



HAL
open science

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONVECTION THERMIQUE DANS LA NEIGE

E. Brun, F. Touvier

► **To cite this version:**

E. Brun, F. Touvier. ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONVECTION THERMIQUE DANS LA NEIGE. Journal de Physique Colloques, 1987, 48 (C1), pp.C1-257-C1-262. 10.1051/jphyscol:1987136 . jpa-00226282

HAL Id: jpa-00226282

<https://hal.science/jpa-00226282>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ETUDE EXPERIMENTALE DE LA CONVECTION THERMIQUE DANS LA NEIGE

E. BRUN et F. TOUVIER

Centre d'Etudes de la Neige, Domaine Universitaire, B.P. 44,
F-38402 St-Martin-d'Hères Cedex, France

RESUME

Un rapide exposé théorique montre que notre connaissance approximative sur la perméabilité de la neige ne permet pas de déterminer les conditions théoriques de déclenchement de la convection thermique dans le manteau neigeux. C'est pourquoi il est nécessaire de déterminer expérimentalement ces conditions. Trois expériences furent menées, basées sur l'étude du coefficient de conductivité thermique effective en fonction du flux de chaleur traversant la couche. Les trois expériences ont montré l'absence de convection même sous des conditions extrêmes. Enfin, les résultats sont validés par une analyse du régime transitoire.

ABSTRACT

Theoretical considerations show that intrinsic snow permeability is not known well enough to describe the theoretical conditions for the onset of thermal convection in snow. That is why it is necessary to search after these conditions experimentally. These experiments were conducted studying the effective thermal conductivity of snow versus heat flowing through it. It showed no onset of convection, even under extremal temperature conditions. A study on the transient state of heat flow corroborated our thermal conductivity measurements.

i) INTRODUCTION

La métamorphose de la neige en givre de profondeur peut être un facteur très important pour la perte de stabilité du manteau neigeux et favoriser le déclenchement d'avalanches. Les transferts de vapeur représentent le facteur limitant la vitesse de métamorphose (1). C'est pourquoi l'occurrence de convection thermique dans le manteau neigeux pourrait être un facteur influençant son évolution en accentuant les mouvements de vapeur d'eau en son sein. Cette hypothèse depuis longtemps controversée fut étayée par les résultats d'une expérience récente (2). Compte tenu de la variété importante des types de neige, il nous est apparu nécessaire d'effectuer d'autres expériences sur la convection thermique.

ii) CONVECTION THERMIQUE DANS LA NEIGE: APPROCHE THEORIQUE

La neige: un milieu poreux chauffé par le bas

La neige est un milieu poreux dont la porosité varie de 0.98 à 0.40. L'albédo de la neige est élevé, limitant l'absorption du rayonnement solaire tandis que son émissivité est très importante dans le domaine du rayonnement thermique. En conséquence, la surface du manteau neigeux est souvent beaucoup plus froide que l'air ambiant. Grâce à sa forte porosité, la neige est peu conductrice de la chaleur, si bien que le flux géothermique est suffisant pour maintenir la base du manteau neigeux aux environs de 0°C dès que son épaisseur dépasse quelques dizaines de cm. Un manteau neigeux peu épais peut donc être soumis par temps froid à un gradient thermique élevé. Comme d'autres milieux poreux chauffés par le bas, il pourrait alors être sujet à la convection de Bénard.

Convection thermique dans un milieu poreux

La convection thermique dans un milieu poreux sec a été étudié par de nombreux auteurs (3),(4),(5). L'utilisation de la loi de Darcy, de l'équation de conservation de la masse et de l'énergie permet la description de l'expérience de Bénard dans un milieu poreux sec. Dans le cadre de l'approximation de Boussinesq, l'analyse de la stabilité d'une solution à gradient uniforme introduit le nombre de Rayleigh, Ra :

$$Ra = \frac{\rho_a g \alpha \Delta T H k_m}{\mu_a k}$$

avec $k = \frac{\lambda_m}{\rho_a C_{p_a}}$

où ρ_a est la densité de l'air, g l'accélération de pesanteur, α le coefficient d'expansion thermique de l'air à pression constante, k_m la perméabilité intrinsèque du milieu, μ_a la viscosité cinématique de l'air, λ_m la conductivité thermique effective du milieu en l'absence de convection, C_{p_a} la capacité calorifique de l'air. ΔT et H sont des grandeurs typiques pour la différence de température entre la base et le sommet du milieu et l'épaisseur du milieu.

La convection se déclenche quand le nombre de Rayleigh est supérieur au nombre de Rayleigh critique qui dépend des conditions aux limites imposées à la base et au sommet du milieu. Dans le cas du manteau neigeux, les conditions les plus probables sont un flux de chaleur constant à la base avec une interface imperméable et une température constante au sommet avec une interface perméable. De telles conditions correspondent à un nombre de Rayleigh critique égal à 27.1(8). Les équations utilisables dans la neige doivent prendre en compte la vapeur d'eau. En effet, la surface spécifique de l'interface glace-air est suffisamment importante pour que la pression de vapeur soit considérée macroscopiquement comme saturante et fonction seulement de la température. Tout mouvement convectif d'air engendre donc des changements d'état entre la vapeur d'eau et la glace. La résolution des équations conduit alors à la modification du nombre de Rayleigh en remplaçant λ_m par $(\lambda_m - \lambda_v)$ où λ_v est la conductivité thermique à laquelle est équivalente la diffusion de la vapeur. Les conditions de déclenchement restent alors identiques, mais la prise en compte de la vapeur d'eau modifie les transferts convectifs de chaleur en les augmentant ou les diminuant suivant la valeur du nombre de Lewis par rapport à 1 (2).

$$Le = \frac{k}{Deff}$$

où $Deff$ est le coefficient effectif de diffusion de vapeur d'eau dans la neige.

Occurrence théorique de convection dans la neige

Dans le cas de la neige, les considérations théoriques ne sont pas suffisantes pour déterminer les conditions d'occurrence car de grosses incertitudes persistent sur notre connaissance de la perméabilité intrinsèque malgré des travaux récents (9),(10). Cependant, les nombres de Rayleigh les plus élevés seront atteints certainement dans le cas de neiges peu denses grâce à leur très faible conductivité thermique. Certaines neiges plus denses pourraient être plus perméables mais leur conductivité thermique est trop importante pour atteindre le nombre de Rayleigh critique sous des conditions raisonnables de température.

iii) MODE OPERATOIRE ET DISPOSITIF EXPERIMENTAL

L'occurrence de convection thermique entraîne une augmentation des échanges de chaleur entre la base et le sommet du milieu. Le nombre de Nusselt, Nu traduit le rapport entre le flux de chaleur traversant le milieu et le flux qui le traverserait sous les mêmes conditions mais en l'absence de convection. Nu prend les valeurs suivantes (4):

$$Nu = 1 \text{ si } RA < R_{Ac}$$

$$Nu = \frac{RA}{R_{Ac}} \text{ si } RA \geq R_{Ac}$$

Si la conductivité effective, λ_{eff} , est définie par la forme unidimensionnelle de l'équation de Fourier, la convection thermique entraîne un accroissement de λ_{eff} égal au rapport de RA sur R_{Ac} . L'étude expérimentale a donc consisté à étudier le

coefficient de conductivité effective en fonction du flux de chaleur pour différents types de neige.

La mesure de la conductivité effective de la neige nécessite de résoudre les problèmes suivants:

- imposer différents gradients de température stables à travers la neige
- assurer un transfert de chaleur vertical et unidimensionnel
- mesurer le gradient de température lorsque le régime permanent est atteint
- mesurer le flux de chaleur traversant la couche de neige

La figure 1 représente schématiquement le dispositif expérimental

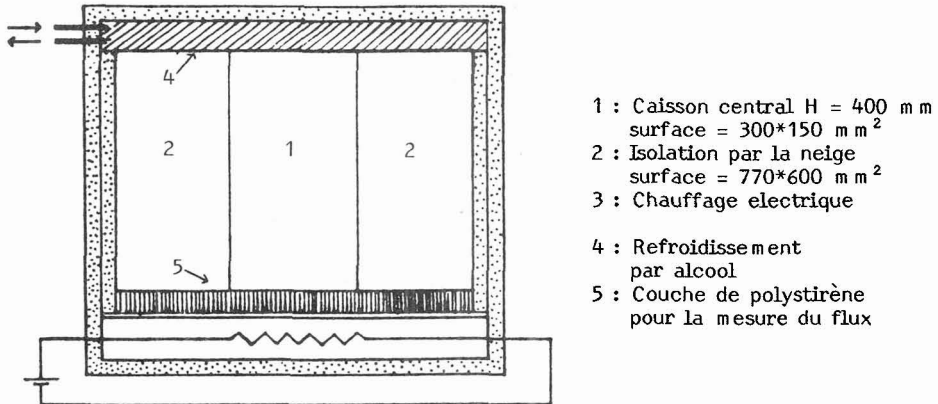


Figure 1 Dispositif expérimental. Experimental device.

Le coefficient de conductivité thermique est mesuré dans un caisson de plexiglass entouré par une grande quantité de neige soumise aux mêmes conditions aux limites. Le tout est très bien isolé de l'extérieur. Le flux de chaleur est mesuré par la différence de température régnant de part et d'autre de la couche de polystyrène située sous la couche de neige. Compte tenu de la faible conductivité thermique de la neige, le régime permanent pour un flux de chaleur donné est long à s'établir et pour limiter la métamorphose des grains de neige, contrôlée par la diffusion de vapeur, la température de la neige est choisie très basse.

iv) RESULTATS EXPERIMENTAUX

Trois types différents de neige ont été étudiés. La première expérience a été menée sur de la neige en gobelets légèrement arrondis par un début de métamorphose de fonte. Sa densité après tamisage atteignait 0.44. Les valeurs mesurées de λ_{eff} sont représentées en fonction du flux sur la figure 2. λ_m et λ_v représentent respectivement la conductivité du milieu sec et la conductivité due à la diffusion de la vapeur en utilisant pour Deff la valeur donnée par Yosida (11). Les courbes en trait plein représentent les mesures effectuées à flux de chaleur croissant tandis que les mesures suivantes, réalisées à flux décroissant, sont représentées en lignes pointillées.

Une croissance générale de λ_{eff} est notée au cours du temps et non pas en fonction du flux. Cette croissance est due à la formation de ponts entre les grains qui favorisent les transferts conductifs de chaleur à travers la glace. Ceci est illustré par la croissance très importante entre les points 3 et 4 de la courbe en traits pleins, due à un arrêt de l'expérience pendant deux semaines sous conditions isothermiques à -17°C . Bien que le flux atteigne 25 W/M^2 , le nombre de Rayleigh correspondant n'atteint que 0.3 (calculé en utilisant une valeur de perméabilité déduite des travaux de Conway et Abrahamson (10)), ce qui est en accord avec le fait que la convection ne soit pas observée.

La deuxième expérience a utilisé de la neige en grains fins et particules reconnaissables de densité 0.22 après tamisage. Les résultats sont représentés sur la figure 3.

Une légère croissance de λ_{eff} est notée quand le flux de chaleur augmente mais l'allure de la courbe n'est pas celle qui serait engendrée par le déclenchement de la convection. Les valeurs plus faibles de λ_{eff} mesurées pour les faibles flux de chaleur sont probablement dues au fait que le régime permanent n'était pas atteint au moment de la mesure. Le nombre de Rayleigh maximal atteint vaut 1.2 pour un flux de 10 W/M²

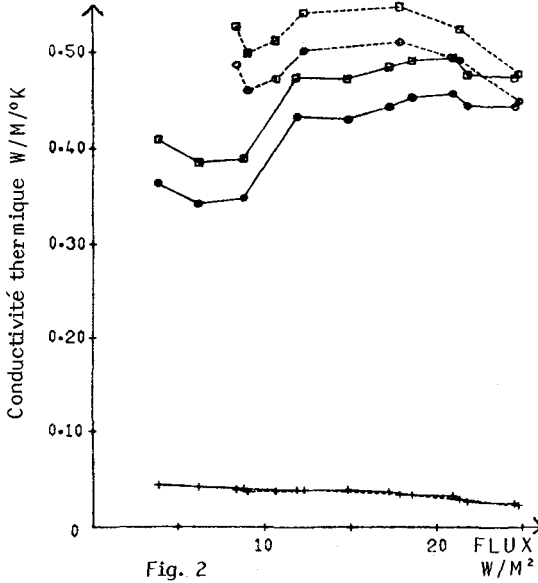


Fig. 2

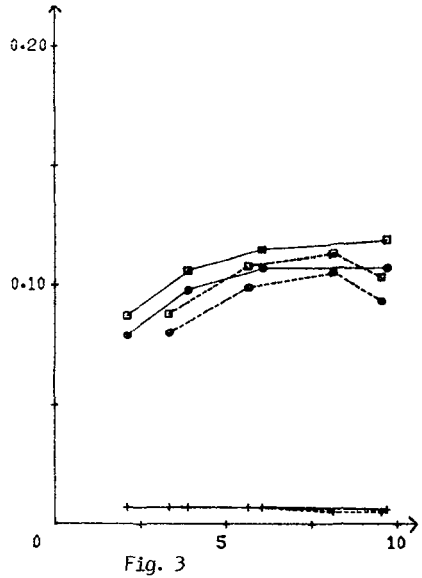


Fig. 3

Figures 2 et 3 Conductivité effective en fonction du flux de chaleur pour des densités égales à 0.44 (fig.2) et 0.22 (fig.3) $\square: \lambda_{eff}, \circ: \lambda_m, +: \lambda_v$. Les traits pleins représentent les mesures à flux croissant et les pointillés représentent les mesures à flux décroissant. Effective thermal conductivity versus heat flow.

La troisième expérience a utilisé de la neige fraîche dont la densité après tamisage n'était que 0.15. Dans une neige aussi récente, même à température très basse, la métamorphose des grains est sensible, entraînant une densification et une augmentation du coefficient de conductivité thermique au cours du temps. De plus, la très faible conductivité thermique d'un tel milieu nécessite des temps très longs pour atteindre un régime permanent. C'est pourquoi seulement deux mesures furent effectuées. La figure 4 représente l'évolution de la valeur calculée de λ_{eff} déduite à chaque instant du champ de température.

Les points entourés A et B représentent les points où le régime permanent fut considéré comme atteint, correspondant respectivement aux flux de 5 et 2.5 W/M². Les deux valeurs sont quasiment identiques, montrant qu'il n'y a pas convection. On remarque toutefois que dans les deux cas, le régime permanent n'était pas tout à fait atteint au moment de la mesure. Le point B correspond à un nombre de Rayleigh égal à 5 environ, ce qui est en accord avec le résultat expérimental montrant l'absence de convection.

Les trois expériences montrent que la convection ne s'est pas déclenchée pour les types de neige utilisés et les conditions de température imposées. Ces dernières correspondent pourtant à des cas naturels extrêmes. Ces résultats sont différents de ceux obtenus par une expérience réalisée par Colbeck, Powers et O'Neill (2). La neige utilisée était constituée de grains ronds et sa densité était 0.25. Sa

conductivité thermique croissait au delà d'un seuil correspondant à un nombre de Rayleigh égal à 4 environ. Compte tenu du désaccord entre les deux expériences et des difficultés rencontrées pour mesurer la conductivité, il nous est apparu nécessaire de valider notre système expérimental.

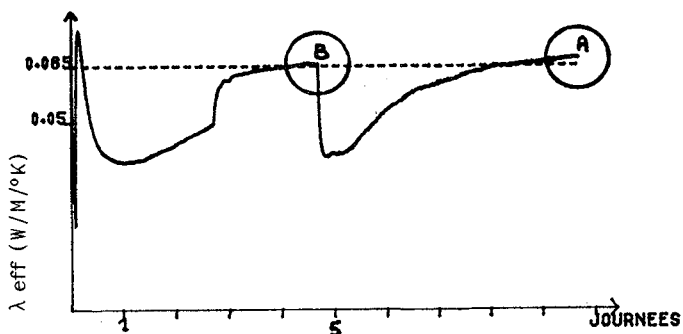


Figure 4. 3^e expérience: mesures de λ_{eff} au cours du temps pour une densité 0.15. B et A représentent les moments où le régime transitoire a été supposé atteint.
Third experiment: values of λ_{eff} along the time for the density 0.15.

v) VALIDATION DE LA MESURE DE CONDUCTIVITE. ETUDE DU REGIME TRANSITOIRE

Le tableau 1 compare les mesures de λ_{eff} effectuées avec notre dispositif pour les trois types de neige avec les valeurs de λ_{eff} prévues par la formule de Yen (12).

$\lambda_{\text{eff}} = 2.22 d^{1.005} \text{ W/M/°K}$ où d est la densité de la neige

Tableau 1 Comparaison entre les valeurs de λ_{eff} mesurées et calculées par la formule de Yen pour les trois échantillons (W/M/°K)

densité	λ_{eff} mesuré	λ_{eff} calculé
0.44	0.50	0.47
0.22	0.11	0.127
0.15	0.066	0.062

La comparaison montre un très bon accord entre les mesures et les valeurs prévues. La deuxième façon de valider a consisté à étudier le régime transitoire entre les points B et A de la troisième expérience. après changement des conditions aux limites, la température au milieu de l'échantillon de neige est passée par un minimum puis un maximum. Nous avons alors cherché quel coefficient de conductivité permettait la meilleure simulation de la température du milieu de la couche de neige en imposant aux limites les températures mesurées au sommet et à la base de la neige. Pour cela nous avons utilisé un modèle unidimensionnel d'évolution thermique du manteau neigeux utilisant un schéma numérique de Cranck et Nicholson. Le modèle comprenait 38 couches de 1 cm et utilisait un pas de temps de 15 minutes. La comparaison entre la température mesurée et simulée autour du minimum et du maximum a été faite pour différentes valeurs de λ_{eff} . Un très bon calage entre les deux courbes se produit quand λ_{eff} égale 0.062 W/M/°K qui est une valeur très proche du λ_{eff} mesuré égal à 0.066, ce qui confirme la bonne qualité du dispositif expérimental (figure 5). Notons que l'obtention d'un calage parfait autour du minimum et du maximum nécessite de supposer que le profil de densité est linéaire et égal à 0.132 au sommet et 0.168 à la base. Cette hypothèse de tassement est en accord avec nos connaissances des lois rhéologiques pour un tel type de neige (13).

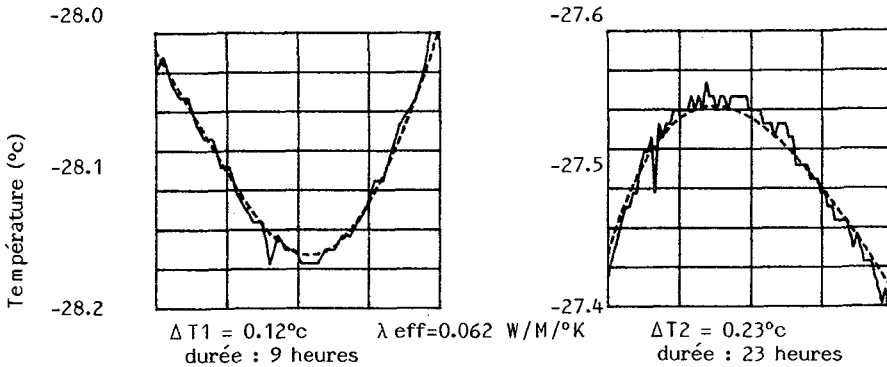


Figure 5. Comparaison entre la température mesurée au centre de l'échantillon (trait plein) et la température simulée (pointillés) autour du minimum et du maximum. Une correction ΔT est apportée pour égaliser la moyenne des deux courbes. Comparison between measured and derivated temperature at the middle of snow.

v) CONCLUSION

Le développement d'un système expérimental bien adapté à la mesure de la conductivité thermique a permis de montrer que la convection thermique ne se déclenchait pas sous les conditions imposées. Ces conditions correspondent aux cas extrêmes pouvant régner dans les régions alpines, ce qui permet d'affirmer que la convection thermique n'affecte pas les manteaux neigeux alpins. Cependant, des conditions plus favorables engendrant la convection (neige très légère sur quelques dizaines de cm et gradient de température très fort) pourraient être rencontrées dans les plaines boréales du Canada et de la Sibérie. Toutefois, il est raisonnable de penser que le nombre de Rayleigh resterait voisin de sa valeur critique, si bien que la convection ne modifierait guère la vitesse de métamorphose des grains.

REFERENCES

- (1) Colbeck, S. CRREL REPORT 82-29 (1982)
- (2) Powers, D., Colbeck, S. et O'Neill, K. CRREL REPORT 85-9 (1985)
- (3) Wooding, R. J. Fluid Mechanics V2, (1957) 273-285
- (4) Elder, J. J. Fluid Mechanics V27, (1967) 29-48
- (5) Bories, S. et Combarous, M. J. Fluid Mechanics V57, (1973) 63-79
- (6) De Moor, G. Direction de la Météorologie. Cours et Manuel n°3. (1983)
- (7) Mc Kibbin, R. et O'Sullivan, M. J. Fluid Mechanics V96, (1980) 375-396
- (8) Nield, D. Water Resources Research 4(3) (1968) 553-560
- (9) Shimizu, H. Low Temperature Science Contribution n°1053 (1970)
- (10) Conway, H. et Abrahamson, J. J. Glaciology. vol 30 n°106 (1984) 328-333
- (11) Yosida, Z. Low Temperature Science Series A, Part 1 (1955)
- (12) Marbouty, D. (1983) La neige. Propriétés physiques. Note Technique Dir. Météo N°5
- (13) Navarre, Blaix et Taillefer. (1977) Propriétés mécaniques de la neige. Assimilation à un corps de Burger. Note de l'EERM n°389