

Caractérisation de défaut situé dans une fresque par thermographie infrarouge stimulée

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

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

** Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 avenue du Paris, 77420 Champs sur Marne

Résumé

L'objectif de ce travail vise à approcher les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de caractérisation dimensionnelle de défauts situés dans des peintures murales. Dans ce but, nous proposons de procéder en deux étapes. Tout d'abord, nous effectuons, *in situ*, une mesure de diffusivité thermique longitudinale, par analyse photothermique ponctuelle. Ensuite, nous procédons à la caractérisation de la profondeur à laquelle se situe le défaut étudié, à l'aide d'une analyse photothermique étendue et d'une confrontation théorie / expérience. Dans cet article, nous présentons ces deux techniques de mesures et montrons que l'approche permet une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe une inclusion de plastazote dans une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre.

Nomenclature

a : Diffusivité thermique, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	T_{ext} : Température extérieure, K
c : Capacité calorifique, $\text{J Kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	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, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$	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, $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
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

1. Introduction

Les décollements et les poches d'air à l'intérieur des enduits sont des altérations très fréquentes dans les peintures murales *in situ*. Ils sont d'autant plus dangereux qu'ils sont invisibles à la surface et peuvent provoquer la chute de pans entiers de composition, suivant leur superficie, leur abondance et le degré de dé-cohésion avec le mur. La technique traditionnelle utilisée par le restaurateur pour détecter les décollements est le sondage acoustique. Il consiste à parcourir la surface de l'enduit en la tapotant légèrement avec les doigts. Pour évaluer la force des vibrations induites, le restaurateur se sert de l'ouïe et du toucher : pendant qu'il tapote la surface d'une main, l'autre main reste plaquée contre l'enduit pour déterminer l'ampleur et la distance de propagation des vibrations. Cette méthode ne demande aucun équipement particulier et reste simple à mettre en œuvre. Cependant la qualité du diagnostic dépend « des capacités de perception et de l'expérience du restaurateur, qui seules lui permettent d'apprécier et d'interpréter les sons rendus par l'enduit ». Cette méthode reste toujours subjective et limitée dans les informations qu'elle fournit. La profondeur de la poche, son épaisseur ou encore l'état de cohésion du mortier, pas vraiment accessibles par analyse acoustique, sont autant d'informations utiles qui permettraient au restaurateur non seulement de mieux évaluer la fragilité réelle de la peinture, mais aussi de mettre en œuvre des moyens plus adaptés pour la consolidation. Par ailleurs, le sondage acoustique nécessite un contact physique énergique et prolongé avec la surface qui peut être dangereux si la peinture est pulvérulente ou fragilisée par des soulèvements. L'enduit, lui-même, s'il est très fin, peut s'effondrer facilement si l'action manque de délicatesse. Enfin, il faut noter également que, dans les cas de décorations murales très étendues, couvrant souvent l'ensemble des murs d'un

édifice, l'examen acoustique s'avère très laborieux et très lent à mettre en œuvre [1]. La thermographie infrarouge stimulée a déjà été mise en œuvre pour détecter et caractériser des défauts (délaminages, fissures, inclusions, ...) dans différents types de matériaux. Elle nous a alors semblé pouvoir être d'un emploi possible dans le domaine de la restauration d'œuvres d'art et ce de façon complémentaire à l'analyse acoustique. En effet, la méthode infrarouge est rapide, sans contact, objective et permet l'analyse de surfaces étendues [2-3]. Dans le travail que nous présentons ici, ce sont donc les aptitudes de cette méthode en matière d'aide à la restauration du patrimoine que nous étudions. Dans ce cadre, nous nous sommes focalisés sur les possibilités de la méthode à fournir des informations sur la profondeur à laquelle se situe un défaut de type déplacement. Pour aboutir à cette mesure de profondeur, nous proposons de mettre en œuvre une analyse photothermique pulsée flash associée à un ajustement théorie / expérience. Pour alimenter le modèle théorique d'ajustement, il est nécessaire de connaître la diffusivité thermique réelle de l'œuvre d'art étudiée. Dans notre cas, nous avons choisi de mettre en œuvre une méthode de mesure *in situ* de la composante longitudinale de ce paramètre thermophysique [4]. Le protocole de mesure de la profondeur recherchée, retenu procède donc en deux étapes. Il consiste d'abord, à procéder à une mesure locale et *in situ* du paramètre diffusivité thermique. Il consiste ensuite en la détermination de la profondeur recherchée par analyse photothermique flash associée à un ajustement théorie / expérience. Ce sont les principes de ces deux techniques de mesures et les résultats expérimentaux obtenus que nous présentons maintenant. Nous présentons d'abord le principe de mesure *in situ* de diffusivité longitudinale retenue pour l'étude. Nous présentons ensuite, l'étude et les mesures de diffusivité obtenues lors de l'analyse d'une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Nous présentons dans une troisième étape, le modèle thermique conduisant à la mesure de la profondeur du défaut, retenu pour l'étude. Nous montrons enfin, que la méthode permet une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe une inclusion de plastazote dans la peinture murale étudiée.

2. Principe de la technique de mesure *in situ* de diffusivité thermique longitudinale retenue pour l'étude

Le principe général de la technique de mesure *in situ* de diffusivité thermique longitudinale par thermographie photothermique face avant, retenue pour l'étude, 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 spatiale $f(x,y)$ quelconque. On mesure ensuite le champ de température face avant à l'aide d'une caméra 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 sont 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_c 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. Enfin, l'échantillon est considéré initialement en équilibre thermique avec son environnement (figure 1).

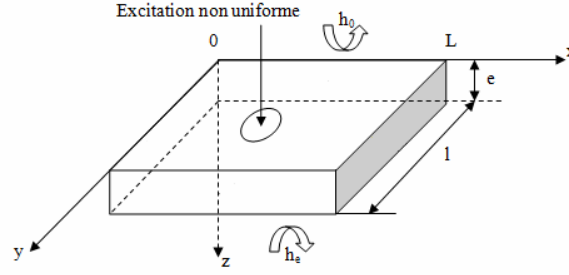


Figure 1 : Les conditions aux limites retenues pour l'étude

La traduction mathématique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant :

$$\begin{aligned}
 & \lambda_x (\partial^2 T / \partial x^2) + \lambda_y (\partial^2 T / \partial y^2) + \lambda_z (\partial^2 T / \partial z^2) = \rho c (\partial T / \partial t) \\
 \text{En } z = 0 & \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=0} = h_0 (T(z=0) - T_{ext}) - f(x, y) \delta(t) \\
 \text{En } z = e & \quad \lambda_z (\partial T / \partial z)_{z=e} = -h_e (T(z=e) - T_{ext}) \\
 \text{En } x = 0 \text{ et } x = L_x, & \quad \partial T / \partial x = 0 \\
 \text{En } y = 0 \text{ et } y = L_y, & \quad \partial T / \partial y = 0 \\
 \text{A } t = 0, & \quad T = T_{ext}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Pour résoudre ce système différentiel, nous avons choisi de mettre en œuvre trois transformations intégrales ; une transformation de Laplace en temps associée à une transformation de Fourier en cosinus 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 :

- $\alpha_n = n\pi / L_x$
- $\beta_m = m\pi / L_y$

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 [5]. 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 $f(x, y) \cdot \delta(t)$.

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 longitudinales 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.

$$a = (\text{pente de la courbe} * \text{dimension de la zone analysée}^2) / (\text{ordre de Fourier}^2 * \pi^2) \tag{5}$$

3. Mesure de la diffusivité thermique du mélange chaux/plâtre constituant la réplique partielle du Saint Christophe étudiée

L'échantillon que nous avons étudié dans cette étude est une fresque académique, réplique partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Cette peinture murale a été fabriquée par Gabriela Szatanik, restauratrice professionnelle. Elle est réalisée dans un mélange de chaux et de plâtre recouvert de la couche picturale, le tout déposé sur un substrat en plâtre. Afin de pouvoir tester les possibilités de la méthode photothermique en matière de caractérisation dimensionnelle de défauts, Gabriela Szatanik a inclus, lors de la réalisation, 5 blocs de plastazote situés à des profondeurs différentes (figure 2)



Figure 2 : la fresque étudiée et la position des inclusions de plastazote

Comme nous l'avons mentionné précédemment, nous avons, dans un premier temps, cherché à mesurer la diffusivité thermique du mélange chaux/plâtre constituant cette fresque. Nous avons procédé comme décrit précédemment. Nous avons d'abord éclairé l'œuvre d'art à l'aide d'un flash laser. Nous avons ensuite observé la réponse photothermique à l'aide d'une caméra de thermographie infrarouge équipée d'un objectif macro. Les réglages expérimentaux sont : Une puissance laser de 2 watts délivrée pendant 20 ms, une fréquence d'analyse infrarouge de 50 Hz, un ordre d'analyse de 2 et enfin une analyse au niveau de l'œil gauche (zone saine) de l'enfant Jésus. Sur la figure 3, nous présentons d'abord quatre images thermographiques 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 s'écoule.

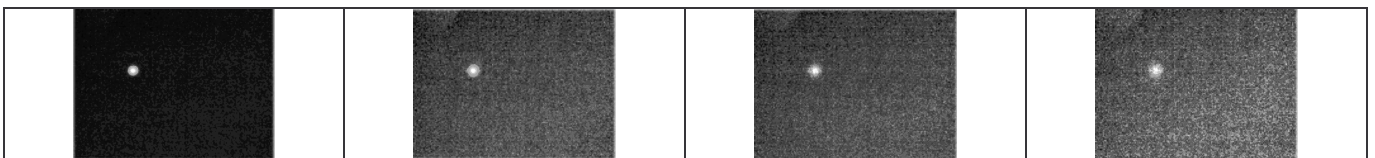


Figure 3 : Evolution de la signature infrarouge de l'échauffement laser avec le temps

Sur la figure 4, nous présentons ensuite l'évolution temporelle du rapport des logarithmes des coefficients de Fourier, calculés à l'ordre 2, à partir d'une transformée de Fourier spatiale en cosinus des images thermographiques. 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} .

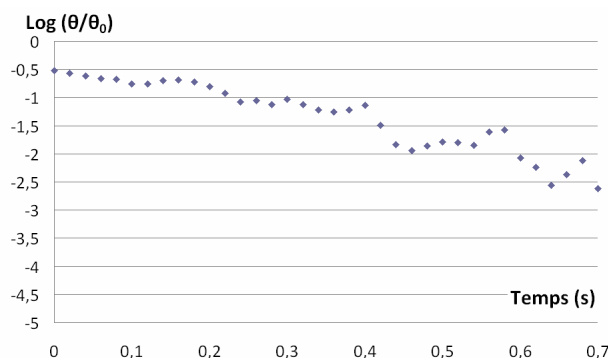


Figure 4 : Estimation de la diffusivité thermique, œil gauche

Enfin, pour aboutir, à une mesure de diffusivité longitudinale, 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 147µm. La formule 5, nous a alors permis de déterminer la valeur longitudinale de la diffusivité thermique de l'échantillon de plâtre analysé. Nous trouvons alors, une valeur moyenne égale à $5,13.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. C'est donc cette valeur, supposée homogène, que nous prendrons en compte dans la suite de notre étude pour aboutir à la caractérisation dimensionnelle du défaut.

4. Le modèle thermique développé pour aboutir à la mesure de la profondeur du défaut

Comme nous l'avons indiqué en introduction, nous souhaitons dans une seconde étape, tirer la profondeur recherchée à partir d'une analyse photothermique pulsée étendue de l'œuvre d'art analysée associée à un ajustement théorie / expérience. En toute rigueur l'étude d'une inclusion située dans un matériau devrait conduire à la mise en place d'un modèle tri couche, la couche intermédiaire représentant le défaut. Toutefois dans le cas d'un déplacement situé dans une peinture murale, l'épaisseur de ce défaut interne peut être de plusieurs millimètres d'air. Cela constitue, d'un point de vue thermique une barrière thermique relativement importante. L'essentiel des phénomènes thermiques mis en œuvre au cours de l'analyse photothermique se cantonnent par conséquent dans la couche de matériau situé entre la face avant et le défaut. Comme ce choix a aussi, pour avantage sa simplicité de mise en œuvre, c'est donc à une simulation monocouche de l'expérience photothermique étendue que nous avons fait appel pour aboutir à la caractérisation de l'inclusion étudiée. Le modèle mis en place pour l'étude, considère alors, un échantillon monodimensionnel, homogène et isotrope, soumis à des pertes convecto- radiatives sur ses faces avant et arrière est éclairé sur toute sa surface, par un Dirac de flux. La méthode de résolution de l'équation de la chaleur mise en œuvre est la méthode des quadripôles thermiques. Cette dernière conduit classiquement à la transformée de Laplace de la température en face avant, donnée par l'équation suivante :

$$\theta_0(p) = \frac{Q \left(\text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + hS \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}} \text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + 2hS \text{Cosh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right) + (hS)^2 \frac{\text{Sinh} \left(e \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{\lambda S \sqrt{\frac{p}{a}}}} \quad (6)$$

Enfin, pour retourner dans l'espace temporel, nous avons utilisé la méthode d'inversion numérique de Stefest.

5. Mesure de la profondeur à laquelle se situe le défaut D de la fresque étudiée

Afin d'approcher les possibilités de la méthode photothermique en matière de caractérisation dimensionnelle de défaut, nous avons cherché à mesurer la profondeur à laquelle se situe le défaut D (figure 2) présent dans la copie partielle du Saint Christophe. Cette inclusion de plastazote est située par construction à une profondeur d'environ 3 mm. Nous avons d'abord analysé, à l'aide du système SAMMTHIR [3], cette fresque par analyse photothermique pulsée étendue. Les conditions expérimentales retenues sont une durée d'éclairage de 10 secondes et une puissance excitatrice mise en œuvre de 2*500 watts. A partir du film thermographique obtenu, nous avons ensuite extrait, à l'aplomb du défaut, un profil temporel de température. Nous avons alors procédé à un ajustement théorie/expérience, de ce profil en prenant en compte une diffusivité thermique de $5,13.10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$, c'est-à-dire la valeur mesurée précédemment. Un exemple d'ajustement théorie / expérience est présenté sur la Figure 5. Il montre que c'est pour une profondeur estimée de 2,91 mm que les

courbes théoriques et expérimentales sont les plus proches. Cette valeur est très proche de la valeur de référence de 3 mm, ce qui montre la faisabilité de la méthode.

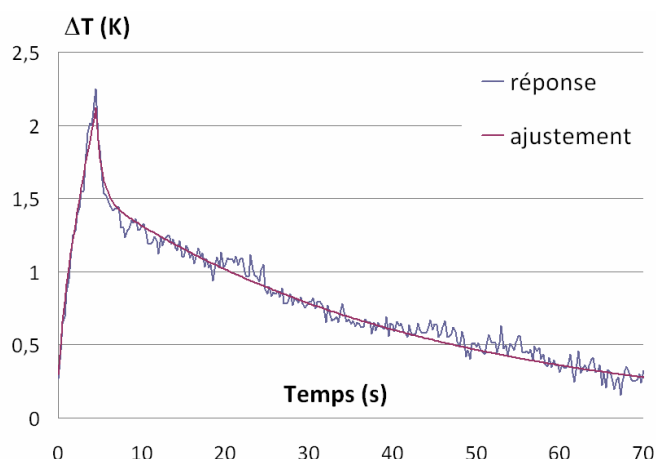


Figure 5 : Ajustement théorie expérience

6. Conclusion

Dans ce travail, nous avons approché les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de mesure de profondeur de défaut situé dans des œuvres d'art. Nous avons d'abord présenté la méthodologie proposée. Celle-ci se décompose en deux étapes : Elle consiste d'une part en une mesure in situ et localisée, du paramètre diffusivité thermique longitudinale de l'œuvre d'art analysée. Elle consiste d'autre part, en une mesure de profondeur à partir d'une analyse photothermique pulsée et étendue de cette même œuvre d'art, associée à un ajustement théorie / expérience. Nous avons ensuite présenté le principe de mesure de la diffusivité longitudinale mis en œuvre pour l'étude. Nous avons présenté dans une troisième étape, les conditions expérimentales et les résultats obtenus lors de l'analyse d'une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Nous avons présenté, dans une quatrième étape, l'approche retenue et le modèle thermique mis en œuvre conduisant à la mesure de la profondeur du défaut. Nous avons enfin montré que le protocole de mesure suivi conduit à une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe une inclusion de plastazote dans l'œuvre d'art étudiée. Ces résultats sont encourageants. Ils demandent maintenant à être confirmés puis généralisés lors d'analyses in situ. Des études allant dans ce sens sont en cours.

Références bibliographiques

- [1] G. Szatanik, Etude et restauration d'une peinture murale représentant Saint Christophe (collection Campana, Louvre). Essai d'application de la thermographie infrarouge stimulée pour l'examen du support. Institut national du patrimoine, département des restaurateurs, 2004
- [2] Le Contrôle des matériaux par méthodes optiques infrarouge, Livre : Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, Collectif d'auteurs, dirigé par Paul Smigielski, ISBN : 978-2-918241-00-3, code EAN : 9782918241003, Editeur : Société Française d'Optique, novembre 2009, pp 232-296
- [3] Jean Charles Candoré, J.L Bodnar, Vincent Detalle, Philippe Grossel: Non destructive testing in situ, of works of art by stimulated infra-red thermography, Journal of physics conferences series Journal of physics conferences series, 214, (2010) 012068
- [4] B. Remy, A. Degiovanni et D. Maillet, Mesure de la diffusivité thermique de matériaux anisotropes de petites dimensions par thermographie infrarouge et transformations intégrales, Congrès de la Société Française de Thermique, SFT 2007 "Thermique et Société", Île des Embiez, 29 mai – 01 juin 2007, p. 933-938
- [5] D. Maillet et al., Thermal Quadrupoles – Solving the Heat Equation through Integral Transforms, John Willey & Sons, Chichester, 2000.