Mesure de la densité de la neige à partir de ses propriétés acoustiques

Snow density measurement using acoustic properties

par O. Marco*

Division Nivologie du Cemagref

P. Villemain

Laboratoire d'instrumentation, de micro-informatique et d'électronique de l'Université J. Fourier (Grenoble)

F. Touvier

Centre d'Etude de la Neige (Grenoble)

Today, it is possible to measure the density of the snow by different ways ; attenuation of gamma rays, absorption of electromagnetic waves... In this paper, we suggest a simple method to estimate the density of the snow from its acoustic properties. After some basic recalls about the propagation of the sound in a continuous medium, we show the links observed from laboratory experiment, between the density and the acoustic parameters of the snow. A good correlation is found between the density and the modulus of the impedance. The use of a mathematical model of the propagation of an acoustic wave through a porous medium allows us to calculate the density of the snow from its acoustic porosity. Therefore, it will be easier for field measurements and more efficient to use a simple method based on the empirical relations which we obtained and we propose the principle of an acoustic sensor to estimate in the snow cover, the density of the snow.

I ■ INTRODUCTION

Les propriétés acoustiques de la neige peuvent être étudiées pour différents objectifs.

On peut s'intéresser, par exemple, au bruit émis par un échantillon de neige se déformant sous l'action de contraintes extérieures. Le but est alors de prévoir la rupture du manteau neigeux dans une zone de départ d'avalanche en plaçant quelques microphones dans la neige pour suivre l'évolution de son état de contrainte [1, 2, 3].

De nombreux travaux sont également réalisés pour déterminer les différentes strates d'un manteau neigeux [4, 5] ou connaître les caractéristiques acoustiques d'un sol recouvert de neige [6]. Enfin, une étude a été faite pour comprendre pourquoi les personnes ensevelies par une avalanche entendent les sauveteurs sans que la réciproque soit toujours vraie [7].

Mais les propriétés acoustiques de la neige sont surtout étudiées pour estimer, soit quelques-unes de ses caractéristiques mécaniques (densité, élasticité) soit quelques caractéristiques de sa microstructure (forme des grains, espace libre entre grains...). Dans cet article, nous présentons les résultats de nos travaux préliminaires sur l'étude des propriétés acoustiques de différents types de neige, naturelle ou compactée artificiellement, afin de déterminer quels paramètres acoustiques peuvent être corrélés à la densité et définir ainsi le principe d'un capteur acoustique permettant de mesurer automatiquement ce paramètre. D'autres techniques existent, en particulier la mesure de la densité de la neige à partir de l'atténuation du rayonnement gamma où de l'absorption des ondes électromagnétiques. En 1978, ces différentes techniques ont été testées sur le site expérimental du Col du Lautaret de la Division Nivologie du Cemagref pour mesurer la densité de la neige au sein d'une avalanche coulante, avec des résultats plus ou moins satisfaisants [8, 9]. Aujourd'hui notre objectif est de définir les principes d'un capteur acoustique dont la mise en place et le fonctionnement *in situ* soient les plus simples possible.

* Actuellement à RTM (Restauration des terrains en montagne), Gap.

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/1998071

II ■ LA PROPAGATION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE DANS LA NEIGE

2.1 Généralités

Dans un milieu continu, la vitesse du son C est étroitement liée à la masse volumique du milieu traversé ρ_0. Ainsi, nous avons :

— *pour l'air* : $C = \sqrt{\dfrac{\gamma p_0}{\rho_0}}$

g : rapport des capacités calorifiques,
p_0 : pression de l'air ambiant.

A 0 °C, la vitesse du son dans l'air sec est de 332 m/s. Cette vitesse augmente de 0,6 m/s par °C.

— *pour l'eau*, $C = \dfrac{1}{\sqrt{K\rho_0}}$

K : coefficient de compressibilité de l'eau (Pa^{-1}).

A 10 °C, la vitesse du son est alors égale à 1 414 m/s.

— *pour les milieux continus élastiques (les solides en général)*, la vitesse de propagation d'une onde longitudinale est donnée par : $C = \sqrt{\dfrac{E}{\rho_0}}$

E : module d'Young.

Nous avons alors, par exemple :
pour le caoutchouc, $C = 50$ m/s,
pour l'acier $C = 5\,900$ m/s.

Mais la vitesse du son n'est pas le seul paramètre acoustique d'un milieu. Les autres paramètres nécessaires pour déterminer ses propriétés acoustiques sont :

- L'impédance caractéristique normalisée notée W qui est une grandeur complexe, égale au rapport entre la pression et la vitesse en un point d'un milieu supposé infini, rapportée à l'impédance caractéristique de l'air libre, dans les mêmes conditions de température.
- Le coefficient d'atténuation, noté α, qui caractérise l'absorption de l'énergie par unité de longueur.

On obtient alors le vecteur d'onde complexe $k = \alpha + \dfrac{\omega}{C} i$, ω étant la pulsation de l'onde monochromatique émise.

2.2 La propagation du son dans la neige

2.2.1 *La neige peut-elle être considérée comme un milieu continu ?*

Les premières études réalisées sont basées sur cette hypothèse [10]. Elles ont permis d'établir, outre des relations empiriques entre le module d'Young et la vitesse de propagation longitudinale, une très bonne corrélation entre ce paramètre acoustique et la densité pour des neiges très denses du Groënland [11], à savoir :

$$\rho = \frac{C + 6285}{24282} \quad \text{pour une densité comprise entre 0,4 et 0,6} \qquad (1)$$

$$\rho = \frac{C + 120}{13781} \quad \text{pour une densité comprise entre 0,6 et 0,9} \qquad (2)$$

Avec :
ρ : masse volumique de la neige (kg/m^3)
C : vitesse du son (pieds/s).

Les vitesses mesurées étaient toutes supérieures à 500 m/s. Le son se propagerait à travers les structures solides de la neige, à savoir les grains de glace. Toutefois, les fréquences utilisées ne sont pas rappelées explicitement. Or, en 1952, un chercheur japonais, Oura, constate, pour les neiges peu denses (densité inférieure à 0,35) et par des expériences *in situ*, que la vitesse du son varie avec la racine carré de la température et reste toujours inférieure à la vitesse du son dans l'air libre [12]. Il suppose alors que la propagation se fait par les pores de la neige. Il conforte son hypothèse en observant que la vitesse du son diminue lorsque la densité augmente (diminution de la porosité) et que, pour une même densité, cette vitesse augmente avec la taille des grains (augmentation du diamètre des pores ?) [13]. Enfin, il vérifie que l'atténuation augmente avec la fréquence. Cette constatation recoupe les calculs théoriques de la propagation du son dans un petit tube, lorsque la viscosité et la conductivité thermique de l'air ne peuvent être négligées [14]. En 1965, un autre chercheur japonais confirme tous ces résultats par des mesures en laboratoire [15].

En 1974, un scientifique soviétique, Bogorodsky, propose une interprétation permettant d'expliquer l'ensemble des résultats précédents [16]. Il suppose que pour les faibles densités, la propagation se fait essentiellement par les pores. La vitesse du son diminue alors avec la densité, passe par un minimum pour une densité proche de 0,3 puis augmente de nouveau pour atteindre la vitesse de propagation longitudinale dans la glace. Ainsi, pour des densités supérieures à 0,3, la propagation se ferait plutôt par les cristaux de glace (voir *fig. 1*).

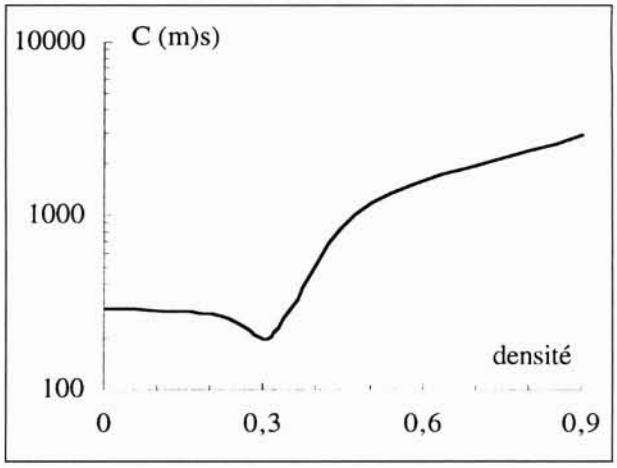
A partir de ce constat, Johnson suppose l'existence de 3 ondes simultanées [17] :

- une onde longitudinale dite de première espèce se propageant par les cristaux de glace ;
- une onde longitudinale dite de seconde espèce se propageant à travers les pores ;
- une onde de cisaillement se propageant perpendiculairement à l'axe de propagation des deux précédentes.

Il propose alors d'utiliser le modèle de Biot sur la propagation du son à travers un milieu poreux rempli d'un fluide compressible et dont le squelette serait les cristaux de glace. Ce modèle suppose que les deux ondes longitudinales sont couplées. Mais ce couplage n'a pas pu être mis en évidence expérimentalement pour les neiges de densité inférieure à 0,4 [18]. D'autres auteurs [19, 20] supposent alors que, selon la porosité du milieu, l'une des deux ondes longitudinales est prépondérante.

Au vu de ces premiers résultats, il semble préférable d'étudier les ondes se propageant par la structure solide. Nous pourrions alors utiliser les relations empiriques établies par Smith (relations (1) et (2)).

Mais les expériences préliminaires que nous avons menées en laboratoire ont mis en évidence les difficultés



1. Vitesse du son en fonction de la densité de la neige Bogorodsky [16].

opératoires pour étudier l'onde se propageant par la structure solide de la neige. Cette constatation a été faite par d'autres chercheurs [20, 21]. Ces expériences nécessitent un contact parfait entre la neige et le couple d'émetteur-récepteur. Cette contrainte est difficile à respecter avec un milieu poreux. Le contact est obtenu soit en lissant la neige ou en utilisant un gel de silicone lorsqu'elle est très dense, soit, pour la neige fraîche, en créant un pont de glace ou en tassant la neige contre les capteurs. Sans ces précautions, une lame d'air est présente entre l'émetteur et la glace. Or, l'impédance caractéristique normalisée de la glace étant 8 000 fois plus élevée que celle de l'air, l'onde est entièrement réfléchie.

Ces contraintes expérimentales sont irréalisables pour mesurer la densité de la neige *in situ*. Nous avons donc orienté notre recherche sur les propriétés de la propagation d'une onde acoustique à travers les pores de la neige. Les expériences que nous avons réalisées *in situ* nous ont permis de constater que, pour une neige de densité voisine de 0,4, l'onde était complètement atténuée au bout de quelques centimètres à une fréquence de 20 kHz. Ces résultats sont confortés par ceux d'autres chercheurs [22]. De ce fait, nous nous sommes limités à l'étude des ondes sonores à des fréquences comprises entre 500 et 4 000 Hz.

De nombreux chercheurs se sont intéressés à la propagation du son à travers les pores d'un milieu poreux, en particulier pour l'étude des sols et matériaux absorbants [6, 23, 24]. Des relations empiriques faisant intervenir la porosité du milieu ont été établies entre différents paramètres acoustiques. Mais elles ne permettent pas d'obtenir une expression simple de la porosité en fonction de paramètres acoustiques faciles à mesurer *in situ*. Toutefois, l'objectif de ces expériences n'était pas de déterminer la porosité mais d'estimer, le plus simplement possible, les caractéristiques acoustiques du milieu. Aussi, avant de s'intéresser à la modélisation de la propagation d'une onde acoustique dans un milieu poreux tel que la neige [25], il était indispensable de vérifier si une relation empirique simple pouvait être dégagée pour déterminer la densité de la neige à partir de ses propriétés acoustiques. Pour cela, nous disposions de quelques mesures directes de la vitesse du son et du coefficient d'atténuation [12, 13, 15, 22]. Mais elles sont trop ponctuelles et en nombre insuffisant (tous les types de neige ne sont pas étudiés) pour permettre d'établir une relation empirique généralisable. Toutefois, nous avons pu disposer d'un grand nombre de mesures d'impédances spécifiques réalisées en laboratoire par O. Buser [18] pour des neiges sèches, avec une densité inférieure à 0,4. Nous les avons complétées en utilisant des échantillons de tous les types de neige ayant une densité comprise entre 0,15 et 0,68.

III ■ LES RELATIONS ENTRE LA DENSITÉ DE LA NEIGE ET SES PARAMÈTRES ACOUSTIQUES

Afin de réaliser un grand nombre de mesures pour des neiges très différentes, des échantillons ont été prélevés en différents lieux pour être étudiés ensuite en chambre froide. De même, le compactage de certains échantillons ainsi que leur humidification ont été réalisés en laboratoire afin de bien contrôler ces opérations et obtenir des échantillons homogènes. L'utilisation d'une neige humide nécessitant des mesures rapides, nous avons utilisé la méthode du tube d'onde stationnaire à deux microphones [26] pour effectuer les mesures d'impédances. Cette technique nous a permis de déterminer les caractéristiques acoustiques de chaque échantillon pour 25 fréquences comprises entre 500 et 4 000 Hz. Le matériel utilisé est la chaîne de mesure 4206 de Brüel et Kjær. Le mode opératoire est présenté précisément dans le rapport final d'un travail de thèse portant sur ce sujet [25]. Nous ne présenterons donc ici que les principaux résultats.

Les propriétés acoustiques d'un milieu sont complètement déterminées par deux grandeurs complexes (impédance caractéristique normalisée W et vecteur d'onde k) et donc par quatre paramètres réels :

$W = |W| e^{i\varphi}$ Impédance caractéristique normalisée

$k = \alpha + i\dfrac{\omega}{C}$ Vecteur d'onde complexe

$|W|$ et φ : respectivement module et phase de l'impédance caractéristique normalisée

α : coefficient d'atténuation

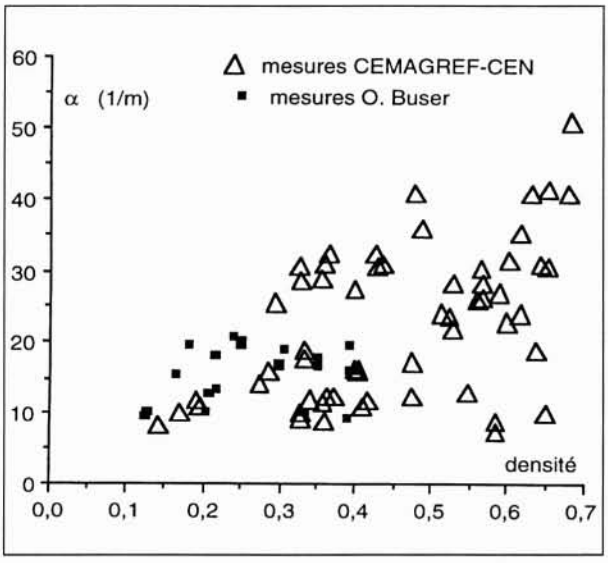
C : vitesse du son dans le milieu.

Les résultats obtenus sont décrits ci-après.

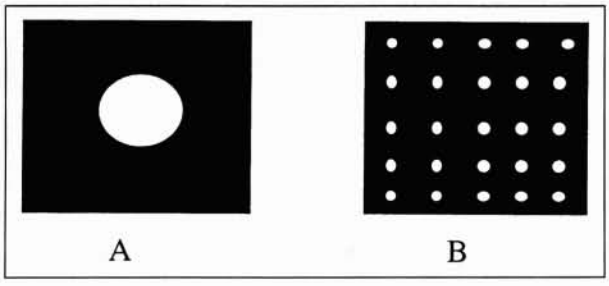
3.1 Relation empirique entre la densité et le coefficient d'atténuation

La *figure 2* indique clairement qu'il n'existe pas de relation simple entre la densité et l'atténuation de l'amplitude d'une onde acoustique traversant un échantillon de neige. Nous retrouvons cette dispersion à toutes les fréquences étudiées.

Ceci s'explique par le fait que l'atténuation est principalement liée à la dissipation visqueuse et thermique. Ce paramètre dépend donc fortement de la forme et de la taille des pores par lesquels transite l'onde acoustique. Ainsi, l'atténuation d'une onde acoustique traversant l'échantillon A de la *figure 3* est moins importante que celle traversant l'échantillon B, pour une densité identique.



2. Relation entre la densité de la neige et le coefficient d'atténuation Fréquence : 1 550 Hz.



3. Milieux poreux de même densité ayant des pores de tailles différentes.

3.2 Relation empirique entre la densité et la vitesse du son dans la neige

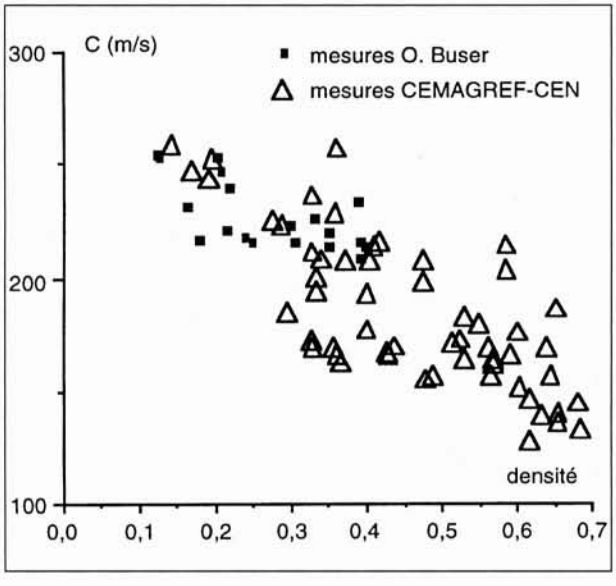
La densité n'est pas le principal paramètre explicatif de la vitesse du son (voir *fig. 4*). Nous pouvons cependant noter que la vitesse tend à diminuer lorsque la densité augmente. Mais cette tendance ne suffit pas pour estimer d'une manière satisfaisante la densité à partir de la vitesse du son.

Toutefois, nous pouvons faire les remarques suivantes :

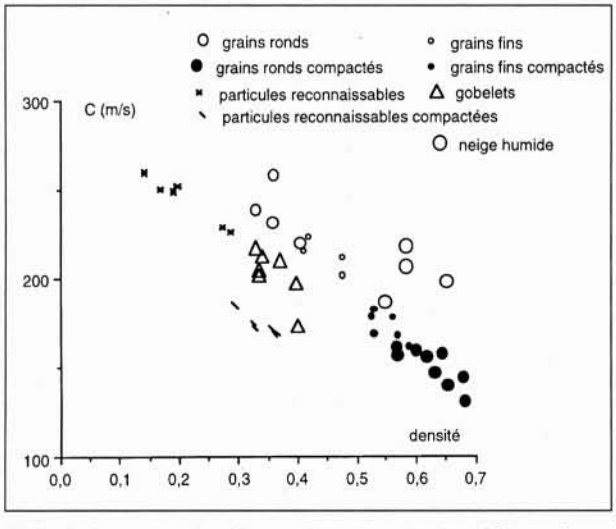
— Il existe une relation étroite entre la densité et la vitesse du son pour des échantillons d'une même neige sèche, c'est-à-dire prélevée au même endroit, au même moment, et que nous avons plus ou moins compactée mécaniquement (voir *fig. 5*).

— Pour une même densité et un même type de grains, la vitesse du son est supérieure lorsque la neige est humide (*fig. 5*). Cela peut s'expliquer par le fait que l'eau sous forme liquide (TEL de quelques %) se situe essentiellement entre des grains très proches les uns des autres et ne circule pas dans les pores. L'eau liquide se situerait essentiellement contre les parois des tubes, diminuant ainsi la dissipation visqueuse.

Ainsi, au contraire des milieux continus, la vitesse du son ne permet pas d'estimer la densité d'un milieu poreux.



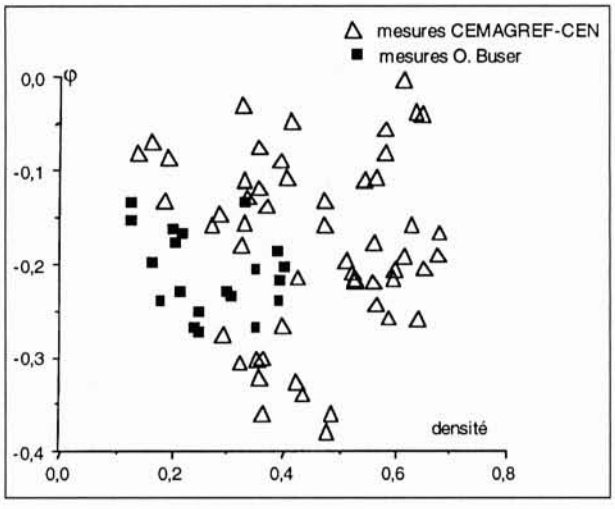
4. Relation entre la vitesse du son dans la neige et la densité à une fréquence de 1 550 Hz.



5. Relation entre la vitesse du son et la densité, en fonction des types de grains et de leur compactage pour une fréquence de 1 550 Hz.

3.3 Relation empirique entre la densité et l'impédance caractéristique normalisée

La phase φ de l'impédance caractéristique normalisée de la neige semble indépendante de la densité (voir *fig. 6*).



6. Variation de la phase de l'impédance caractéristique en fonction de la densité pour une fréquence de 1 550 Hz.

Par contre, il apparaît une très bonne corrélation entre le module de l'impédance caractéristique $|W|$ et l'inverse de la porosité $\frac{1}{h}$. Nous avons alors tenté de trouver une relation linéaire entre le logarithme décimal de $|W|$ et celui de $(h - h_o)$ h_o correspondrait à la porosité limite à partir de laquelle la propagation à travers les pores deviendrait impossible ($|W| = \infty$). En ajustant h_o afin d'obtenir le meilleur coefficient d'ajustement nous avons trouvé, pour une fréquence de 1 550 Hz :

$\log |W| = 0{,}079 - 1{,}3 \log h$ ($R^2 = 0{,}916$)

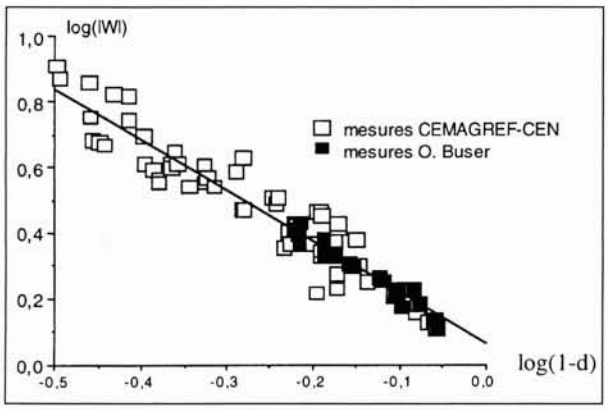
R^2 étant le coefficient de détermination (rapport entre la variance expliquée par la régression et la variance totale).

Ce résultat indique qu'il n'y a pas de phénomène de percolation dans la propagation du son dans une neige dense. En effet, la propagation devient impossible seulement lorsque le volume d'air inclus dans la neige devient nul ($h_o = 0$).

L'objectif de notre étude étant la détermination de la densité à partir de paramètres acoustiques, nous avons alors recherché, de la même manière que ci-dessus, une relation entre $\log(|W|)$ et $\log(d_o - d)$. Nous avons alors trouvé évidemment $d_o = 1$ et la relation suivante, pour les mêmes fréquences que précédemment :

$$\log(|W|) = 0{,}06 - 1{,}55 \log(1 - d) \quad (R^2 = 0{,}918) \qquad (3)$$

Une telle relation empirique entre $|W|$ et d pourrait être utilisée pour mesurer la densité *in situ*. En effet, pour un échantillon de longueur infinie, l'impédance spécifique normalisée Z (rapport entre la pression exercée par l'onde ayant traversée la surface de l'échantillon et la vitesse de cette onde, rapportée à l'impédance caractéristique de l'air ambiant) est identique à l'impédance caractéristique normalisée W. On peut donc déterminer ce paramètre directement à partir du coefficient de réflexion r à la surface de l'échantillon :

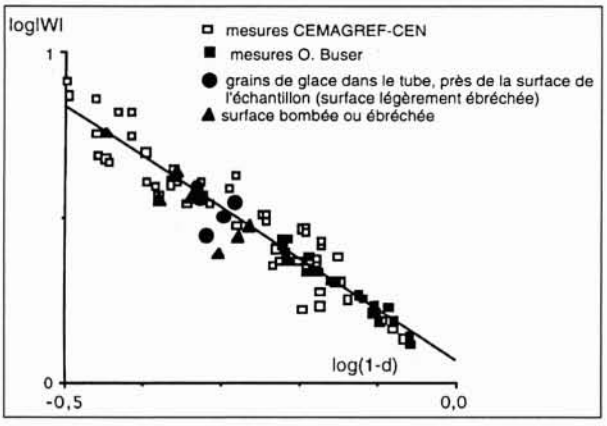


7. Relation entre le module de l'impédance caractéristique $|W|$ et la densité (fréquence 1 550 Hz).

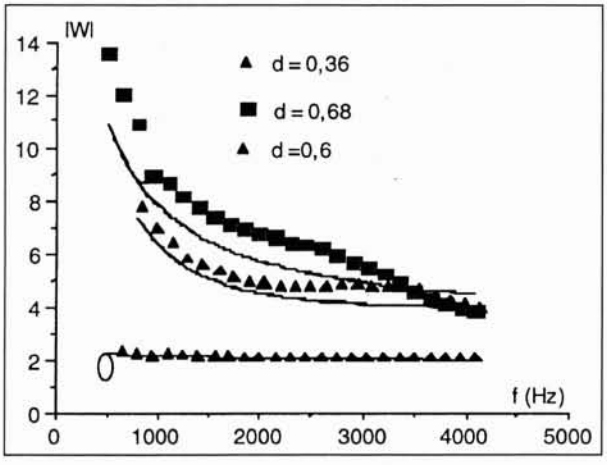
$$r = \frac{\text{Pression à la surface de l'échantillon due à l'onde incidente}}{\text{Pression à la surface de l'échantillon due à l'onde réfléchie}}$$

$$Z \text{ (échantillon de longueur infinie)} = W = \frac{r+1}{r-1}$$

Toutefois, pour que les mesures *in situ* soient fiables, nous avons vérifié que les résultats obtenus sont peu sensibles à la qualité de la surface de l'échantillon *(fig. 8)* et à la fréquence utilisée *(fig. 9)*. Ainsi, à 1 550 Hz, la variation de $|W|$ avec la fréquence est peu sensible.



8. Influence de la qualité de l'état de surface de l'échantillon sur la relation entre $|W|$ et d (fréquence 1 550 Hz).



9. Variation du module de l'impédance caractéristique $|W|$ en fonction de la fréquence. Les traits pleins représentent les résultats obtenus par modélisation.

Les résultats obtenus indiquent toutefois que la détermination de la densité à partir du module de l'impédance caractéristique normalisée sera plus fiable pour les faibles densités *(fig. 7, 8 et 9)*.

Il est également possible de déterminer la densité de la neige en utilisant un modèle de propagation d'une onde acoustique dans un milieu poreux à structure rigide.

IV ■ DÉTERMINATION DE LA DENSITÉ DE LA NEIGE À PARTIR D'UNE MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA PROPAGATION D'UNE ONDE ACOUSTIQUE DANS LA NEIGE

L'ensemble de ce travail est présenté dans le rapport de thèse de O. Marco [25]. Nous ne présenterons ici que les principaux résultats.

4.1 Présentation du modèle

Le modèle utilisé est celui proposé par Zwikker et Kosten [27]. Le milieu poreux est assimilé à un ensemble de tubes de section circulaire constante, parallèles, tortueux et inclinés par rapport à l'axe de propagation de l'onde. Le diamètre est supposé suffisamment petit devant la longueur d'onde pour que seule l'onde plane unidimensionnelle, appelée mode fondamental, se propage réellement. Les effets de viscosité et de conduction thermique au voisinage des parois ne peuvent être négligés.

Ce modèle fait intervenir trois paramètres :

- t : la tortuosité (nombre adimensionnel prenant en compte la forme des pores),
- h_a : La porosité acoustique (rapport entre le volume total des pores par lesquels transite l'onde acoustique sur le volume total de l'échantillon de neige). h_a est inférieure ou égale à la porosité de la neige car elle ne prend pas en compte les inclusions d'air qui ne sont pas traversées par l'onde acoustique),
- R : Le rayon moyen de l'ensemble des pores (en mm).

On obtient alors :

$$k = \alpha + i\frac{\omega}{C} = i\frac{\omega}{C_{air}}\sqrt{t}\left(\frac{1 + \frac{2}{\sqrt{Pr}\,\varepsilon\sqrt{-i}}(\gamma-1)\frac{J_1(\sqrt{Pr}\varepsilon\sqrt{-i})}{J_0(\sqrt{Pr}\varepsilon\sqrt{-i})}}{1 - \frac{2}{\varepsilon\sqrt{-i}}\frac{J_1(\varepsilon\sqrt{-i})}{J_0(\varepsilon\sqrt{-i})}}\right)^{0,5} \quad (4)$$

$$W = \frac{\sqrt{t}}{h_a}\left(1 - \frac{2}{\varepsilon\sqrt{-i}}\frac{J_1(\varepsilon\sqrt{-i})}{J_0(\varepsilon\sqrt{-i})}\right)^{0,5}\left(1 + \frac{2}{\sqrt{Pr}\,\varepsilon\sqrt{-i}}(\gamma-1)\frac{J_1(\sqrt{Pr}\,\varepsilon\sqrt{-i})}{J_0(\sqrt{Pr}\,\varepsilon\sqrt{-i})}\right)^{0,5} \quad (5)$$

avec :

Pr : nombre de Prandtl

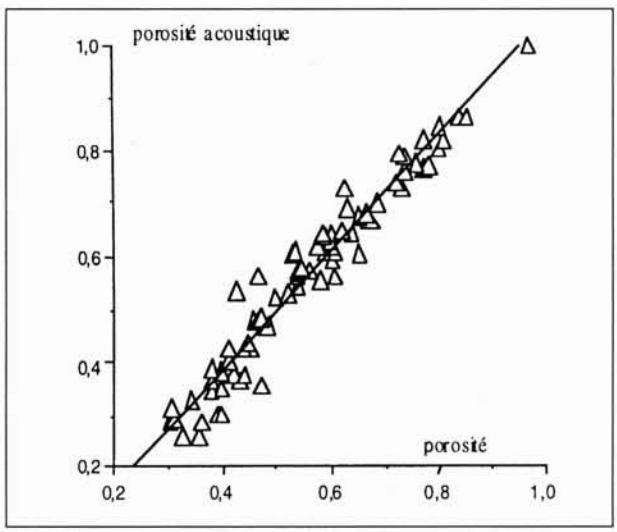
ω : pulsation de l'onde

$\varepsilon = R\sqrt{\frac{\omega}{\nu}}$ (ν : viscosité cinématique de l'air ambiant)

L'ajustement de ce modèle à nos expériences et à celles de O. Buser [18] indique une bonne corrélation entre les

valeurs de $|W|$ calculées et mesurées *(fig. 9)*, ainsi qu'une très bonne correspondance entre la porosité réelle de la neige et la porosité acoustique *(fig. 10)*.

Ce modèle est bien adapté aux neiges de faible densité [18]. Toutefois, il ne permet pas de retrouver d'une manière précise la phase de l'impédance caractéristique normalisée pour les densités élevées [25] mais son utilisation reste satisfaisante pour déterminer la porosité de la neige. Malheureusement, l'utilisation de ce modèle nécessite l'ajustement de 3 paramètres dont deux d'entre eux (R et t) n'ont pas vraiment une réalité physique. Ils doivent donc être ajustés. Cette approche nécessite un grand nombre de mesures [25]. C'est pourquoi, malgré la bonne corrélation entre porosité réelle et porosité acoustique, nous nous limiterons à l'utilisation de la loi empirique présentée dans le chapitre précédent. Il est intéressant de noter que les égalités (5) et (6) montrent que le coefficient d'atténuation et la vitesse du son ne sont pas liés directement à la porosité acoustique, et de ce fait à la densité réelle de la neige (voir *fig. 10*). Par contre, selon (6), l'impédance caractéristique normalisée est fortement corrélée à h_a. Ces remarques sont confirmées par les résultats des études empiriques présentées au chapitre précédent.



10. Correspondance entre porosité mesurée et porosité acoustique calculée.

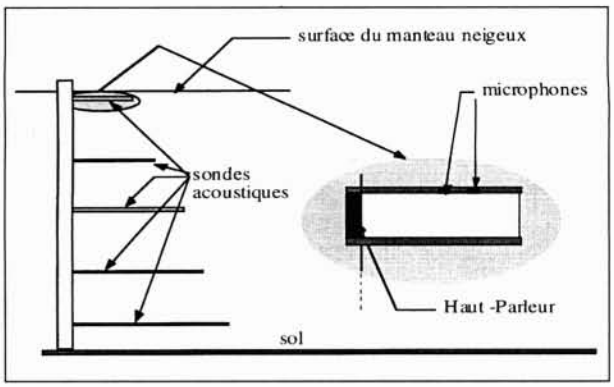
V ■ CONCLUSION

Les expériences que nous avons réalisées en laboratoire indiquent qu'il est possible de déterminer la densité d'un échantillon de neige à partir de la mesure de son impédance caractéristique, quelles que soient la nature de ses cristaux, sa teneur en eau liquide ou la qualité de sa surface.

Avant de s'intéresser aux avalanches, cette méthode sera testée pour déterminer la densité de la neige en différents points d'un manteau neigeux. Le principe d'un tel capteur de terrain est le suivant *(fig. 11)*.

Le long d'un mât est disposé une série de tube équipés d'un haut-parleur et de deux microphones pour mesurer le coefficient de réflexion à la surface de la neige située à la sortie du tube.

Toutefois, outre la validation des expériences en laboratoire par des mesures *in situ*, de nombreux points restent à préciser en particulier le dépôt de la neige autour du dispositif de mesure et les embouchures des tubes pour adapter l'impédance.



11. Schéma de principe d'un capteur acoustique pour mesurer la densité d'un manteau neigeux.

RÉFÉRENCES

[1] St Lawrence W.F., Lang T.E., Brown R.L., Bradley C.C. (1973). — Acoustic emission in snow at constant rates of deformation. *Journal of glaciology,* vol. 12, N° 64, 144-146.

[2] St Lawrence W.F. (1980). — The acoustic emission response of snow. *Journal of glaciology,* vol. 26, N° 94, 209-216.

[3] St Lawrence W.F., Lang T.E. (1981). — A constitutive relation for the deformation of snow. *Cold Regions Science and Tech.*, 4, 3-14.

[4] Lee S.M., Rogers J.C., Kuncay A. (1986). — Acousting probing of stratified snowpacks. *Journal of Sound and Vibration,* 104 (3), 528-532.

[5] Moore H.M., Attenborough K. (1991). — *In Situ* Acoustical Investigations of deep Snow. *Applied Acoustics*, 33, 281-301.

[6] Nicolas J., Berry J.L. (1984). — Propagation du son et effet de sol, note technique du Département de Génie Mécanique, Université de Sherbrooke, Canada.

[7] Johnson J.B. (1985). — Audibility within and outside deposited snow. *Journal of Glaciology,* vol. 31, N° 108, 136-142.

[8] Dupré la Tour (1978). — La dynamique des avalanches d'après les expériences au Col du Lautaret, Note CENG/ASP.

[9] CTGREF (1978). — Présentation des expériences et nouvelles perspectives en dynamique des avalanches, Rapport CTGREF, Division Nivologie.

[10] Mellor M. (1964). — *Properties of Snow*, C.R.R.E.L. Part III, sect. A.

[11] Smith J.L. (1965). — The elastic constants, strength and density of Greenland snow as determined from measurements of sonic wave velocity CRREL TR 167.

[12] Oura H. (1952). — Sound Velocity in the Snow Cover. *Low Temperature Science,* 9, 171-179.

[13] Oura H. (1952). — Reflection of Sound at Snow Surface and Mechanism of Sound Propagation in Snow. *Low Temperature Science,* 9, 179-186.

[14] Morse P.M., Ingard K.U. (1968). — Theorical acoustics, Princeton University Press, New Jersey, 227-300.

[15] Ishida T. (1965). — Acoustic Properties of Snow, Contribution n° 708 from the Institute of Low Temperature Science.

[16] Bogorodsky V.V., Gavrilo V.P. and Nitikin V.A. (1974). — Quelques particularités de la propagation du son dans la neige. *Akust. Zh.*, 20, 195-198 (Texte en russe).

[17] JOHNSON J.B. (1982). — On the application of Biot's theory to acoustic wave propagation in snow. *Cold Regions Science and Tech.*, 6, 49-60.

[18] BUSER O. (1986). — A rigid frame model of porous media for the acoustic impedance of snow. *Journal of Sound and vibration*, 111 (1), 71-92.

[19] SOMMERFELD R.A. (1982). — A review of Snow Acoustics. *Reviews of Geophysics and Space Physics*, vol. 20, n° 1, 62-66.

[20] LEE S.M., ROGERS J.C. (1984). — Characterisation of snow by acoustic sounding ; a feasibility study. *Journal of Sound and Vibration*, 99, 247-266.

[21] ZEPHORIS M., MARTIN D. and PONTIKIS C. (1975). — Propagation des ondes ultra-sonores au sein du manteau neigeux, Météorologie Nationale (France), Compte-rendu de fin d'étude.

[22] LANG T.E. (1976). — Measurements of acoustic properties of hard-pack snow. *Journal of glaciology*, vol. 17, N° 76, 269-276.

[23] DELANY M.E., BAZLEY E.N. (1970). — Acoustical properties of fibrous absorbent material. *Appl. Acoustics*, 3, 105-116.

[24] EMBLETON T.F.W., PIERCY J.E., DAIGLE G.A. (1983). — Effective flow resistivity of ground surfaces determinated by acoustical measurements. *Journal of Acoust. Society Ame.*, 74 (4), 1239-1244.

[25] MARCO O. (1994). — Instrumentation d'un site avalancheux : De l'utilisation des propriétés acoustiques de la neige pour la mesure de paramètres physiques d'une avalanche dense, Collection « Études » du Cemagref, Equipements pour l'Eau et l'Environnement, N° 16 (1995).

[26] CHUNG J.Y. and BLASER D.A. (1980). — Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties I. Theory, II Experiment. *Journal of Acoust. Society Amer.*, 68 (3), 907-921.

[27] ZWIKKER C., KOSTEN C.W. (1949). — *Sound and absorbing materials*, New York Elsevier.