

Approche expérimentale de la mesure de diffusivité thermique de peintures murales par thermographie infrarouge stimulée

J.C. Candoré*, J.L Bodnar*, V. Detalle**, P. Grossel* et B. Remy***

* GRESPI / ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02

** LRMH, 29 avenue du Paris, 77420 Champs sur Marne

*** LEMTA, 2 avenue de la forêt de Haye, Nancy

(Auteur correspondant : jl.bodnar@univ-reims.fr)

Résumé:

L'objet du travail que nous présentons ici, est d'approcher de manière expérimentale, les possibilités de la radiométrie photothermique face avant en matière de mesure in situ et dans le plan de diffusivité thermique de peinture murale. Nous présentons d'abord le principe de la méthode de mesure. Nous présentons ensuite le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'étude. Nous montrons enfin, à l'aide de l'étude expérimentale d'un échantillon de plâtre recouvert d'une couche de peinture noire, que la méthode photothermique permet dans un cas particulier, une bonne approximation du paramètre diffusivité thermique.

Nomenclature

C : Capacité calorifique, J/Kg K	t : Temps, s
e : Epaisseur, m	x : Coordonnée spatiale, m
f : Forme spatiale du flash	y : Coordonnée spatiale, m
F : Transformée de Laplace du flash	z : Coordonnée spatiale, m
h : Coefficient d'échange par convection, W/m ² K	α : Fréquence spatiale, m ⁻¹
L _x : Largeur, m	β : Fréquence spatiale, m ⁻¹
L _y : Longueur, m	δ : Fonction delta de Dirac
m : Harmonique spatial	λ : Conductivité thermique, W/m K
n : Harmonique spatial	ρ : Masse volumique, kg/m ³
p : Variable de Laplace, s ⁻¹	θ : Transformée de Laplace de la température
T : Température, K	Θ : Transformée de Laplace Fourier de la température
T _{ext} : Température extérieure, K	

1. Introduction

Dans le cadre de l'aide à la restauration de peintures murales, notre laboratoire travaille depuis une dizaine d'années à la détection de décollements et de poches d'air situés dans des peintures murales. La radiométrie photothermique face avant, nous a déjà permis de détecter, in situ, des déplacements situés dans le Saint Christophe de la collection Campana du Louvre, dans les murs peints de l'église Saint Florentin de Bonnet, dans les plafonds peints de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe (classée au patrimoine mondial de l'UNESCO) et enfin dans les fresques Cocteau de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer [1-6].

Ces études qualitatives étant positives, elles nous poussent maintenant à étudier les possibilités de la méthode photothermique en matière de caractérisation des défauts. A terme l'objectif est de déterminer à la fois l'étendue surfacique du défaut mais aussi la profondeur à laquelle il se situe. Pour cela nous envisageons de procéder par un ajustement théorie /

expérience avec l'utilisation de méthodes de techniques inverses du type Levenberg Marquardt [7].

Pour alimenter le modèle évoqué précédemment, il faut connaître les propriétés thermophysiques des matériaux étudiés. Deux solutions s'offraient à nous : Soit faire appel à des valeurs bibliographiques, soit développer une méthode de mesure de diffusivité utilisable in situ. Pour des raisons de vie propre des matériaux (vieillesse, présence d'humidité, procédés de fabrication, ...), c'est la seconde solution que nous avons choisi de mettre en œuvre.

Pour aboutir à ces mesures de diffusivité, nous avons là encore deux solutions : Soit prélever un échantillon d'œuvre d'art et mettre en œuvre une méthode classique de mesure de ce paramètre thermophysique (méthode flash [8-10]), soit développer une méthode utilisable in situ et non destructive pour la peinture murale étudiée. Pour des raisons de bonne conservation des œuvres d'art, c'est cette dernière option que nous avons choisi de mettre en œuvre. L'épaisseur du couple enduit – mur composant la peinture murale étant souvent de plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur, une mesure de diffusivité thermique transverse est souvent impossible. Nous avons donc choisi de développer une méthode de mesure dans le plan, de diffusivité thermique de l'œuvre d'art. C'est cette méthode que nous présentons ici.

Nous présentons d'abord le principe de la méthode de mesure, basée sur l'utilisation couplée de transformations intégrales et de méthode quadripolaire [11].

Nous présentons ensuite le dispositif expérimental développé pour l'étude.

Nous montrons enfin, que la méthode donne accès à une bonne estimation de la diffusivité d'un échantillon de plâtre recouvert d'une couche de peinture noire.

2. Principe de la mesure in situ et dans le plan de diffusivité thermique

Le principe général de la mesure in situ et dans le plan de diffusivité thermique par radiométrie photothermique face avant est le suivant : Un échantillon anisotrope est soumis sur sa face avant à une excitation temporellement proche d'une fonction delta de Dirac $\delta(t)$ et de forme quelconque spatialement $f(x,y)$. On mesure ensuite le champ de température face avant à l'aide d'une camera de thermographie infrarouge. A partir de l'évolution temporelle de ce champ de température, nous remontons, à l'aide d'un post-traitement mathématique aux valeurs de diffusivité thermique du matériau selon ses directions d'anisotropie. Examinons en détails ce post-traitement mathématique sur lequel est basée cette technique de mesure.

Soient, λ_x , λ_y et λ_z les conductivités thermiques de l'échantillon étudié. Ces conductivités thermiques seront supposées constantes dans le temps et en fonction de la température (hypothèses d'analyses courtes et de faibles variations de températures). Soient ρ et c_p la masse volumique et la capacité calorifique de ce même échantillon. Soient a_x , a_y et a_z les diffusivités thermiques de l'échantillon étudié. Soient h_0 et h_e les coefficients d'échange des faces avant et arrière de l'échantillon. Soit e , l'épaisseur du matériau. Cette épaisseur est supposée très faible devant les dimensions latérales de l'échantillon, ce qui permet de négliger les pertes convecto-radiatives latérales de l'échantillon. L'échantillon est initialement en équilibre thermique avec son environnement. La traduction mathématique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant :

$$\lambda_x(\partial^2 T / \partial x^2) + \lambda_y(\partial^2 T / \partial y^2) + \lambda_z(\partial^2 T / \partial z^2) = \rho c(\partial T / \partial t)$$

$$\begin{aligned}
\text{En } z = 0 & \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=0} = h_0 (T(z=0) - T_{ext}) - f(x, y) \delta(t) \\
\text{En } z = e & \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=e} = -h_e (T(z=e) - T_{ext}) \\
\text{En } x = 0 \text{ et } x = L_x, & \quad \partial T / \partial x = 0 \\
\text{En } y = 0 \text{ et } y = L_y, & \quad \partial T / \partial y = 0 \\
\text{A } t = 0, & \quad T = T_{ext}
\end{aligned} \tag{1}$$

Pour résoudre ce système différentiel, nous avons choisi de mettre en œuvre une transformation intégrale, c'est-à-dire une transformation de Laplace en temps associée à une transformation de Fourier en coordonnées d'espace x et y :

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z, p) = \int_{t=0}^{\infty} \int_{y=0}^{L_y} \int_{x=0}^{L_x} T(x, y, z, t) \cos(\alpha_n x) \cos(\beta_m y) \exp(-pt) dx dy dt \tag{2}$$

Avec : $\alpha_n = n\pi/L_x$ et $\beta_m = m\pi/L_y$.

En appliquant cette transformation intégrale au système différentiel précédent, l'équation différentielle à résoudre dans l'espace transformée ne dépend plus que de z et peut donc être résolue aisément par la méthode des quadripôles thermiques [6]. On obtient alors :

$$\Theta(\alpha_n, \beta_m, z=0, p) = \frac{F(\alpha_n, \beta_m) (ch(\gamma_{n,m} e) + h_e sh(\gamma_{n,m} e) / (\lambda_z \gamma_{n,m}))}{\lambda_z \gamma_{n,m} sh(\gamma_{n,m} e) + (h_0 + h_e) ch(\gamma_{n,m} e) + h_0 h_e sh(\gamma_{n,m} e) / (\lambda_z \gamma_{n,m})} \tag{3}$$

Avec :

$$\gamma_{n,m} = \sqrt{p/a_z + (\lambda_x / \lambda_z) \alpha_n^2 + (\lambda_y / \lambda_z) \beta_m^2}$$

$F(\alpha_n, \beta_m)$, la transformée de Laplace Fourier du flux excitateur $f(x, y) \delta(t)$.

En prenant maintenant la transformée inverse de Laplace de la température on obtient :

$$Ln\left(\frac{\theta(\alpha_n, \beta_m, z=0, t)}{\theta(0,0, z=0, t)}\right) = Ln\left(\frac{F(\alpha_n, \beta_m)}{F(0,0)}\right) - (a_x \alpha_n^2 t + a_y \beta_m^2 t) \tag{4}$$

On remarque alors que les diffusivités a_x et a_y peuvent être déduites simplement de la pente de la courbe représentant le rapport du logarithme des coefficients de Fourier tracée par rapport au temps.

3. Le système expérimental mis en œuvre lors de notre étude

Le dispositif expérimental que nous avons mis en œuvre pour notre étude est dérivé du Système d'Analyse des Matériaux Minces par InfraRouges (SAMMIR) du laboratoire. La source d'excitation est une diode laser émettant à 810 nm associée à une optique de collimation et focalisation. L'optique d'acquisition infrarouge est constituée d'une caméra

« ondes longues » à bolomètres, travaillant en mode macro (pour obtenir une résolution spatiale suffisante). Cette dernière est placée perpendiculairement à l'échantillon, à une distance d'environ 5 cm. Le faisceau lumineux issu de la diode laser est, du fait de l'encombrement de la camera, envoyé de façon incliné sur l'échantillon à analyser. Sa forme est de ce fait légèrement elliptique. La diode laser est pilotée en courant de façon à lui faire émettre une puissance de 2 W pendant une durée de 20 ms. La fréquence d'acquisition de la camera thermographie infrarouge est de 50 Hz.

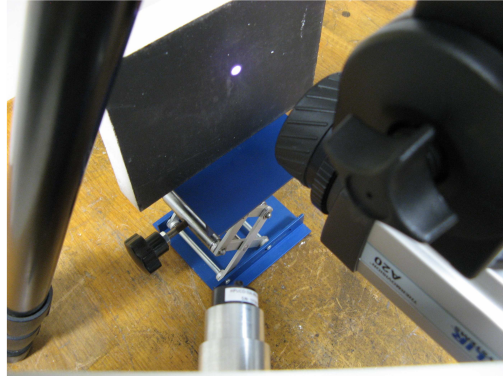


Figure 1 : le dispositif expérimental mis en œuvre

4. L'échantillon analysé

L'échantillon que nous avons analysé dans cette étude est un bloc de plâtre de 12 cm * 15cm de côté et de 2,2 cm d'épaisseur. Il est recouvert d'une fine couche de peinture noire du côté analysé, afin de simuler la présence d'une couche picturale. Afin de déterminer avec précision sa diffusivité thermique, nous l'avons d'abord étudié au diffusivimètre flash du LEMTA de Nancy (hypothèse d'isotropie des diffusivité thermique) Pour cela, nous l'avons usiné de façon à réduire son épaisseur à 6,05 mm. Trois modes classiques de dépouillement ont été mis en œuvre, la méthode des temps partiels, la méthode des moments temporels et un ajustement théorie/expérience. Les valeurs de diffusivité thermiques obtenues sont : $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à l'aide de la méthode des temps partiels, $3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, à l'aide de la méthode des moments temporels et $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à l'aide d'un ajustement théorie / expérience (figure 2).

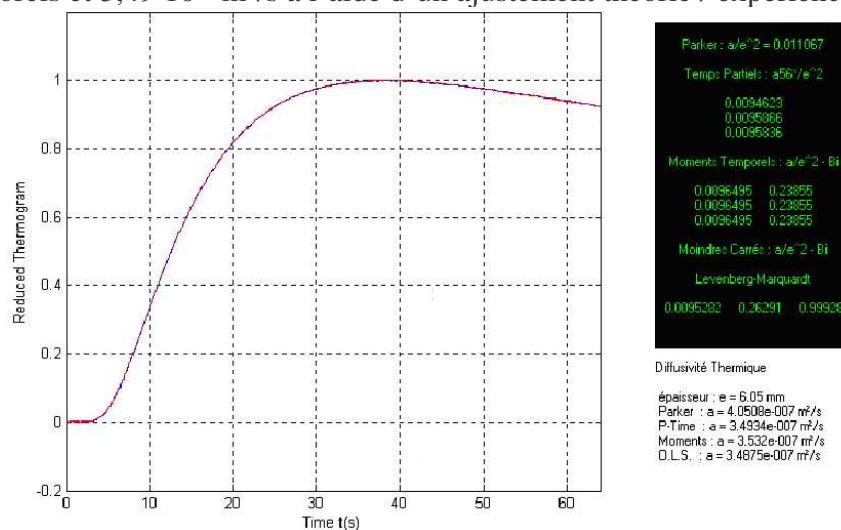


Figure 2 : Mesure de la diffusivité thermique de l'échantillon analysé par les méthodes classiques de dépouillement (méthode des temps partiels méthode des moments temporels et ajustement théorie/expérience).

5. Les résultats expérimentaux obtenus

Sur la figure 3, nous présentons d'abord quatre images infrarouges représentatives de l'évolution temporelle de la signature thermique de la tache laser. On remarque bien que cette dernière devient plus étendue et moins intense au fur et à mesure que le temps passe.

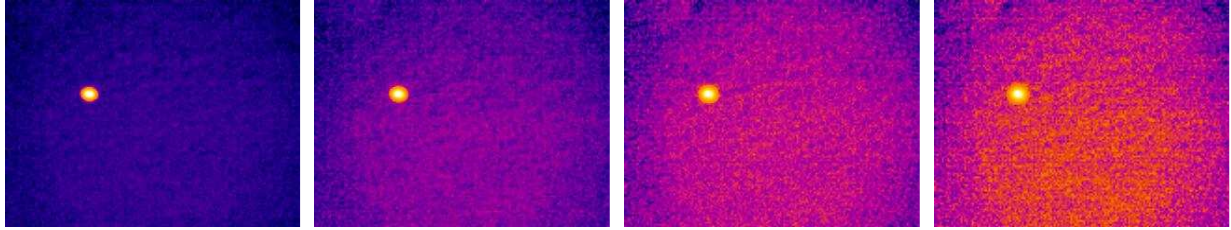


Figure 3 : Evolution de la signature infrarouge de l'échauffement laser avec le temps

Sur la figure 4, nous présentons ensuite l'évolution temporelle du rapport des logarithmes des coefficients de Fourier, calculés à l'ordre 2. Elle fait apparaître, comme le prévoyait la théorie, une droite de pente négative. Elle est égale, dans le cas présent à -2.6 s^{-1} .

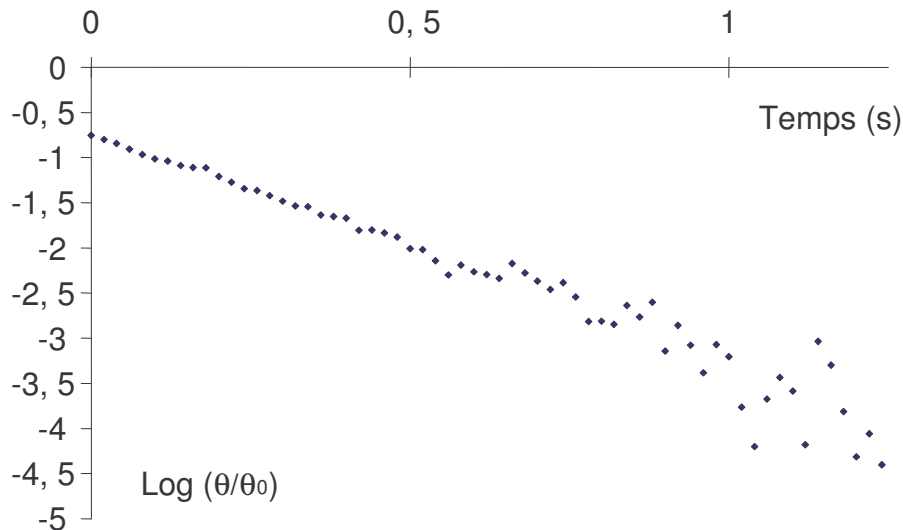


Figure 4 : Evolution du rapport des logarithmes des coefficients de Fourier, calculés à l'ordre 2, calculés pour chaque image infrarouge en fonction du temps.

Enfin, pour aboutir, à une mesure dans le plan, de la diffusivité thermique, nous avons étalonné spatialement notre dispositif expérimental. Pour cela, nous avons placé une cale étalon en surface de l'objet étudié et déduit, de l'image infrarouge obtenue, une dimension spatiale du pixel égale à $116 \mu\text{m}$. La formule 4, nous a alors permis de déterminer la valeur de la diffusivité thermique de l'échantillon de plâtre analysé. Nous trouvons une valeur moyenne égale à $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur est très proche de celles obtenues classiquement avec la méthode flash ($3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ à l'aide de la méthode des temps partiels, $3,53 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, à l'aide de la méthode des moments temporels et $3,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$), ce qui semble montrer les possibilités de la méthode en matière de mesure in situ, de ce paramètre thermophysique.

6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons essayé d'approcher de manière expérimentale, les possibilités de la radiométrie photothermique en matière de mesure dans le plan et in situ de diffusivité thermique de peinture murale.

Nous avons d'abord présenté le principe de la méthode de mesure.

Nous avons ensuite présenté le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'étude.

Nous avons ensuite montré, à l'aide de l'étude expérimentale d'un échantillon de plâtre recouvert d'une couche de peinture noire, que la méthode photothermique permet dans un cas particulier, une bonne approximation du paramètre diffusivité thermique.

Ce résultat expérimental, obtenu sur un échantillon particulier, est encourageant puisque semblant ouvrir la voie à la caractérisation photothermique in situ d'œuvres d'art. Il demande maintenant à être généralisé.

Des études allant dans ce sens sont en cours.

References

- [1] Jean Charles Candoré, Gabriela Szatanik, J.L Bodnar, Vincent Detalle, Philippe Grossel : Infra-red photothermal thermography: A tool of assistance for the restoration of murals paintings? Actes du congrès QIRT2006, Padoue, Italie
- [2] Gabriela Szatanik – Panaït, Mathieu Gerard et Jean-Luc Bodnar : La thermographie infrarouge stimulée pour l'examen des enduits dans les peintures murales : Application au Saint Christophe portant l'enfant Jésus, Journal Core, n°17, décembre 2006, pp 64 – 70
- [3] Jean Charles Candoré, J.L Bodnar, Vincent Detalle, Philippe Grossel : Non destructive testing of works of art by stimulated infrared thermography, proceeding de qirt 2008, 2-3 juillet 2008, Cracovie, Pologne (puis Septembre 2009, e-journal of non-destructive testing, pp 9, id 7973).
- [4] J.C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grossel: Non destructive testing of mural paintings, in situ, by infrared photothermal radiometry, Proceeding de SMW08, 27-29 octobre 2008, Florence, Italie
- [5] Jean Charles Candoré, J.L Bodnar, Françoise Depasse, Vincent Detalle, Philippe Grossel : Approach of the characterization of delamination in mural paintings, proceeding de qirt 2008, 2-3 juillet 2008, Cracovie, Pologne (puis septembre 2009, e-journal of non-destructive testing, pp 9, id 7972) .
- [6] J.C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle and P. Grossel : Non destructive testing in situ, of works of art by stimulated infra-red thermography, Proceeding of 15th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena , Leuven, 19-23 July 2009 (puis Journal of physics conferences series, sous presse)
- [7] J.V. Beck, K.J. Arnold, Parameters Estimation in Engineering and Science, Wiley, 1977
- [8] W Parker, Flash method of determining thermal diffusivity, J Appl. Phys, 32, (9), 1961, 1679-1684
- [9] A. Degiovanni. Techniques de l'ingénieur, r 2850.
- [10] B.Remy, A.Degiovanni and D.Maillet 2005 Measurement of the In-Plane Thermal Diffusivity of Materials by Infrared Thermography, International Journal of Thermophysics - Vol.26, n° 2
- [11] D. Maillet, S. André, J.C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, Thermal quadrupoles. Solving the heat equation through integral transforms, Wiley (2000)