L'Act. Chim. (R) 1996,5, 5-10

Réalisation et observation de tranches minces de neige humide par trempe

Jean-Bruno Brzoska* *chercheur (lauréat 1995 du prix de la division Chimie physique de la SFC),* **Cécile Coléou*** *ingénieur,* **Bernard Lesaffre*** *technicien*

Visualization of thin sections of wet snow by tempering

The observation of multiphase porous media is generally difficult. It is typically the case for wet snow, which simultaneously contains the three phases of water close together .

When tempering the system, its liquid parts are quickly frozen, producing numerous tiny gas bubbles. In a section of the frozen material, the bubbles are located where liquid water was present before the tempering. This allows to distinguish a posteriori liquid water from ice in a thin section of the sample.

Glace, trempe, coupes minces, croissance cristalline.

Ice, tempering, thin sections, crystal growth.

Dans le cadre de la prévision du risque d'avalanches, le Centre d'Études de la Neige de Météo-France a développé un outil opérationnel de modélisation de la stabilité du manteau neigeux. De nombreux thèmes de recherche du Centre ont pour vocation d'affiner cette chaîne de modélisation.

Le modèle « Crocus » [1] qui simule l'évolution du manteau neigeux travaille à grande échelle (celle de l'épaisseur de la couche de neige). Il utilise une approche unidimensionnelle bien adaptée à la structure nettement stratifiée des manteaux neigeux. Il est capable de calculer les changements de morphologie des grains de neige (sphéricité, angulosité, taille), y compris en présence d'eau liquide. L'échelle des grains n'étant pas compatible avec l'échelle de travail du modèle, ce dernier utilise pour ce faire des lois expérimentales de grossissement des grains, déterminées sur des échantillons de neige homogènes.

De par la structure unidimensionnelle de ce modèle, tous les flux d'eau liquide d'une strate à une autre sont évalués en considérant une répartition homogène de l'eau dans chaque strate ; lorsqu'une strate (simulée) a atteint sa valeur maximale de rétention d'eau (issue de données expérimentales), le modèle considère que tout apport d'eau ultérieur s'écoule par gravité dans la strate voisine.

Certains phénomènes, pourtant fréquents sur le terrain, ne peuvent être pris en compte par une approche de ce type [1].

Ainsi, au lieu d'être homogène, la percolation de l'eau à travers une couche de neige se concentre souvent dans des chemins d'écoulement préférentiels [2]. Le lien entre teneur en eau liquide d'une couche et écoulement d'un surplus d'eau à travers cette dernière est alors perdu. Quant à la formation et à la localisation de ces chemins préférentiels, elles ne sont pas comprises à ce jour. On sait seulement d'expérience que l'ordre de grandeur de leur espacement est de quelques dizaines de centimètres ; le manteau neigeux prend alors un aspect « matelassé » caractéristique.

Par ailleurs, des couches saturées d'eau (donc bien au-delà de la valeur de rétention d'eau par capillarité), de faible épaisseur, se forment parfois entre deux couches de nature différentes. Lorsqu'elles viennent à geler, ces dernières forment alors un obstacle imprévu (par le modèle) pouvant perturber notablement la percolation de l'eau. Il s'agit par ailleurs de « points durs » potentiels susceptibles de modifier la stabilité du manteau neigeux.

En tout état de cause, la compréhension de ces phénomènes complexes n'est envisageable qu'après une étude fine du réarrangement des grains de neige humide sous l'effet de la capillarité. Dans le but de fournir une paramétrisation de ces phénomènes au modèle Crocus, un modèle de percolation avec changements d'états de l'eau dans la neige est actuellement à l'étude. Il aura évidemment besoin de fichiers expérimentaux de structure de neige humide (c'est-à-

* Météo-France, CNRM,
Centre d'Études de la Neige,
1441, rue de la Piscine,
Domaine universitaire,
38400 Saint-Martin d'Hères.
Tél. : 76.63.79.00. Fax : 76.51.53.46.
E.mail : jean-bruno.brzoska@meteo.fr

dire de vues en coupes) pour pouvoir être développé et validé.

L'obtention de telles vues en coupes est l'objet du présent travail réalisé au Centre d'Études de la Neige par les auteurs.

Position du problème

Il s'agit donc de visualiser en coupe un matériau hétérogène contenant une phase liquide. Ce problème est courant en biologie, et des solutions existent :

La plus courante consiste, après éventuelle coloration de l'échantillon (utilisation de teintures qui se fixent spécifiquement sur certains tissus), à déshydrater ce dernier puis à l'imprégner à la paraffine : il est alors prêt pour la coupe au microtome.

Lorsque la déshydratation de l'échantillon n'est pas applicable sans dégradation, on a généralement recours à la cryomicrotomie : l'échantillon est congelé et la coupe s'effectue au froid. Dans le cas de la neige, cette dernière approche est évidemment incontournable.

Cependant, le fait de travailler au froid ne suffit pas à régler le problème de la neige. Observer la neige humide signifie être capable de « saisir » le partage entre les phases liquide et solide de l'eau qui la constitue. Il s'agit en fait d'un problème débordant largement du seul cadre « neige et glace » : prendre un « instantané » d'un système en cours de solidification. Des domaines tels que métallurgie ou plasturgie des matériaux composites sont aussi concernés.

La méthode d'observation

Plusieurs solutions, séduisantes par leur apparente simplicité, s'avèrent inapplicables. Par exemple, simuler la neige humide en employant un autre liquide que de l'eau est à proscrire. La spécificité de la structure de la neige humide tient au fait que sa matrice solide (glace) a été façonnée par la présence du liquide ; par exemple, il a été clairement montré [3] que la perméabilité à l'eau, à granulométrie et porosité égales, différait totalement de la neige à grains ronds aux billes de verre.

Pour diverses raisons, l'emploi de colorants est difficilement envisageable. En effet, un front de solidification qui avance chasse devant lui les impuretés du liquide (dont les colorants) : La trace de la position initiale du front (avant congélation de l'échantillon) ne peut être conservée de cette manière.

Par ailleurs, les impuretés chassées par le front se concentrent à son voisinage immédiat, dans la phase liquide dont le point de fusion s'abaisse par rapport à celui du liquide pur. Le simple fait de préparer de la neige humide avec de l'eau colorée change le comportement des interfaces eau-glace. Un colorant n'est en effet visible que dans la masse ; son emploi oriente donc de fait vers une observation de coupes minces. Or, pour que ce colorant reste visible dans une tranche de 10 µm d'épaisseur, il faut qu'il soit concentré et donc clairement susceptible de perturber les interfaces liquide/solide.

D'autres voies, moins évidentes, peuvent être essayées, entre autres l'IRM. Cette technique est séduisante à plusieurs égards.

- Pas de coupe,
- On peut scruter l'échantillon dans tous les sens,
- La glace et l'eau liquide donnent des signaux très différents [4],
- Aucun additif dans l'échantillon.

Les principales limitations viennent de la résolution des appareils existants (0,1 mm semble actuellement un maximum) et de leur coût. La nécessité de préparer les échantillons et de les observer là où se trouve un microscope IRM (a priori ce lieu n'est pas une chambre froide) pose des problèmes délicats de « chaîne du froid » que nous n'avons pas encore résolus. Cependant, nous envisageons sérieusement d'avancer dans ce sens.

Dans l'immédiat, c'est une approche bien plus simple qui a été choisie : le regel rapide (ou « trempe ») de l'échantillon. La vie courante montre que de l'eau regelée lentement (par exemple dehors par rayonnement nocturne) forme une glace transparente, tandis que l'eau gelée plus rapidement (par exemple dans un congélateur) fournit une glace opacifiée par de nombreuses inclusions d'air.

En fait, plus le regel est rapide, plus les bulles formées sont petites et nombreuses [5]. En ajustant la vitesse de regel, on peut faire apparaître des bulles de gaz de la taille voulue dans la phase initialement liquide ; c'est la mise en œuvre de ce principe qui est détaillée dans ce qui suit.

La préparation de l'échantillon : difficultés

Les particularités expérimentales découlent principalement de la nécessité de travailler au froid, depuis la préparation des échantillons [6] jusqu'à leur observation.

Si l'usage de basses températures est courant en expérimentation (microscopie électronique par exemple), le froid, généralement associé au vide, est le plus souvent employé pour figer le système que l'on observe. La neige humide contenant les trois phases de l'eau en coexistence, il est exclu de travailler sous vide ; il faut alors gérer tous les problèmes d'hygrométrie et de givrage.

Pour limiter ces inconvénients, la quasi-totalité des organismes étudiant la glace réalisent leurs expérimentations dans un laboratoire froid ; c'est notre cas.

Les échantillons de neige humide sont préparés dans un caisson isotherme à 0 °C (doubles parois remplies en permanence d'un mélange d'eau et de glace). De la neige naturelle (prélevée en montagne puis stockée à - 20 °C) y est tamisée. L'eau, à 0 °C, est amenée par le fond du caisson (par siphonnage), puis enlevée de la même manière à la fin du trempage. De cette manière, à chaque plan horizontal de l'échantillon correspond un même temps de contact avec l'eau.

Les échantillons de mesure proprement dits sont prélevés par carottage au centre de cet échantillon de neige humide. Ils bénéficient ainsi d'une isolation complémentaire, thermique et hygrométrique, constituée par les bords eux-mêmes de l'échantillon de départ.

Chaque mesure consiste au minimum en deux carottages, contigus, réalisés et traités au même instant, l'un par calorimétrie [7] froide (détermination de la quantité de chaleur nécessaire au regel de toute l'eau), l'autre par regel rapide.

Le premier prélèvement fournit directement la teneur en eau liquide (que nous appellerons TEL par la suite) globale de la neige prélevée, tandis que le second va permettre une localisation de cette eau liquide à échelle fine.

La procédure de congélation : un choix délicat

Les problèmes de regel rapide sont bien connus des biologistes [8] qui cherchent à préparer des échantillons à la microscopie électronique (cryofixation). La difficulté majeure provient du fait que la conductivité thermique du matériau limite le flux de chaleur que l'on peut extraire de ce dernier. De forts gradients de température ne peuvent être produits qu'au voisinage du fluide réfrigérant, et la profondeur de trempe s'en trouve limitée.

Le regel de nos échantillons est effectué en y versant un liquide froid. La forte porosité de la neige (50 % ou plus) et sa perméabilité sont ici un avantage certain : chaque point de l'échantillon se trouve au plus à une fraction de millimètre d'un pore par lequel un fluide réfrigérant peut passer. Cependant, le réchauffement progressif du réfrigérant lors de son parcours dans la neige à 0 °C limite la profondeur effective de regel et doit être pris en compte.

Le choix du liquide réfrigérant a son importance. Ce liquide doit naturellement être non miscible à l'eau, avoir un point de fusion très inférieur à 0 °C et un point d'ébullition positif.

En particulier, la présence de fractions volatiles ou gaz dissous, tels que le CO_2, doit être évitée : leur présence produit, en effet, une effervescence au contact de la neige à 0 °C et a occasionné plusieurs bris d'échantillon.

Il est aussi souhaitable que ce liquide ait une faible viscosité pour s'écouler rapidement à travers l'échantillon à refroidir. Hormis certaines huiles silicones, c'est généralement le cas des liquides à bas point de fusion.

Enfin, il importe que ce liquide soit mouillant pour l'eau comme pour la glace, afin de s'étaler librement sur les éventuels ménisques d'eau sans perturber leur profil.

Nous avons utilisé du *n*-pentane à - 70 °C (une température facile à obtenir avec de la neige carbonique), qui répond à ces spécifications. Le choix de la température est un compromis expérimental permettant de former des bulles de taille suffisante (quelques µm) pour être observables en microscopie optique, mais cependant assez petites et nombreuses pour « marquer » le plus possible de zones liquides, même étroites. Ce point sera discuté plus loin.

Un dernier point reste à vérifier : le regel de l'échantillon sera suivi d'une imprégnation destinée à le consolider avant la coupe. Afin d'éviter une mauvaise consolidation de l'échantillon, le produit d'imprégnation ne doit pas pouvoir se mélanger à des traces de liquide réfrigérant ; ce dernier doit donc pouvoir être totalement éliminé avant imprégnation. Le *n*-pentane s'élimine sans problème sous vide primaire ; sa tension de vapeur saturante étant très supérieure à celle de l'eau, une évaporation significative de glace durant cette phase n'est pas à craindre.

Une méthode de coupe mince adaptée à la neige

Cette technique a été mise au point par nos collègues suisses de Davos [9]. Il s'agit d'une adaptation aux basses températures des techniques classiques de coupe de matériaux poreux (béton, terre, mousses de polymères...) ou de consistance hétérogène (échantillons biologiques) par imprégnation de résines. Du diéthyl-phtalate à - 4 °C (PF - 5 °C, très peu miscible à l'eau, mouillant pour la glace) est introduit par siphonnage dans l'échantillon gelé, puis l'ensemble est laissé à - 20 °C jusqu'à solidification complète. Le bloc solide et compact est alors prêt à couper au microtome. Les opérations de coupe proprement dite et d'observation ont lieu vers - 15 °C.

A la différence des échantillons courants (biologiques), l'hétérogénéité mécanique du composite glace/phtalate solide ne permet pas de coupe directe en feuilles depuis le microtome ; la coupe s'effectue par rabotages successifs d'une face, puis de l'autre après collage sur une plaque de verre. Le joint est constitué par le phtalate d'imprégnation lui-même, collage et décollage étant obtenus respectivement par passages de - 4 °C à - 15 °C et inversement.

Lorsque la coupe a atteint l'épaisseur désirée (ici, typiquement 20 µm), le phtalate cristallisé est fondu par addition d'une goutte de tétrahydronaphtalène (PF - 35 °C) teinté, et la coupe, désormais très fragile car privée de toute cohésion, est immédiatement recouverte.

Comment obtenir des résultats exploitables

Ponctuellement, et seulement pour des grossissements assez importants, quelques observations de coupes massives (surfaces coupées d'échantillons consolidés) en lumière réfléchie ont pu être pratiquées. Cette approche est séduisante : la procédure de coupe proprement dite se résume à un passage de microtome, et la possibilité de coupes en série [9] offre d'intéressantes perspectives de reconstruction numérique des échantillons [10].

Elle présente cependant des difficultés expérimentales variées (problèmes optiques aux faibles grossissements, sublimation de la glace déformant la surface de coupe et lui ôtant son aspect de « miroir plan »...) encore mal maîtrisées. Cela explique notre choix actuel des coupes minces comme moyen d'étude systématique.

C'est pourtant sur ces vues en lumière réfléchie (non polarisée) que la structure en bulles des zones regelées est la plus nette, comme l'illustre la *figure 1*. Au sein d'une même phase (ici la glace), seuls des reliefs sur la surface de coupe (quelle que soit leur origine) peuvent produire des changements de teinte ; en particulier, en lumière réfléchie non polarisée, d'éventuels changements d'orientation cristalline ne

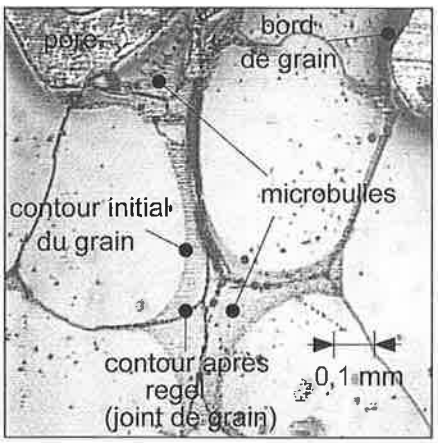


Figure 1 - **Vue en lumière réfléchie (réflexion directe) d'une coupe massive de neige humide regelée par trempe.**
L'espace poreux est comblé par du diéthyl-phtalate. Le dégradé de gris des bords de grains est dû à la sublimation de la glace près des bords.

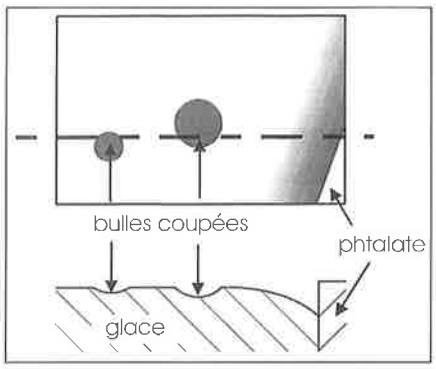


Figure 2 - **Perception des reliefs en lumière réfléchie directe.**
Le schéma du haut représente les reliefs tels qu'on les voit ; le schéma du bas est une vue en coupe du relief réel le long de l'axe AA, faisant apparaître au passage la cause des dégradés de couleur observés en bord de grains.

peuvent avoir d'effet. Le voile grisé nettement visible, aux bords nets, traduit ici une zone nettement plus rugueuse (voir *figure 2*) que le reste de la surface de glace coupée. La netteté des bords de cette zone qui rejoint des grains différents indique, par ailleurs, qu'il ne s'agit pas de bulles initialement présentes dans les grains de neige (qui seraient alors disposées aléatoirement).

L'observation des coupes minces entre polariseurs croisés apporte des arguments supplémentaires. La *figure 3* montre deux vues d'un même échantillon sous deux polarisations différentes. Chaque grain présente une teinte de gris correspondant à son orientation cristalline. Cette teinte varie naturellement d'une vue à l'autre, alors que la zone de bulles conserve son aspect : son motif plus sombre se superpose simplement à la teinte de fond que prennent les grains sous chaque polarisation.

On peut en déduire que :

– Le regel rapide ne forme pas de microcristaux observables en microscopie optique.

– Chaque grain regelé possède une orientation cristalline uniforme, la structure visible n'étant constituée que de vides, c'est-à-dire de bulles.

La *figure 4,* une simple vue en transparence d'une coupe mince (lumière transmise non polarisée) montre simultanément les contours des zones de bulles et ceux des grains. Aux points où ils se raccordent, ces contours sont tangents ; cette disposition est compatible avec la forme adoptée par un ménisque de liquide mouillant entre deux grains. L'eau présente sur la glace un angle de contact pratiquement nul [11], et l'on peut considérer ici qu'elle se comporte comme un liquide mouillant.

Enfin, il est à noter que lorsque la même procédure expérimentale (y compris l'étape de trempe au pentane froid) a été appliquée à un échantillon de neige humide que l'on a laissé regeler « naturellement » (à - 5 °C) après prélèvement, ces microbulles ne sont jamais observées.

Discussion

Un des effets recherchés par la trempe en métallurgie est de modifier la granulométrie des cristaux de l'alliage [12] ; les inclusions gazeuses (qui se produisent aussi avec du métal) sont toujours perçues comme « effets secondaires », c'est-à-dire mal perçues, (surtout par l'utilisateur : pailles dans l'acier, bris de pièces...).

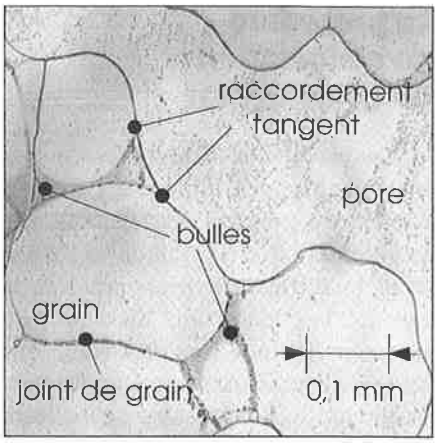


Figure 4 - **Coupe d'épaisseur ~10 µm observée en lumière ordinaire.**
Les bulles, ici très petites, apparaissent sous forme d'un voile gris uniforme présentant la forme caractéristique d'un ménisque capillaire (raccordement tangent des contours).

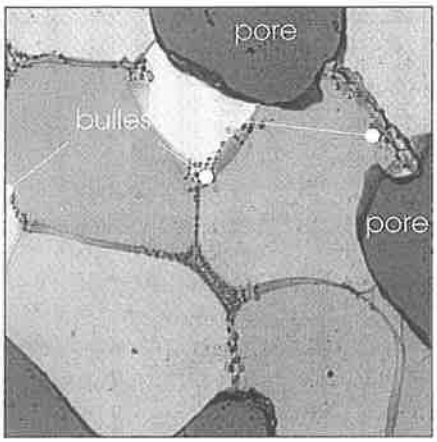
Cependant, au lieu de la mosaïque de microcristaux qu'une analogie métallurgique pouvait nous faire attendre, nous venons de voir que, pour la neige humide, une trempe produisait une nucléation de bulles.

Il semble donc qu'en ce qui nous concerne, la situation soit bien différente. Nos expériences mettent en jeu les échelles caractéristiques suivantes :

– profondeur (locale) à regeler : 0,1 mm,
– diamètre moyen des grains : 0,5 mm,
– porosité : 60 %,
– diamètre moyen des pores : 0,5 mm,
– température du fluide réfrigérant : - 70 °C.

Dans ces conditions, nous n'avons pratiquement jamais constaté de nucléation de glace : la croissance a eu lieu dans la majorité des cas à partir des grains existants (et en conservant leur orientation cristalline). Le fait que l'eau soit partout à proximité immédiate de gros monocristaux y est vraisemblablement pour quelque chose. Comparés à des noyaux de congélation, les grains sont clairement assimilables à des « plans infinis » de glace, sur lesquels la croissance cristalline est la plus favorisée d'un point de vue énergétique.

Dans cette configuration, le phéno-



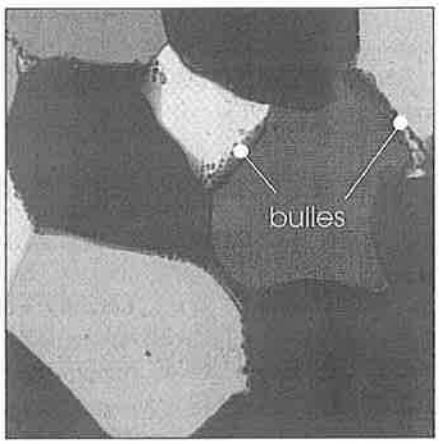


Figure 3 - **Vues en lumière transmise polarisée.**
A gauche : Coupe de neige humide d'épaisseur ~ 30 µm, milieu de remplissage teinté. Chaque grain présente une teinte de gris uniforme correspondant à son orientation cristalline. Le motif de regel rapide (bulles) se superpose en couleur sombre. A droite : La même coupe vue sous une polarisation différente. Les grains changent de teinte, mais le motif créé par le regel n'a changé ni de teinte (toujours sombre), ni d'aspect. Il continue à se superposer aux teintes existantes.

mène dominant est clairement la nucléation de bulles gazeuses. Cet effet a été récemment bien documenté par une équipe du Groupe de physique des solides de Jussieu (GPS) [13].

Comme pour la nucléation de cristaux, un sous-refroidissement est nécessaire. Un autre préalable est qu'une phase solide soit déjà présente ; elle va donc croître, chassant et concentrant devant elle les impuretés présentes dans le liquide. Le profil de concentration [14] est donné par le rapport entre vitesse du front de regel et vitesse de diffusion des impuretés (*figure 5*).

C'est la surconcentration à l'avant du front, déjà signalée comme une cause de perturbations lors de l'emploi de colorants, qui va ici servir de moteur à la formation des bulles. Si cette surconcentration en impuretés gazeuses dépasse la valeur de saturation du liquide en gaz, la nucléation des bulles devient possible.

Pour une nucléation de cristaux, les effets thermique (sous-refroidissement) et chimique (surconcentration devant le front de regel) sont antagonistes : un cristal déjà formé, en cours de croissance, enrichit le liquide qui l'entoure en impuretés. Le point de fusion du liquide s'abaisse, ainsi que le sous-refroidissement réel ; la présence d'impuretés solubles (très difficile à connaître et à contrôler) est donc un frein à la nucléation de nouveaux cristaux.

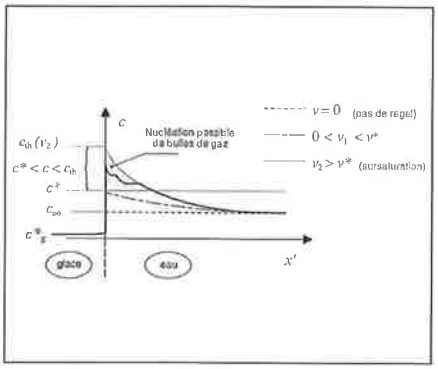


Figure 5 - **Profil type de concentration en gaz près du front de solidification, dans le repère mobile Ox' de ce front.**
Dans le solide (à gauche), les trois courbes sont confondues et correspondent à la saturation en gaz. Dans l'eau, les profils ont une allure exponentielle tant que les concentrations ne dépassent pas la saturation c* du liquide. Au delà, des bulles de gaz peuvent apparaître et le profil réel se situe quelque part dans la zone grisée : $c^* < c(x',t) \leq c_{th}(x')$. Noter l'existence d'une vitesse critique $v^*(c_\infty, \nabla T)$du front de congélation, telle que $c_{th} = c^*$, en deçà de laquelle il n'y aura pas formation de bulles. Un gradient thermique minimum est donc bien nécessaire.

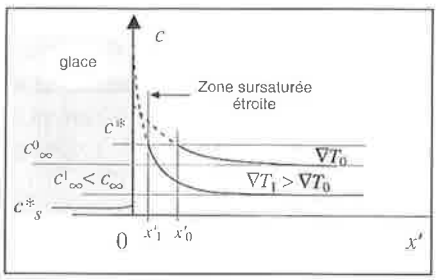


Figure 6 - **Influences croisées du gradient thermique (intensité du regel) et de la concentration en gaz de la fraction liquide.**
Pour une neige plus pure, la sursaturation sera atteinte pour un plus fort gradient et dans une région plus étroite.

Inversement, lors d'une nucléation de bulles gazeuses, ces effets thermique et chimique se complètent, le premier déclenchant le second en faisant croître le solide.

Par ailleurs, le fait de ne pas avoir accès à la concentration en gaz dissous n'est pas rédhibitoire : pour une concentration plus faible, la sursaturation en gaz sera atteinte (dans une région plus étroite [14] il est vrai) à une valeur plus élevée de sous-refroidissement (*figure 6*).

La relation entre sous-refroidissement et taille des bulles, mise en évidence depuis longtemps [5] semble ne pas être évidente : ainsi, la taille de la zone sursaturée ne constitue pas forcément une limite supérieure à la taille des bulles. Akamatsu et al. [13] ont montré que le solide croissait préférentiellement autour d'un bulle déjà formée, le résultat final pouvant être parfois la formation de très longues bulles tubulaires orientées dans le sens du gradient de température ; cette géométrie a déjà été observée dans la glace [15].

Un point reste encore à aborder : si nous pouvons d'ores et déjà affirmer que là où des microbulles sont présentes après la trempe, de l'eau liquide était présente avant la trempe, l'inverse n'est pas encore établi de manière quantitative. Il s'agit de mesurer la fraction d'une coupe renferment des microbulles. Ayant vérifié l'isotropie de nos échantillons, nous pouvons comparer directement cette fraction à la TEL déterminée par calorimétrie. Les problèmes de digitalisation des images compliquent l'analyse des résultats. Il semble pourtant, à première vue, qu'une partie de l'eau liquide échappe au marquage, en particulier dans les zones très étroites.

Cependant, si le mécanisme de croissance des bulles proposé par le GPS Jussieu [8] s'avère applicable à notre système, il pourrait aussi fournir une explication à un marquage incomplet de l'eau liquide par les bulles.

Une condition nécessaire à leur formation est l'existence à l'avant du front de regel d'une zone sursaturée en gaz. Au début du regel, l'établissement de cette région sursaturée est précédée d'une étape transitoire durant laquelle la concentration en gaz croît à l'avant du front sans atteindre encore la valeur de saturation. Le volume d'eau liquide « balayé » par le front de glace durant cette étape ne pourra pas être signalé par des inclusions de gaz. Ce phénomène sera d'autant plus marqué que l'eau sera pure, une façon simple de le minimiser étant d'augmenter la vitesse de regel (en utilisant un réfrigérant plus froid).

Le contrôle de la quantité de gaz dissous dans l'eau est difficilement envisageable ; une qualification de ce type de mesures passerait alors par la mise au point d'une méthodologie permettant, pour des concentrations courantes en gaz, de confiner ce qui serait alors une erreur systématique dans des limites connues et acceptables.

Quoi qu'il en soit, nous disposons déjà d'une technique de localisation à échelle fine de l'eau liquide dans la neige.

Conclusion

Il est donc possible de prendre par trempe un « instantané » de l'état d'un système en cours de solidification. A l'issue de la trempe, la phase initialement liquide a subi un regel beaucoup plus rapide que le solide préexistant ; des bulles de gaz s'y sont formées, et marquent « dans la masse » la phase initialement liquide dans l'échantillon regelé. Les emplacements occupés par du liquide sont visibles sur une coupe mince de l'échantillon.

Cette méthode s'apparente aux techniques dites de « décoration » utilisées couramment en mécanique des fluides (dispersion de paillettes dans l'écoulement dont l'orientation donne le sens des lignes de courant) [16], ou pour l'étude des cristaux liquides (inclusion de bulles qui s'alignent selon l'orientation locale du cristal liquide) [17].

L'application à un système poreux (liquide compris) comme la neige humide semble généralisable à des systèmes non poreux, à certaines restrictions près.

En effet, la principale différence est que dans ce cas la chaleur ne pourra être extraite que par la surface (coupée) de l'échantillon. Pour une température du réfrigérant donnée (et forcément limitée vers le bas), un regel suffisamment rapide pour produire des bulles ne pourra avoir lieu que jusqu'à une profondeur limitée (pas plus de quelques millimètres pour le système eau/glace).

Ce peut être pourtant suffisant pour étudier la dynamique de solidification de nombreux systèmes, la différence de solubilité des gaz entre une phase liquide et une phase solide étant une généralité.

Remerciements

Nous tenons à remercier S. Akamatsu et C. Caroli pour leur aide précieuse dans l'interprétation de nos résultats, ainsi que G. Krüsi pour nous avoir fait part de sa grande expérience des coupes minces de glace et de neige.

Références

[1] Brun E., David P., Sudul M. and Brunot G., A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting, *J. Glaciol*, **1992**, *38* (128), p. 13-22.

[2] Marsh P., Water flux resources in melting snowcovers in *Advances in porous media* (Ed. by M. Y. Corapcioglu), **1991**, *1*, p. 124-128.

[3] Colbeck S. C., Grain clusters in wet snow, *J. Colloid. Interface Sci.*, **1979**, *72* (3), p. 371-383.

[4] Guillot G., Trokiner A., Darrasse L., Dupas A., Ferdossi F., Kassab G., Hulin J.P., Rigort P., Saint Jalmes H., NMR imaging applied to various studies of porous media, *Mag. Res. Imaging*, **1991**, *9*, p.821-825.

[5] Carte A. E., Air bubbles in ice, *Pro. phys. Soc.*, **1961**, *77*, p. 757-768.

[6] Brun E., Investigation on wet snow metamorphism in respect of liquid water content, *Annals of Glaciology*, **1989**, *13*, p. 22-26.

[7] Coléou C., Lesaffre B., Valeur en eau de rétention pour différents types de neige, Symp. de la Société Hydrotechnique de France (Grenoble, mars 1994), **1994**.

[8] Bald W. B., in *Quantitative Cryofixation*, Adam Hilger, **1987**, p 3-10, 78-81.

[9] Good W., Thin sections, serial cuts and 3D analysis of snow, Publ n° 192 IAHS, Proc. Symp., Avalanche formation, movement and effects, Davos (Switzerland), **1987**, p 35-48.

[10] Adler P. M., Jacquin C. G., Quiblier J., Flow in simulated porous media, Int. *J. Multiphase Flow*, **1990**, *16*, p. 691-712.

[11] Elbaum M., Lipson S. G., Dash J. G., Optical study of surface melting on ice, *J. Crystal Growth*, **1993**, *129*, p. 491-505.

[12] Chalmers B., in *Métallurgie physique*, Dunod, **1963**, p. 253, 406.

[13] Akamatsu S., Faivre G., Residual impurity effects in directional solidification ; long-lasting recoil of the front and nucleation-growth of gas bubbles, *J. Phys. France*, sous presse.

[14] Hobbs P. V., in *Ice Physics*, Oxford University Press, **1974**, p. 600-603.

[15] Geguzin J. E., Deiuba A. S., Videlene gaza, formirovanie i zahvat gazovyh puzirkov na fronte kristalizacii iz razplava [Gas emission, formation and catching of gas bubbles from the liquid phase into a front of crystallisation], *Kristalografia*, **1977**, *22* (2), p. 348-353.

[16] Tritton D. J., in *Physical fluid dynamics*, 2nd Ed., Oxford University Press, **1988**, p. 425-427.

[17] De Gennes P.-G., Prost J., in *The Physics of liquid crystals*, 2nd Ed., Oxford University Press, **1993**, p. 167.

SFC 97

Congrès de la Société Française de Chimie

7 - 12 septembre 1997

Bordeaux