

Mesure des diffusivités thermiques de matériaux par thermographie infrarouge

Jacky Bresson, Pascal Rathier, Martine Grisenti

IUT de Perpignan, département G.I.M.

Ch. de la Passio Vella, BP 79905 - 66962 PERPIGNAN Cédex 9

E.mail : bresson@univ-perp.fr

Sections de rattachement : 60

Secteur : Secondaire

***Résumé :** A partir de travaux développés à l'ONERA, nous avons mesuré les diffusivités thermiques dans le plan de divers matériaux minces en utilisant une caméra thermique. Cette technique simple, consiste, après avoir interposé un masque de forme particulière (grille) entre le matériau et une lampe flash, à enregistrer l'évolution des thermogrammes de la face opposée. Ainsi, les zones localement chauffées, vont diffuser vers les zones froides. De l'évolution temporelle du profil des températures suivant cette direction, est déduite la diffusivité thermique du matériau à partir du rapport des transformées de Fourier spatiales d'ordre 0 et 1 de la température. Outre le fait que tous les pixels des thermogrammes participent efficacement à l'identification de la diffusivité, cette méthode présente l'avantage de s'affranchir des pertes thermiques.*

***Mots clés :** Thermographie infrarouge pulsée, méthode flash, diffusivité thermique, traitement d'images thermiques, évaluation non destructive.*

1. Introduction

L'aptitude que possèdent les matériaux à propager la chaleur ou diffusivité thermique est une caractéristique importante qu'il convient de connaître dans des problèmes d'isolation ou de dissipation thermique. Dans des travaux précédents (Bresson *et al.* 2006), nous présentions une technique de détection de défauts par méthode flash avec évaluation de la diffusivité des matériaux. Le présent travail met en œuvre une méthode simple et néanmoins plus précise de la mesure de la diffusivité dans le plan ou dans une des directions principales du plan d'une plaque mince de matériau. Cette méthode nécessite l'application d'un chauffage non uniforme, la diffusion de la chaleur dans le matériau est mise en évidence par thermographie infrarouge.

2. Approche théorique

De nombreux auteurs (Welch *et al.* 1987, Hadisaroyo *et al.* 1992, Philippi *et al.* 1995, Degiovanni *et al.* 1996, Batsale *et al.* 1996) se sont penchés sur ce problème en proposant un dispositif générant une impulsion de chauffage, de profil temporel défini ou quelconque, uniforme dans une des directions du plan et mesurent l'évolution du profil de température dans l'autre direction. La diffusivité est déduite du rapport pour deux instants particuliers de la transformée de Fourier de la température. D'autres (Cernuschi *et al.* 1998) utilisent un chauffage impulsionnel ponctuel et mesurent le temps que met la température, à une distance radiale donnée, pour atteindre son maximum. L'utilisation d'autres distributions spatiales de chauffage, par exemple un masque en forme de coin, est possible (Ouyang *et al.* 1998). De l'évolution du profil de température perpendiculairement aux frontières du masque peuvent être déduites les diffusivités du matériau dans le plan.

Une technique développée à l'ONERA par J. C. Krapez 1999, nous a paru intéressante. Ce dernier propose d'interposer un masque en forme de grille entre l'impulsion de chauffage et le matériau. Les zones soumises au flux thermique vont diffuser vers les zones d'ombre (fig.1). Ainsi, le profil spatial (perpendiculaire à la grille) de température sur la face opposée, de carré en début de chauffage devient sinusoïdal pour terminer « plat » en fin de diffusion thermique.

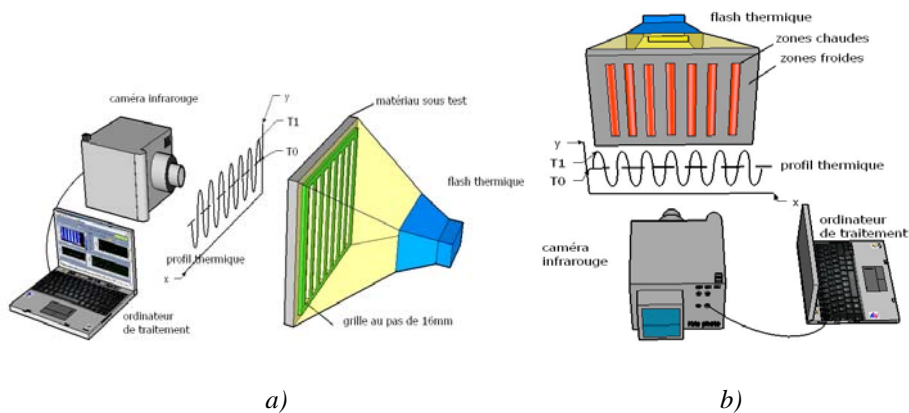


Figure 1. Schéma de principe, (a) de profil et (b) de face, de la mesure de la diffusivité dans une direction du plan (cas avec pertes thermiques).

On établit, suivant ce profil, la relation entre les transformées de Fourier d'ordre (0) correspondant à la valeur moyenne T_0 et d'ordre (ω_x) correspondant à la valeur maximale T_1 du profil spatial de température :

$$T_e(\omega_x, 0, t) = T_e(0, 0, t) \frac{Q_X(\omega_x)}{Q_X(0)} \exp(-a_X \omega_x^2 t) \quad [1]$$

avec : a_x : diffusivité thermique suivant x

$\omega_x = \frac{2\pi}{\Delta x} = 2\pi f_x$: pulsation spatiale où Δx est le pas de la grille et f_x sa fréquence spatiale

$Q_X(0), Q_X(\omega_X)$: transformées respectives d'ordre 0 et 1 de l'énergie

$T_e(0,0,t)$: température moyenne T0 (ordre 0) du profil spatial

$T_e(\omega_X,0,t)$: température maximale T1 (ordre1) du profil spatial

La diffusivité a_x est déduite de la pente de la courbe obtenue en traçant le logarithme népérien du rapport des températures T1 et T0 en fonction du temps :

$$\text{Ln} \left[\frac{T1(t)}{T0(t)} \right] = \text{Ln} \left[\frac{Q1}{Q0} \right] - a_x \omega_x^2 t \quad [2]$$

Le rapport des températures n'est pas influencé par les pertes thermiques et la convection qui interviennent à la fois sur T0 et T1. Ceci rend la détermination de la diffusivité insensible aux conditions extérieures. D'autre part, il est possible de moyenner plusieurs profils thermiques (suivant y), ce qui permet de faire contribuer la presque totalité de la surface active du matériau.

3. Dispositif expérimental

L'énergie de l'impulsion est apportée par une lampe halogène de 500W (fig.2). La durée de l'impulsion thermique est réglée à 1s. La grille, de pas $\Delta x = 16\text{mm}$, est interposée (face arrière) entre le matériau et la lampe flash. Le pas de la grille doit être au moins 4 à 5 fois plus grand que l'épaisseur de la plaque afin de bien observer une diffusion thermique surfacique.

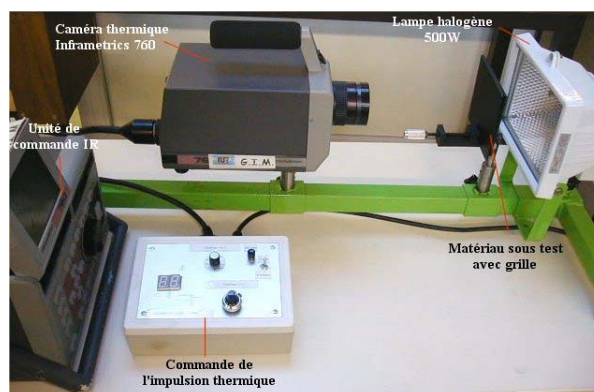


Figure 2. Dispositif expérimental

Le caméra infrarouge (Inframetrics 760, 3-12 μ m) associée à son unité de commande enregistre à la vitesse de 25 images/s le phénomène thermographique de la diffusion de la chaleur sur la face avant du matériau. Ce film thermographique est ensuite décomposé en une suite d'images thermiques ou thermogrammes. Le traitement de chaque thermogramme est assuré par une application LABVIEW développée au département G.I.M. de l'IUT de Perpignan (fig. 3).

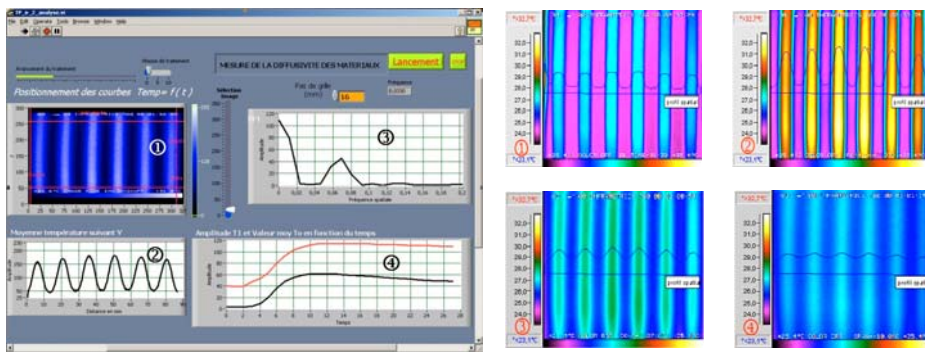


Figure 3. Application de traitement LABVIEW et séquence d'images à 5,11,36 et 51s après le flash pour une plaque mince de PVC de 1mm.

Pour chaque thermogramme, ce traitement consiste à :

- moyenner l'image thermique suivant la direction y. On aura au préalable « détourer » l'image afin de s'affranchir des effets de bord ①. Ce traitement restitue le profil thermique ② suivant x pour le temps t, équivalent au moyennage des différents profils thermiques suivant y.
- calculer, à partir de ce profil thermique, par transformée de Fourier ③, la température moyenne T_0 et l'amplitude de la composante fondamentale à la fréquence spatiale de la grille ($f_x = 1/\Delta x$) correspondant à T_1 .
- tracer l'évolution des températures T_0 et T_1 en fonction du nombre d'images ④, c'est-à-dire en fonction du temps.
- tracer l'évolution temporelle du logarithme népérien du rapport T_1/T_0 (fig. 4 à 9).
- déterminer la diffusivité thermique a_x du matériau à partir de la pente de la courbe précédente (pente = $-a_x \omega_x^2$).
- Dans le cas de matériaux ne présentant pas les mêmes caractéristiques thermiques dans toutes les directions du plan (bois), il convient de refaire l'expérience après avoir fait pivoter le matériau par rapport à la grille.

4. Exploitation des résultats

Le cas de divers matériaux présentant des diffusivités différentes est envisagé (fig. 4 à 9). Les échantillons se présentent sous la forme de plaques minces (10x10cm) d'épaisseurs différentes (Tab 1). Une couche de peinture noir mate assure une émissivité élevée voisine de 1.

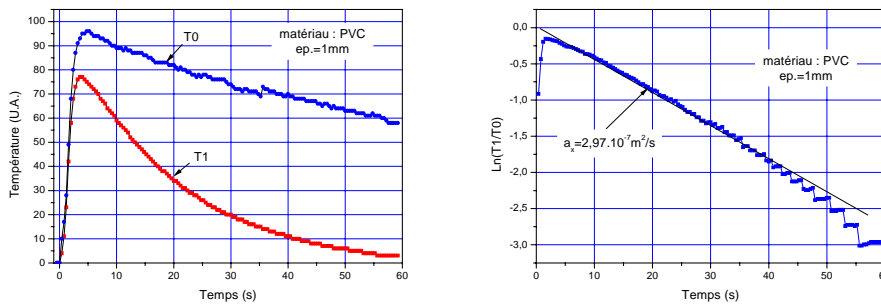


Figure 4. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour le PVC.

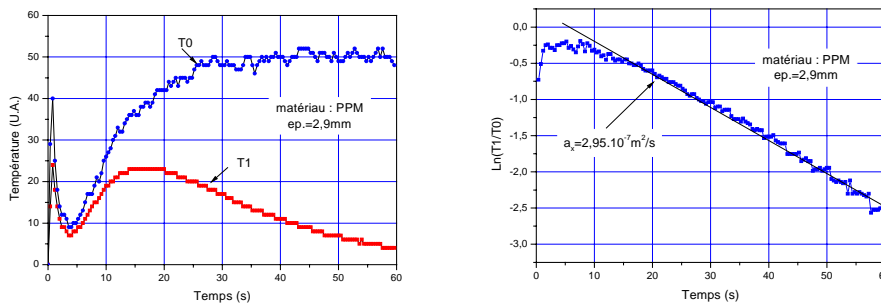


Figure 5. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour le PPM.

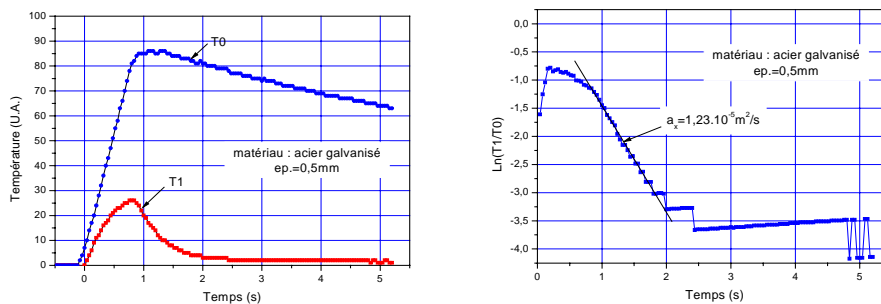


Figure 6. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour l'acier galvanisé.

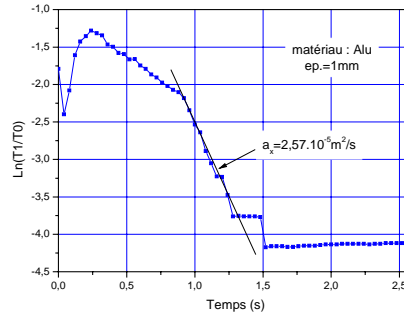
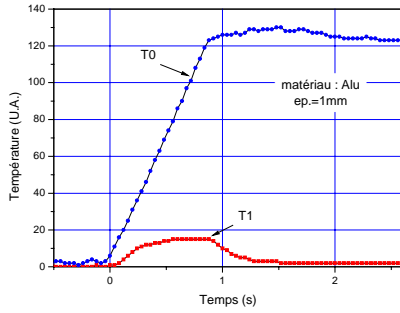


Figure 7. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour l'aluminium.

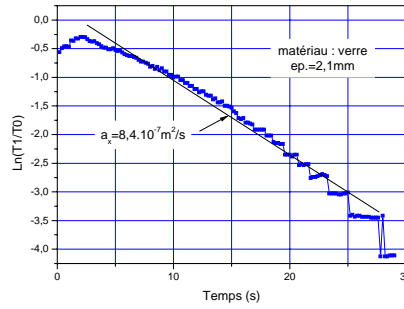
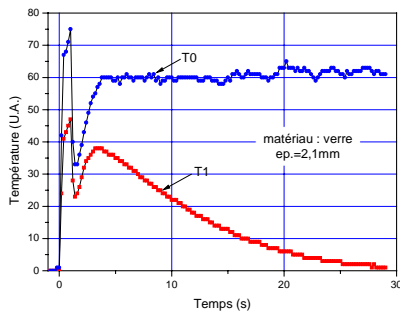


Figure 8. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour le verre.

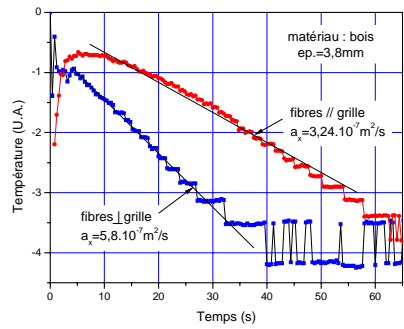
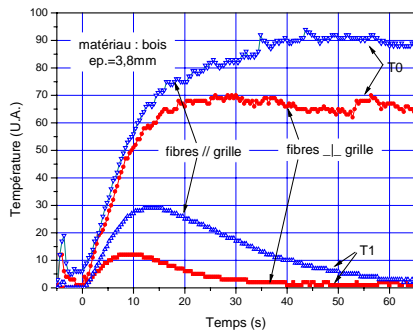


Figure 9. Evolution temporelle de T_0 , T_1 et $\ln(T_1/T_0)$ pour le bois avec fibres // et _ à la grille.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau ci-dessous.

	Aluminium	Acier galvanisé	Verre	Bois fibres // grille	Bois fibres ⊥ grille	PPM	PVC
Épaisseur de plaque (mm)	1	0,5	2,1	3,8	3,8	2,9	1
Diffusivité suivant x a_x (m ² /s)	$2,57 \cdot 10^{-5}$	$1,23 \cdot 10^{-5}$	$8,4 \cdot 10^{-7}$	$3,24 \cdot 10^{-7}$	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$2,95 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-7}$
Diffusivité suivant z a_z (m ² /s)	impossible	impossible	$4,1 \cdot 10^{-7}$	$3,1 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-7}$	$1,3 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$

Tableau 1. Diffusivité dans le plan et en épaisseur des divers matériaux.

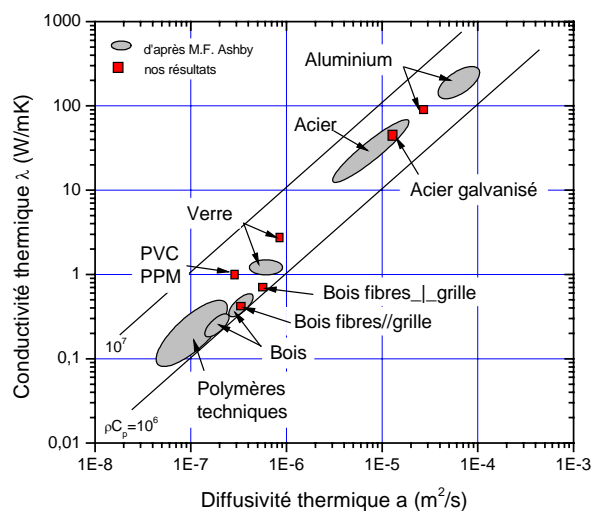
Concernant la diffusivité thermique dans le plan, on notera des résultats assez cohérents avec ceux proposés par l'abaque de Michael F. Ashby (fig. 10), compte tenu de l'impossibilité de connaître parfaitement les constituants des matériaux testés. Bien évidemment, dans le cas du bois la diffusivité dans le sens des fibres (fibres ⊥ grille) est plus élevée que perpendiculairement aux fibres (fibres // grille).

En prenant les temps partiels $t_{1/3}$, $t_{1/2}$, $t_{2/3}$, et $t_{5/6}$ du temps de montée de T0, on accède à la valeur de la diffusivité thermique perpendiculaire à la plaque a_z de chaque matériau, en moyennant les résultats des 3 relations suivantes (Degiovanni *et al.* 1986) :

$$a_z = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[1,15 - 1,25 \frac{t_{2/3}}{t_{5/6}} \right] \quad a_z = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[0,761 - 0,926 \frac{t_{1/2}}{t_{5/6}} \right] \quad a_z = \frac{e^2}{t_{5/6}} \left[0,617 - 0,9626 \frac{t_{1/3}}{t_{5/6}} \right] \quad [3]$$

Cette méthode des temps partiels prend en compte les pertes thermiques, mais n'est précise que dans le cas d'une durée de flash petite devant le temps de montée (cas du PVC, PPM, bois et verre).

Figure 10. Diffusivité thermique dans le plan des matériaux testés (comparatif).



5. Conclusion

L'application d'une distribution spatiale de chauffage particulière de type grille, associée à l'utilisation d'une caméra de thermographie infrarouge, nous a permis de déterminer la diffusivité dans le plan de diverses plaques de matériaux. De mise en œuvre simple, cette méthode fait intervenir le rapport des transformées de Fourier d'ordre 0 et 1 présentant ainsi l'avantage de s'affranchir des pertes thermiques et de la convection. De plus, la quasi totalité de la plaque participant à la détermination de la diffusivité, les résultats obtenus sont plus représentatifs.

Bibliographie

Batsale J. C., Mourand D., Gobbe C., *Estimation of thermophysical properties of thin plates with averaging techniques and two temperature model*, 14th Eur. Conf. Thermophys. Prop., Lyon, 16-19 Sept. 1996.

Bresson J., Rathier P., Grisenti M., *Evaluation non destructive par thermographie infrarouge pulsée* - 12ème Colloque National de la Recherche en IUT, pp 8, Brest, 1-2 juin 2006.

Cernuschi F., Fabbri L., Lamperti M., *A new thermographic methodology for on-site thermal diffusivity determination*, 10th Int. Conf. on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, Rome (Italy), Aug. 23-27, 1998.

Degiovanni A., Laurent M., *Une nouvelle technique d'identification de la diffusivité thermique pour la méthode flash*, Rev. Phys. Appl., 21, 1986, pp. 229-237.

Degiovanni A., Batsale J. C., Maillet D., *Mesure de la diffusivité longitudinale de matériaux anisotropes. Panorama des techniques développées au LEMTA*, Rev. Gén. Therm., 35, 1996, pp. 141-147.

Hadisaroyo D., Batsale J. C., Degiovanni A., *Un appareillage simple pour la mesure de la diffusivité thermique de plaques minces*, J. Phys. III, France, 2, 1992, pp. 111-128.

Krapez J.-C., *Diffusivity measurement by using a grid-like mask*, Journée de la Soc. Fr. des Thermiciens : Thermographie quantitative, 31 mars 1999, Châtillon.

Krapez J.C., *Métrologie thermique : des matériaux jusqu'aux structures*, Journées techniques GAMI-CETIM Senlis (France), 22-23 Juin 1999, pp.1-24.

Ouyang Z., Zhang F., Wang L., Favro L. D., Thomas R. L., *Novel measurement of anisotropic thermal diffusivity*, Rev. Progress in Quant. Nondestr. Eval., vol. 17, eds. Thompson D. O., Chimenti D. E., Plenum Press, N. Y., 1998, pp. 453-456.

Philippi I., Batsale J. C., Maillet D., Degiovanni A., *Measurement of thermal diffusivities through processing of infrared images*, Rev. Sci. Instrum., 66(1), 1995, pp. 182-191.

Welch C. S., Heath D. M., Winfree W. P., *Remote measurement of in-plane diffusivity components in plates*, J. Appl. Phys., 61(3), 1987, pp. 895-898.