

Comportement thermique de laines minérales isolantes à des teneurs en eau variables en conditions isothermes

L. MARMORET^{1*}, P. SALAGNAC², F. ACHCHAQ¹, H. BEJI¹

¹Laboratoire des Technologies Innovantes, équipe Transferts et Construction Durable, Université de Picardie Jules Verne, IUT, Avenue des Facultés, 80025 Amiens

²Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-industrie et Bâtiment, Université de La Rochelle, 17042 La Rochelle Cedex

*(auteur correspondant : laurent.marmoret@u-picardie.fr)

Résumé - L'étude porte sur la caractérisation thermique de deux types de laines minérales isolantes. Ce travail expérimental a montré que la méthode de la Transient Plane Source (TPS) est adaptée pour la caractérisation de ces matériaux à fortes porosités. Les mesures à l'état sec ont permis de valider notre protocole de mesure mais également de montrer l'influence de la morphologie sur la conductivité thermique des laines. Les mesures en présence d'eau ont fait apparaître une augmentation brusque de la conductivité thermique qui peut être attribuée à l'impact de la diffusion de l'eau. On a ainsi constaté un doublement de la conductivité thermique entre les mesures à l'état sec et à l'état saturé.

Nomenclature

a	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$	<i>Symboles grec</i>	
r_o	rayon de la sonde, m	φ_o	flux de chaleur, mW
S_V	Surface volumique, μm^{-1}	ϕ	diamètre moyen des fibres, μm
t	temps, s	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
T	température, $^{\circ}C$		

1. Introduction

Les pays industrialisés ont engagé depuis la crise énergétique de 1970 une politique d'économie d'énergie qui a provoqué un développement considérable du secteur de l'isolation thermique dans la construction. La connaissance du comportement thermique des matériaux isolants reste cependant très imparfaite malgré l'intérêt qui leur est porté depuis longtemps [1,2]. S'il est définitivement admis que la conductivité thermique est fonction de la structure et de la teneur en humidité [3], les rares études consacrées au sujet ont toutes tendu vers la détermination des paramètres intervenants dans les équations de transfert et de masse dans l'objectif ultime d'alimenter un modèle. Notre approche est ici purement expérimentale et doit mettre en évidence les interactions structure – transferts hydrique et thermique intervenant dans une laine et permettre de vérifier que notre protocole d'essai est correct pour ces matériaux à fortes porosités. Le comportement thermique des laines isolantes en fonction de la teneur en eau est étudié en utilisant la méthode de caractérisation nommée TPS (Transient Plane Source ou Hot Disc).

2. Matériaux

Nous avons étudié deux laines de verre notées par la suite L1 et L2 commercialisées sous forme de panneaux qui sont toutes deux destinées à l'isolation de toiture. Lors de cette pose,

elles peuvent subir des infiltrations d'eau en cas de mise en œuvre non correcte. La structure des laines a été caractérisée par des paramètres morphologiques tels que la porosité, la masse volumique et la surface volumique. La connaissance de ces paramètres sera utile par la suite pour étudier la variation de la conductivité thermique avec la structure des laines mais également pour confronter les résultats obtenus avec la littérature. La porosité totale ε est obtenue à partir de la masse volumique apparente de l'échantillon à l'état sec et de la masse volumique de sa matrice solide supposée constituée par du verre de type E. Les masses volumiques apparentes des laines ont été déterminées par l'intermédiaire d'un pied à coulisse d'une précision de 10^{-5} m et d'une balance d'une précision de 0,1 mg. La surface volumique S_V exprime le degré de division (fragmentation) de la phase solide. Elle représente la "finesse" du matériau. Sa valeur est obtenue théoriquement en effectuant le rapport entre la surface développée et l'unité de volume de matière constituant la phase solide. Pour les isolants fibreux, d'après les travaux de Klarsfeld et al. [1], le volume surfacique peut être calculé par la relation suivante : $S_V = 4/\phi$ où ϕ représente le diamètre moyen de la fibre.

Les laines minérales sont issues d'un processus industriel. Il est donc possible de produire des fibres de diamètres parfaitement connus par l'industriel à la différence des laines végétales, qui elles sont issues d'une production agricole produisant des fibres de diamètres variant fortement avec les conditions climatiques lors de leur croissance. Les laines étudiées L1 et L2 sont obtenues en associant des fibres minérales avec un liant. Ces laines sont composées par des fibres d'un diamètre de 14 μm environ. Ce qui constitue une dimension assez importante vis à vis des laines standards. Les masses volumiques et les porosités de L1 et de L2 peuvent être considérées comme moyennes puisque les laines minérales standards ont une masse volumique variant entre 8 et 200 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ et une porosité comprise entre 92,0% et 99,7%. Les laines L1 et L2 ayant des masses volumiques supérieures à 20 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, elles peuvent être classées dans la catégorie des isolants lourds. Les isolants utilisés dans la construction proviennent en général de cette catégorie. Nous avons regroupé dans le tableau 1 les différentes valeurs des caractéristiques structurales des laines L1 et L2.

	Diamètre moyen de la fibre ϕ	Surface volumique S_V	Porosité	Masse volumique
	μm	μm^{-1}	%	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
Laine de verre L1	13	0,31	96,96	0,079
Laine de verre L2	14	0,29	95,42	0,119

Tableau 1 : Caractéristiques structurales des laines L1 et L2.

3. Caractérisation thermique des laines

Nous avons utilisé la méthode TPS qui présente l'avantage, pour des mesures à différents degrés de saturation d'eau, de peu perturber l'état hydrique du matériau du fait, d'une part, de la rapidité de la mesure (inférieure à la minute) et, d'autre part, du faible flux thermique mis en jeu (environ 10 mW).

3.1. Technique de mesure

La sonde de mesure TPS est insérée entre deux échantillons de la même laine. Le protocole classique de mesure peut alors être utilisé [4]. Une centrale d'acquisition (HP34970) permet de suivre, avec un temps d'échantillonnage fixé ici à 0,2 seconde, l'évolution de la tension aux bornes de la sonde TPS soumise à un flux ϕ_0 . Cette mesure de la tension déterminera ensuite la résistance et donc permettra d'accéder à la température de la sonde. Nous avons mis

au point un code de calcul développé sous Matlab© pour déterminer les caractéristiques thermiques (conductivité et diffusivité) à partir de la relation suivante définie initialement par Gustafsson [5] :

$$T(t) = \frac{\varphi_o}{\pi^{3/2} r_o \lambda} D_n(\tau) \quad (1)$$

où r_o est le rayon de la sonde et λ la conductivité thermique du matériau étudié. La variable τ est définie par $\tau = \sqrt{\frac{at}{r_o^2}}$ où a est la diffusivité thermique de l'échantillon et t le temps d'essai. La fonction $D_n(\tau)$ introduit le fait que cette sonde est constituée de n anneaux résistifs concentriques.

En partant des équations générales de chaleur et en prenant en compte la constitution de la sonde ainsi que de diverses hypothèses présentées dans [6], le coefficient $D_n(\tau)$ est défini par :

$$D_n(\tau) = [n(n+1)]^{-2} \int_0^\tau \sigma^{-2} \left[\sum_{l=1}^n l \sum_{k=1}^n k \exp\left(-\frac{l^2 + k^2}{4n^2 \sigma^2}\right) I_0\left(\frac{lk}{2n^2 \sigma^2}\right) \right] d\sigma \quad (2)$$

I_0 est la fonction de Bessel d'ordre zéro. Une procédure d'optimisation permet d'ajuster les températures mesurées avec la température calculée à partir de l'équation (1). Lorsque la somme des écarts quadratiques est inférieure à 10^{-4} °C, le paramètre τ permet de déterminer la diffusivité alors que la conductivité thermique est extraite de la pente de la fonction linéaire définie par la relation (1) reliant la température à la fonction $D_n(\tau)$.

3.2. Caractéristiques à l'état sec des laines L1 et L2 en conditions isothermes

Les laines sont maintenues dans une étuve réglée à la température de 80°C jusqu'à stabilisation de leur masse. On considère alors que les échantillons sont secs. A la sortie de l'étuve, pour éviter une prise d'humidité en contact avec l'ambiance du local d'expérimentation, les laines sont placées dans un emballage étanche.

3.2.1. Validation des essais expérimentaux

Afin de valider notre programme de dépouillement des essais et notre protocole expérimental de mesure, nous avons effectué une série de mesures de caractéristiques thermiques (conductivité, diffusivité et effusivité) sur un échantillon de la laine L2. L'incertitude portant sur notre protocole de mesures a été évaluée à 7%. Les résultats obtenus ainsi que ceux fournis par la société Thermoconcept sont regroupés dans le tableau 2. Thermoconcept commercialise le montage complet comprenant la sonde, le système d'acquisition et un programme de dépouillement des essais.

	Essais au LTI Amiens	Résultats Thermoconcept
Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	$0,0408 \pm 0,0026$	0,0387
Diffusivité thermique ($\text{mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	$0,632 \pm 0,044$	0,635
Chaleur massique ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$)	0,0655 (calculée)	0,061
Effusivité ($\text{J}\cdot\text{s}^{-1/2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$)	$32,3$ (mesurée) $\pm 2,2$	Non fournie

Tableau 2 : Vérification des caractéristiques à l'état sec pour la laine L2.

Nous n'avons pas eu connaissance des incertitudes de mesure de la société Thermoconcept. On constate une bonne cohérence entre les résultats avec la prise en compte des incertitudes. Nous pouvons conclure que notre mesure et le protocole sont viables.

3.2.2. Caractérisation thermique en fonction de la morphologie

Après cette étape de validation, nous avons déterminé les conductivités thermiques à l'état sec des échantillons de laines L1 et L2 et leurs paramètres morphologiques (porosité et masse volumique). Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.

	Laine L1	Laine L2
Porosité totale (%)	96,96	95,42
Masse volumique apparente (g.cm^{-3})	0,079	0,119
Conductivité thermique ($\text{mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	$37,3 \pm 2,6$	$40,8 \pm 2,6$

Tableau 3 : Caractéristiques des laines à l'état sec.

On constate que la conductivité de la laine L1 est plus faible que celle de la laine L2. Une plus grande porosité est souvent associée dans les matériaux de construction à une conductivité thermique plus faible. Cependant, pour les laines minérales et compte tenu de leur très forte porosité, cette relation n'est pas respectée comme on peut le constater sur la figure 1. La porosité de 97% peut être retenue comme charnière dans le comportement de la laine puisque, pour une porosité plus élevée, la conductivité décroît avec la porosité alors que pour une porosité plus faible, on constate une légère croissance de la conductivité. La laine L1 présente justement une porosité de 97%. En insérant nos mesures pour les laines L1 et L2 sur la figure 1, on peut noter que leurs conductivités thermiques sont plus élevées. On peut attribuer cette différence au diamètre moyen des fibres des laines L1 et L2 ($\phi = 14 \mu\text{m}$) plus grand que les laines standards ($\phi = 12 \mu\text{m}$) utilisées par [1] ainsi qu'à l'influence du liant sur la mesure de la conductivité thermique des laines qui n'est pas prise en compte dans cette figure. Enfin, en tenant compte de l'incertitude de nos mesures de conductivité thermique, la différence est nettement moins évidente.

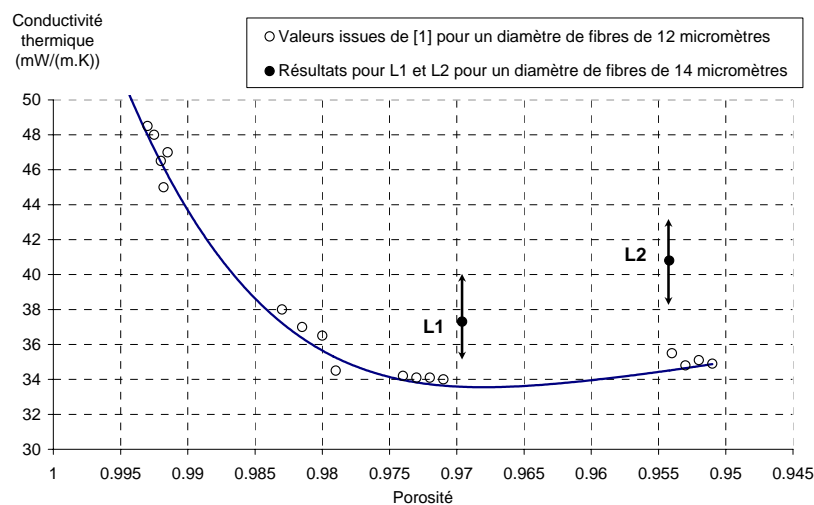


Figure 1 : Conductivité thermique en fonction de la porosité de laines minérales d'après [1].

3.2.3. Caractéristiques à différentes teneurs en eau

Les échantillons L1 et L2 sont maintenus dans une ambiance régulée en humidité par des humidificateurs (modèle YC -D204) jusqu'à stabilisation de la masse. La sonde TPS est alors insérée entre deux échantillons de la même laine et nous avons alors attendu une heure de façon à atteindre un équilibre hygrothermique entre la sonde et les échantillons avant de démarrer une mesure. Nous avons réalisé une série de mesures de la conductivité thermique des échantillons L1 et L2 en fonction de la teneur en eau. Les résultats obtenus sont présentés sur la figure (2). On constate une forte augmentation de la conductivité pour des teneurs en eau massiques comprises entre 0,05 et 0,20 g.g⁻¹ environ. La conductivité a plus que doublé entre ces deux teneurs en eau passant de 37,5 mW.m⁻¹.K⁻¹ à l'état sec à 85,8 mW.m⁻¹.K⁻¹ pour la laine L1 et de 40,8 à 86,6 mW.m⁻¹.K⁻¹ pour la laine L2. Pour des teneurs en eau plus élevées, la conductivité thermique diminue légèrement jusqu'à s'établir à 80 mW.m⁻¹.K⁻¹ environ pour les deux laines à une teneur en eau de 0,70 g.g⁻¹.

Nous avons souhaité comparer nos résultats avec ceux de Langlais [7] qui a utilisé la méthode de la plaque chaude gardée sur des laines minérales standards. Cette méthode présente l'inconvénient de nécessiter un temps de mesure long qui peut créer des gradients hydriques mais elle fait l'objet d'une norme. Nous avons reporté sur la même figure 2 les deux cas (cas 1 et cas 2) étudiés par Langlais. Le cas 1 est obtenu pour une eau vaporisée sur le côté chaud de l'échantillon de laine. La conductivité est déterminée en exploitant les résultats en régime quasi stationnaire. Ce cas 1 ne semble pas réaliste puisqu'il serait représentatif dans la construction d'une situation où une arrivée d'eau serait maintenue sur la face de l'isolant en contact avec l'ambiance intérieure de l'habitation (face chaude de l'isolant). Le cas 2 reproduit la condition où l'eau liquide pénètre par la face froide de la laine. Ce cas semble plus représentatif des conditions réelles thermo-hydriques dans une enveloppe du bâtiment où l'eau rentre par la face de la laine en contact avec l'ambiance extérieure de l'habitation (côté froid de la laine). La conductivité thermique est déterminée alors par l'exploitation du régime stationnaire avec une eau vaporisée sur le côté froid de l'échantillon. Le régime stationnaire dans ce dernier cas est rapidement atteint. On remarque que l'humidité engendre peu de variation de la conductivité qui reste proche de celle obtenue pour un état sec.

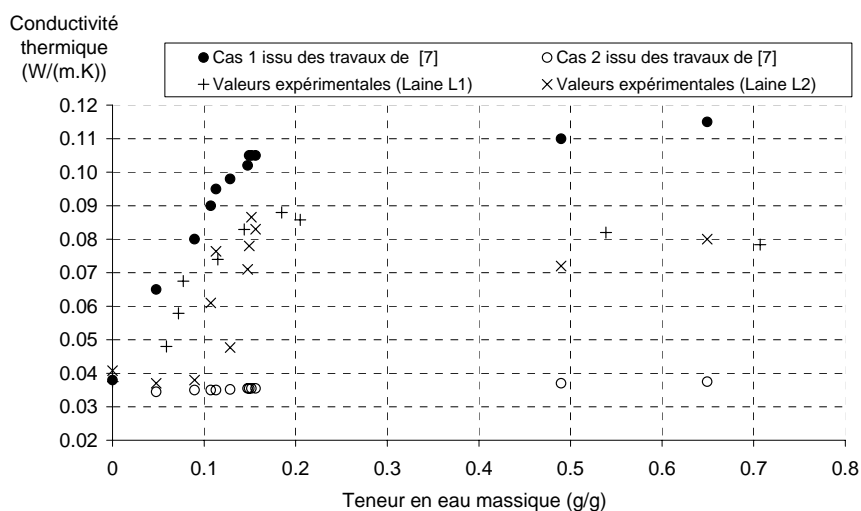


Figure 2 : Conductivité thermique de nos laines minérales L1 et L2 pour différentes teneurs en eau massiques en comparaison avec les cas 1 et 2 étudiées par [7]

Pour chaque teneur en eau massique, on observe que les conductivités pour les laines L1 et L2 se situent entre les valeurs obtenues dans le cas 1 et le cas 2. D'une façon générale, on constate que les profils des conductivités obtenus par [7] avec la méthode de la plaque chaude gardée sont similaires à ceux obtenus par nos mesures. Une forte croissance de la conductivité lorsque la teneur en eau est inférieure à $0,20 \text{ g.g}^{-1}$ puis une légère décroissance. Les travaux de Langlais [7] en appliquant un modèle théorique de prévision ont ainsi montré que cette brusque variation de la conductivité pouvait être reliée à la diffusion de l'eau sous forme vapeur. La méthode TPS semble fournir des résultats cohérents. Il est cependant difficile de conclure sur la validité de nos résultats vis à vis de la littérature puisque nous n'avons aucune information dans la référence bibliographique sur la composition des laines en fibre et en liant ainsi que sur les caractéristiques morphologiques des laines étudiées.

4. Conclusion

Il est reconnu que la conductivité thermique des matériaux poreux est fonction de leur morphologie et de leur teneur en eau mais les résultats expérimentaux sont peu nombreux et parfois contradictoires. Nous avons procédé à cette étude sur deux laines minérales et avons montré que la méthode thermique TPS est adaptée pour ce type de mesure. Les conductivités thermiques des laines L1 et L2 sont comparées aux valeurs obtenues à partir d'autres méthodes sur des laines minérales standard. Les résultats sont cohérents. Nous avons noté qu'à partir d'une teneur en eau de 0.1 g.g^{-1} un doublement de la conductivité thermique est constaté. Il est à présent indispensable de vérifier si la laine peut être soumise à de telle teneur en eau dans l'enveloppe de l'habitat. Dans les bâtiments, les laines vieillissent au cours des années. Les laines prennent une coloration plus sombre et leur structure semble modifiée. Ce vieillissement peut-il être causé par la présence d'humidité au sein des isolants ce qui induirait la définition d'une durée de vie de l'isolant dans la construction ?

Références

- [1] S. Klarsfeld, C. Langlais, Transferts de chaleur à travers les isolants fibreux en relation avec leur morphologie, *Journée d'études du groupement universitaire de thermique, Transfert de chaleur dans les isolants fibreux*, 6 mars 1985.
- [2] F. De Ponte, S. Klarsfeld, Conductivité thermique des isolants. *Techniques de l'Ingénieur*, RC3, (2002) R2930.1-R2930.21.
- [3] L'humidité dans le bâtiment. *Série FNB - Collège international des sciences de la construction. Séminaires Saint - Rémy - lès - Chevreuse*, 23-25 novembre 1982.
- [4] Y. He, Rapid thermal conductivity measurement with a hot disk sensor. Part 1: Theoretical considerations. *Thermochimica Acta*, 436, 1-2 (2005), 122-129.
- [5] S. E. Gustafsson, Transient plane source techniques for thermal diffusivity measurements of solid materials, *Review Scientific Instruments*, 62, 3, (1991) 777-804.
- [6] L. Marmoret, T. Langlet, M. Queneudec, Introduction à l'impédance thermique équivalente transitoire dans la détermination de l'effusivité de matériaux, *Société Française de Thermique, Editions Société Française de Thermique*, tome 2, pp. 613-618, Presqu'île de Giens, 25-28 Mai 2004, ISBN : 2-905267-40-2.
- [7] C. Langlais, Transferts de chaleur à travers les isolants fibreux en présence d'humidité, *Journée d'études du groupement universitaire de thermique, Transfert de chaleur dans les isolants fibreux*, 6 mars 1985.

Remerciements à la société Thermoconcept pour les mesures de caractérisation thermique par la méthode Transient Plane Source sur la laine L2