traverse cette couche. Notamment, la croûte conduit nettement mieux la chaleur (conductivité thermique élevée), et laisse très peu passer les flux d'air (faible perméabilité). Cette discontinuité influence le métamorphisme à proximité de la croûte.

Pour étudier ce phénomène, Greene et al. (2006) ont suivi l'évolution de deux petits blocs de neige de grains fins légèrement facettés soumis à un très fort gradient de température ( $80^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ), en chambre froide. Les deux échantillons sont composés du même type de neige mais l'un présente également une fine couche de glace (2 mm d'épaisseur de glace pure) en son milieu. Sous l'effet du gradient, les deux échantillons se transforment progressivement en faces planes. Ils n'observent des différences notables qu'à proximité immédiate de la croûte de glace, sur une épaisseur de quelques grains. Des chaînes verticales de gobelets croissent progressivement à partir de la base de la croûte (Fig. 3). Le dessus de la croûte s'aplanit et de grands pores apparaissent juste au-dessus et il ne reste que très peu de ponts entre la croûte et la neige située au-dessus (Fig. 3). Greene et al. (2006) expliquent ces observations par la forte imperméabilité de la croûte. Le gradient thermique entraîne un important flux de vapeur vers le haut et donc un transfert de masse dans cette direction. La croûte de glace imperméable agirait comme une barrière sur ce flux : de la glace s'accumule (plus de condensation que de sublimation) en dessous, ce qui forme les chaînes de gobelets ; de la glace disparaît (plus de sublimation que de condensation) au-dessus, ce qui forme les grands pores.

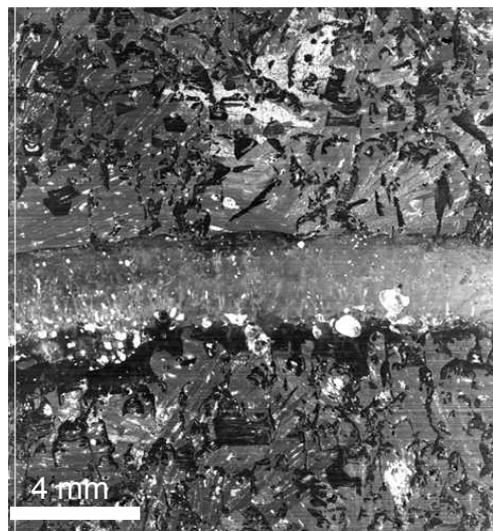


Figure 3 : Coupe verticale de l'expérience de Greene et al (2006). La neige est en noir, les pores en gris. La croûte de glace apparaît également en gris au milieu de l'image. La température à la base de l'échantillon est plus élevée qu'en son sommet.

Plus récemment, Hammonds et al. (2015) ont reproduit cette expérience, mais avec un équipement plus complet et notamment de très petits thermomètres. Ils observent également une dissymétrie de la structure de la neige entre le bas et le haut de la proximité immédiate de la croûte. Ici, le nombre de ponts augmente nettement sous la croûte. Mais, contrairement à l'expérience de Greene et al. (2006), ce nombre augmente aussi légèrement au-dessus. Ce qui est remarquable dans cette expérience, c'est le gradient de température mesuré à proximité de la croûte (Fig. 4). Celui-ci est de l'ordre de quarante fois plus élevé que le gradient imposé aux extrémités de l'échantillon (Fig. 4). Ainsi, même si le gradient moyen à l'échelle du manteau neigeux est faible (inférieur à  $5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ), il peut être localement très fort à proximité de la croûte et former des grains anguleux par métamorphisme de gradient. Hammonds et Baker (2015) suggèrent que ce phénomène est lié à une très grande résistivité thermique du contact croûte-neige constitué de très peu de ponts. Néanmoins, aucune autre observation dans cette étude ne corrobore cette hypothèse et la mesure du gradient thermique sur une épaisseur de quelques millimètres peut être altérée par des erreurs de mesure importantes.

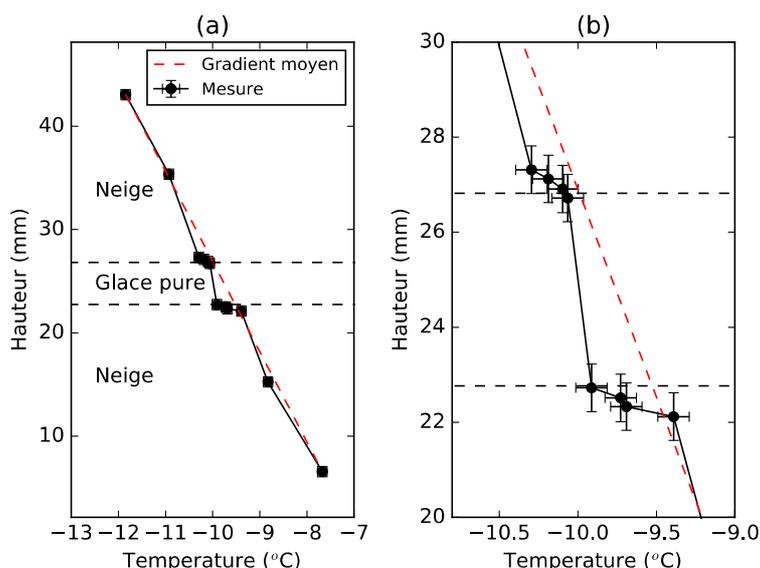


Figure 4 : Mesure du profil vertical de température dans un échantillon de neige présentant une fine croûte de glace. La température est imposée au sommet et à la base de l'échantillon. Données tirées de Hammonds et al. (2015)

## Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté deux processus pouvant expliquer pourquoi on trouve souvent des grains anguleux à proximité de croûtes de regel. Le premier processus, qui fait consensus dans la communauté neige et avalanche, est lié au fait que la croûte était auparavant humide et constituait alors un réservoir de chaleur pouvant créer un fort gradient thermique avec les couches subjacentes. Ce processus est d'autant plus actif que la chaleur contenue dans la couche est grande (couche épaisse, teneur en eau liquide élevée) et que les conditions météorologiques suivant cette humidification sont propices (faible chute de neige et refroidissement). Le second processus discuté ici a fait l'objet de recherches plus exploratoires. Les expériences qui suivent l'évolution à proximité d'une couche de glace pure (« caricature » des croûtes de glace) montrent un impact important et très localisé à quelques dixièmes de millimètres autour de la couche, sur le métamorphisme. La couche de glace agirait comme une barrière au flux de vapeur et comme un amplificateur local de gradient, catalysant ainsi le métamorphisme de gradient.

## Références

- Greene, E. M., M. Schneebeli, and K. Elder, 2006: The microstructural effects of kinetic growth metamorphism in a layered snow structure. *International Snow Science Workshop*, Telluride, Colorado, USA, 22–26.
- Birkeland, K., 2012: Crust Thoughts. *The Avalanche Review*, American Avalanche Association.
- Hammonds, K., R. Lieb-Lappen, I. Baker, and X. Wang, 2016: Investigating the thermophysical properties of the ice-snow interface under a controlled temperature gradient Part I: Experiments and Observations. *Cold Regions Science and Technology*, **120**, 157–167, doi:10.1016/j.coldregions.2016.01.006.

Hammonds, K., and I. Baker, 2016: Investigating the thermophysical properties of the ice-snow interface under a controlled temperature gradient Part II: Analysis. *Cold Regions Science and Technology*, **125**, 12–20, doi:10.1016/j.coldregions.2016.01.006.