

TRANSFERT DE CHALEUR PAR CONDUCTION ET RAYONNEMENT DANS LES MATERIAUX SEMI-TRANSPARENTS

J. F. Durastanti, B. Martin, C. Kneip et A. Jeanmaire

Institut Supérieur de l'Automobile et des Transports, 19 rue de l'Oratoire, Nevers, France

(Reçu le 4 Mai 1994, la forme révisée le 6 Octobre 1994)

Abstract

We show here an adaptation of the classical Flash Method permitting the measure of the thermal conductivity of semi-transparent porous materials. A flash lamp sends a heat pulse on the upper face of a cylindrical sample and lower face temperature is analysed.

The semi-transparent material is sandwiched between two copper slices. The sample used scatters thermal radiation, and absorbs it very little. It is therefore possible to account for two parts of heat transfer through the material: a pure conductive phenomenon and a radiative one. In most insulating materials radiative transfer represents about 1/3 of the total heat flux at the ambient temperature. The problem is solved with electrical analogy, quadripoles technique and Laplace transform.

The modelization brings out two physical character parameters of the material and a coefficient qualifying the thermal exchange between the sample and the environment during the experiment.

Keywords: conductivity, semi-transparent materials

Introduction

Le principe de la méthode Flash repose sur l'analyse en régime transitoire de la température de la face arrière d'un échantillon cylindrique, initialement en équilibre thermique, soumis à une sollicitation thermique sur sa face avant. (voir figure 1).

La sollicitation est réalisée par un Flash – d'où le nom de la méthode – dont la durée est de l'ordre de la milliseconde, il est modélisé par un Dirac.

L'échantillon est cylindrique de 25 mm de diamètre et d'épaisseur variant de 2 et 20 mm.

L'application du flash sur les mousses semi-transparentes les fait fondre ce qui nous a conduits à enserrer les cylindres de matériau isolant entre deux rondelles de cuivre de même diamètre que ces cylindres et de quelques dixièmes

de millimètre d'épaisseur. Le cuivre a été choisi pour sa très grande conductibilité thermique: ce qui induit une uniformisation de la température sur les faces supérieure et inférieure de l'échantillon et pour sa conductivité électrique.

Les faces internes des rondelles en contact avec le matériau à étudier sont soit soigneusement polies, soit noircies à la peinture noire mate, pour que l'émissivité de ces surfaces soit proche ou de zéro, ou de l'unité, selon le type d'expérience que l'on souhaite réaliser.

Les contacts entre rondelles et cylindre sont réalisés indifféremment avec de la colle "Cyanolit" ou de la graisse à vide, les deux méthodes conduisant à des résultats strictement identiques.

L'échantillon ainsi constitué est maintenu par trois vis coniques, pour éviter au maximum les pertes thermiques par contact. L'ensemble est placé dans une enceinte en PVC afin de minimiser le transfert de chaleur avec l'environnement (la convection est minimisée car l'air est calme).

Les matériaux isolants les plus couramment utilisés dans l'isolation de l'habitat sont des mousses de polyuréthane, des polystyrènes ou des fibres de verre ou de roches dont la conductivité varie entre $0.025 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ et $0.050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Ces performances thermiques sont rendues possibles par l'optimisation du transfert thermique dans ce type de matériaux. Il faut alors quantifier la part du transfert par conduction pure et par rayonnement, afin d'affiner la structure de l'isolant et de minimiser le transfert par rayonnement. Nous associons à la méthode Flash, l'analogie électrique et le modèle de Parker [1, 2] pour analyser le transfert dans l'échantillon. La modélisation nous donne la fonction de transfert de l'échantillon qui est inversée en utilisant une méthode numérique [3].

Modélisation du transfert par conduction: méthode flash classique sans rayonnement: modèle appelé modèle de l'ailette

Quadripôle d'un "mur homogène"

On peut établir une analogie entre une différence de potentiel et une température, et entre une intensité électrique et une densité surfacique de flux de chaleur. De cette façon, un mur thermique homogène et isotrope de caractéristiques λ , α , d'épaisseur e , peut être assimilé à une simple fonction de transfert entre les transformées de Laplace des températures et densités de flux entrant (θ_o et φ_o) et sortant (θ_e et φ_e) du mur. Ainsi un mur peut être convenablement identifié par

le quadripôle $\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$ suivant l'équation :

$$\theta_o = A \cdot \theta_e + B \cdot \varphi_e$$

$$\varphi_o = C \cdot \theta_e + D \cdot \varphi_e$$

$$\begin{bmatrix} \theta_o \\ \varphi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{bmatrix}$$

où $A = \text{ch}(\chi)$; $B = \frac{e}{\lambda S} \text{sh}(\chi)$; $C = \frac{\lambda S}{e} \chi \text{sh}(\chi)$; $D = A$

avec

$$\chi = \sqrt{\frac{pe^2}{a}}$$

où p désigne la variable de Laplace. On montre facilement que: $A^2 - BC = 0$.

Modélisation d'un échantillon sandwich

L'isolant (de caractéristique ρ, c, e) est enserré entre deux disques métalliques de très bonne conductivité (figure 1) (de caractéristiques ρ_1, c_1, e_1)

Le quadripôle d'un disque métallique est une simple capacité dans l'analogie

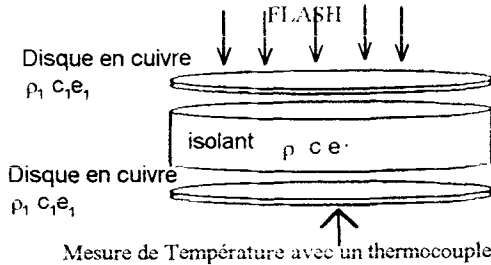


Fig. 1 Echantillon sandwich

électrique, de la même façon on montre que les pertes sur les faces supérieures et inférieures de l'échantillon peuvent être identifiées à une résistance en parallèle sur le quadripôle (A, B, C, D) du cylindre isolant [4].

On montre facilement que les pertes radiales qui apparaissent dans l'échantillon peuvent être prises en compte par un simple remplacement de la variable

$p \frac{\rho c}{\lambda}$ par $p \frac{\rho c}{\lambda} + \frac{2h}{\lambda r}$. On obtient [4]

$$\Theta_e^*(p^*) = \frac{1}{\kappa \cdot \text{sh}(\kappa) + 2\text{ch}(\kappa)(p^* + H^*) + \frac{\text{sh}(\kappa)}{\kappa}(p^* + H^*)^2}$$

avec $\kappa = \sqrt{p^* C^* + \frac{2H^*}{R^*}}$ ——— Modèle de l'ailette

Le quadripôle de l'échantillon sandwich ainsi que les pertes de chaleur sont représentées sur la figure 2.

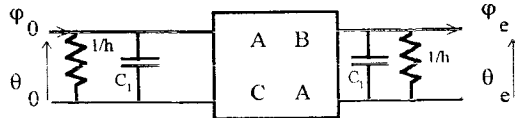


Fig. 2 Quadripôle de l'échantillon sandwich avec pertes

Les courbes résultant du modèle de l'ailette, pour différentes valeurs du coefficient d'échange réduit H^* , sont représentées sur la figure 3.

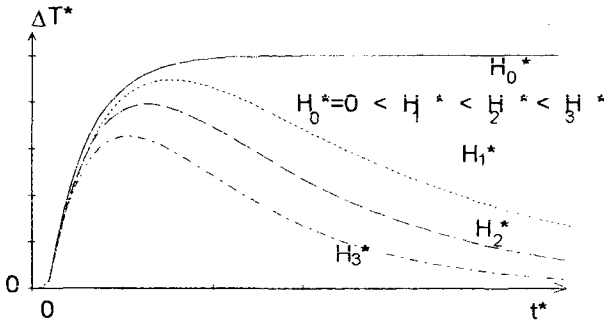


Fig. 3 Allure des thermogrammes des courbes thermoanalytiques pour le model ailette pour plusieurs coefficients d'échange

Lorsque H^* est non nul, les courbes thermoanalytiques admettent évidemment un maximum. Remarquons qu'au voisinage de l'instant initial $\partial T^*/\partial t^* = 0$. Ceci est confirmé par l'expérience quand on minimise le transfert par rayonnement en polissant les faces métalliques en regard de l'échantillon sandwich.

Modélisation du transfert par conduction et rayonnement

Nous avons modélisé un matériau à travers lequel ont lieu des transferts de chaleur conductif phonique et radiatif découplés [5, 6]. Les deux phénomènes étant supposés indépendants l'un de l'autre, un tel matériau est représenté en notation quadripolaire par la mise en parallèle d'un quadripôle conductif et d'un quadripôle radiatif.

Intéressons-nous au transfert de chaleur uniquement radiatif φ à travers l'échantillon semi-transparent selon la figure 4.

Nous avons modélisé le transfert par rayonnement dans ces matériaux semi-transparentes en utilisant l'analogie électrique.

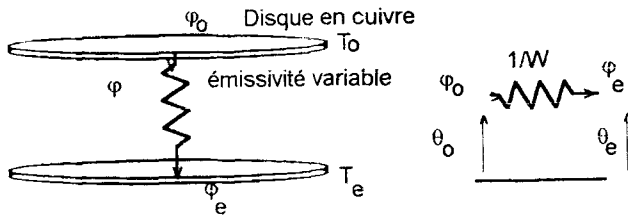


Fig. 4 Transfert par rayonnement dans l'échantillon

Vis-à-vis du rayonnement le matériau se comporte comme résistance pure. Appelons $1/W$ cette résistance, en linéarisant les expressions du rayonnement, on obtient avec les notations de la figure 4:

$$\varphi_o = \varphi_e = \varphi$$

$$\theta_e = \theta_o - \frac{1}{W}\varphi$$

Ce qui donne sous forme quadripolaire [5,6]:

$$\begin{bmatrix} \theta_o \\ \varphi_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/W \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_e \\ \varphi_e \end{bmatrix}$$

Il est possible de transformer l'association du quadripôle de rayonnement et du quadripôle de l'échantillon et des pertes mis en parallèles par un quadripôle équivalent. Le quadripôle résultant nous donne le modèle appelé "modèle ailette W ".

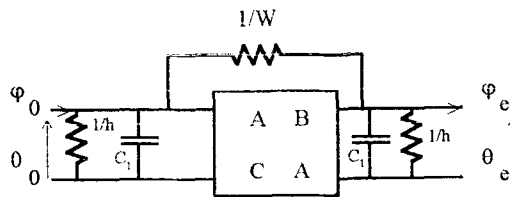


Fig. 5 Quadripôle de l'échantillon sandwich avec pertes et transfert par rayonnement

Le modèle ailette W est représenté sous forme quadripolaire sur la figure 5. La fonction de transfert $\theta_e^*(p^*)$ a pour valeur [5]:

$$\theta_e^*(p^*) = \frac{[2\alpha + W^*(e^\alpha - e^{-\alpha})]e^{-\alpha}}{[(\alpha + p^* + H^* + W^*) - W^*e^{-\alpha}]^2 - [(\alpha - p^* - H^* - W^*)e^{-\alpha} + W^*]^2}$$

$$\text{avec } \alpha = \sqrt{p^* C^* + \frac{2H^*}{R^*}} \quad \text{et} \quad p^* = p\rho_1 c_1 e_1 \frac{e}{\lambda}$$

La simulation numérique et les expériences donnent des courbes du type de la figure 6.

Remarquons que lorsque le paramètre W^* est non nul, la tangente au temps initial n'est plus horizontale comme c'était le cas avec le modèle ailette précédent. Les courbes thermoanalytiques expérimentaux réalisés avec de la mousse de polyéthylène enserrée entre deux rondelles de cuivre noircies sur leur surface en contact avec l'isolant vérifient bien cette particularité.

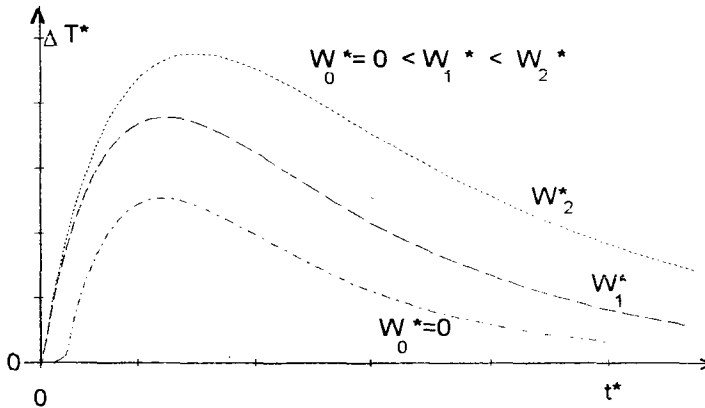


Fig. 6 Allure des courbes thermoanalytiques dans le cas du modèle ailette W

Résultats

Nous avons effectué des mesures sur des mousses de polyéthylène qui est un matériau peu absorbant. On peut alors raisonnablement considérer que le transfert par rayonnement est découplé du transfert par conduction phonique. Des mesures effectuées par ailleurs en utilisant un Laser CO_2 nous ont permis de vérifier cette hypothèse. Nous avons montré que pour ce type de mousses de polyéthylène le coefficient d'absorption est très faible, on peut alors considérer que le matériau est essentiellement diffusant [7, 8].

Les mesures effectuées en polissant les faces métalliques intérieures donnent une conductivité globale allant jusqu'à $50 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ traduisant l'effet d'épaisseur des matériaux semi-transparents (figure 7). Les mesures effectuées en noircissant les faces métalliques en regard dans l'échantillon permettent de quantifier la part du transfert par conduction pure, on mesure des valeurs de l'ordre de $30 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (figure 8).

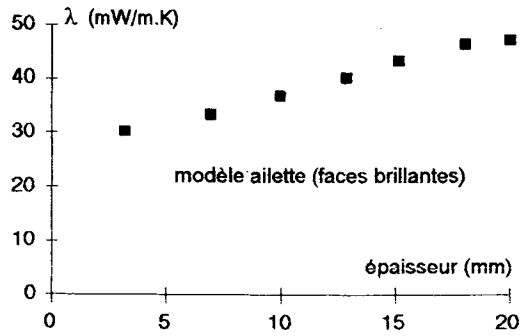


Fig. 7 Conductivité globale d'un polyéthylène

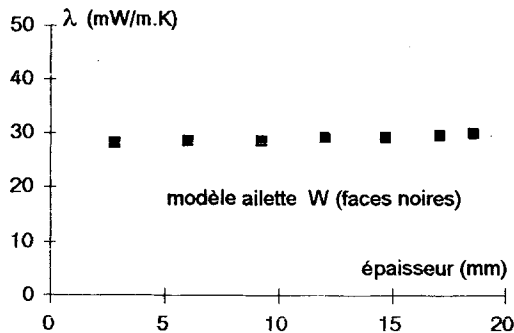


Fig. 8 Conductivité phonique d'un polyéthylène

La différence entre ces deux types de mesures montre qu'à partir d'une vingtaine de millimètres, le transfert par rayonnement, qui correspond à la différence des 2 courbes, avoisine 30% du transfert global.

Conclusion

Les deux types de modèles présentés permettent d'analyser :

- soit le transfert de chaleur dans des matériaux semi-transparents en isolant le transfert radiatif, c'est le modèle ailette W,
- soit le transfert global c'est le modèle ailette.

Le procédé de mesure est très simple (il suffit de carotter un cylindre de l'isolant et de l'insérer entre deux disques de cuivre) et nécessite un temps de mesure et de dépouillement de quelques minutes.

Ces deux modèles ont été validés sur des mousses de polyéthylène et ont donné des résultats satisfaisants.

Nomenclature

T	température /K
φ	Transformée de Laplace du flux de chaleur
p	variable complexe / s^{-1}
r	rayon de l'échantillon / m
$a = \lambda/\rho c$	diffusivité thermique / $m^2 \cdot s^{-1}$
c	chaleur massique / $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
W	Conductance radiative / $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
θ	Transformée de Laplace de la température
t	temps /s
$C = \rho c e S$	capacité thermique / $J \cdot K^{-1}$
λ	conductivité thermique / $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
ρ	masse volumique / $kg \cdot m^{-3}$
h	coefficient d'échange avec l'ambient / $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$R = \frac{e}{\lambda S}$	résistance thermique / $K \cdot W^{-1}$
o, e	indice des variables de face d'entrée et de sortie
*	variable adimensionnelle:

$$p^* = p \frac{e}{\lambda} \rho_1 c_1 e_1 \quad \text{ou bien} \quad p^* = p \frac{e^2}{a} \quad R^* = \frac{r}{e} \quad H^* = \frac{he}{\lambda} \quad W^* = \frac{We}{\lambda} \quad C^* = \frac{\rho c e}{\rho_1 c_1 e_1}$$

Références

- 1 W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler et G. L. Abbot, *J. Appl. Phys.*, 32 (1961)
- 2 W. J. Parker et R. J. Jenkins, *Advanced Energy Conversion*, 2 (1962)
- 3 H. Stefest, Algorithm 368, Numerical Inversion of Laplace Transforms, 13 (1970) 47-49-624.
- 4 B. Martin, Etude de l'anisotropie des super-isolants, Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Avril 1988.
- 5 A. Jeanmaire, B. Martin, D. Billerey et A. Degiovanni, Transfert thermique dans les milieux semi-transparents. Application aux milieux diffusants peu absorbants, Thèse de docteur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Janvier 1993.
- 6 A. Jeanmaire, B. Martin, D. Billerey et A. Degiovanni, A new method for measure of thermal conductivity of semi-transparent insulating foams, 2nd International Conference Advanced on Computation Methods in Heat Transfert, Milan 9-10 Juillet 1992.
- 7 B. Martin, Transfert radiatif dans les matériaux poreux, Mesures automatisées, Thèse de docteur d'ingénieur de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Février 1986.
- 8 R. Dadou, Etude du transfert radiatif dans les matériaux poreux à l'aide d'un laser CO₂, Thèse de docteur de 3ème cycle de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Mai 1984.

Zusammenfassung — Vorliegend wird eine Anwendung der klassischen Flashmethode gezeigt, was die Messung der thermischen Leitfähigkeit von halbdurchlässigen porösen Substanzen ermöglicht. Eine Flash-Lampe sendet einen Wärmeimpuls auf die obere Fläche einer zylindrischen Probe und die Temperatur der unteren Fläche wird analysiert.

Das halbdurchlässige Material wird zwischen zwei Kupferscheiben eingefaßt. Die Wärmestrahlung wird von der verwendeten Probe gestreut und in geringem Maße absorbiert. Es ist deshalb möglich, zwei Teile von Wärmetransport innerhalb des Materiales zu erklären: eine rein konduktive Erscheinung und eine radiative. In den meisten Isolationsmaterialien stellt der radiative Transport etwa 1/3 des gesamten Wärmeflusses bei Umgebungstemperatur dar. Dieses Problem wird nach elektrischer Analogie mittels Vierpoltechnik und Laplace-Transformation gelöst.

Das Modell liefert zwei physikalische Parameter des Materiales und einen Koeffizient, welcher den Wärmeaustausch zwischen Probe und Umgebung während des Experimentes näher beschreibt.