

Caractérisation thermophysique locale d'œuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée

K. Mouhoubi*, J.L Bodnar*, J.L. Nicolas*, V. Detalle, J.M. Vallet***, T. Duvaut***

* 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

*** Centre Interrégional de Conservation et Restauration du Patrimoine, 21 rue Guibal, 13003 Marseille.

Résumé

L'objet du travail que nous présentons ici, est d'approcher les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de mesure in situ, de diffusivité thermique longitudinale de peinture murale du patrimoine. Nous présentons d'abord le principe de la méthode de mesure. Elle est basée sur l'analyse temporelle de l'évolution de la valeur maximale du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser locale. Nous montrons ensuite la faisabilité de la méthode à l'aide d'une série de simulations. Nous montrons enfin que la méthode permet une bonne estimation de la diffusivité thermique longitudinale d'un échantillon test en PVC, puis d'une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre.

Nomenclature

a : Diffusivité thermique, m^2/s	R : Rayon d'excitation, m
b : Effusivité thermique du matériau, $J / K.m^2.s^{1/2}$	t : Temps, s
C : Capacité calorifique, J/Kg K	T : Température, K
e : Constante de Neper	T_{ext} : Température extérieure, K
F : Transformée de Fourier	T_{max} : Température maximale, K
H : Fonction de Bessel	z : Coordonnée spatiale, m
i : Indice complexe	δ : Fonction delta de Dirac
J : Fonction de Bessel	λ : Conductivité thermique, W/m K
L : Epaisseur, m	ω : Pulsation, rad / s
Q : Energie, J	ρ : Masse volumique, kg/m^3
r : Coordonnée spatiale, m	σ : Variable de Hankel

1. Introduction

La conservation du patrimoine culturel est essentielle. A ce titre, de nombreuses techniques d'analyses physiques ou chimiques sont déjà mises en œuvre par les restaurateurs. Sans être exhaustif, nous pouvons citer l'analyse optique, l'analyse X, les chromatographies en phases liquides ou gazeuses, ou encore l'analyse acoustique [1]. Ces techniques ne sont, bien sûr, pas universelles ce qui explique que d'autres modes de contrôle d'œuvres d'art, sont encore étudiés dans les laboratoires de recherche. La thermographie infrarouge stimulée est l'un de ces nouveaux modes de contrôle. Cette technique est fort prometteuse, car elle a déjà montré ses possibilités en matière de détection de déplacements situés dans des peintures murales. Elle a déjà permis, entre autres, l'analyse in situ, du « Saint Christophe » de la collection Campana du Louvre, l'analyse du « Saint Martin » de l'église Saint Florentin de Bonnet, l'analyse de la « Traversée du désert » des plafonds peints de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe (classée au patrimoine mondial de l'UNESCO), l'analyse du « Saint Pierre livré aux soldats de Pilâtes » de l'église Saint Pierre de Villefranche sur mer ou encore l'analyse des plafonds

peints de la bibliothèque Médicis du Sénat [1-7]. Les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de détection de déplacements situés dans des peintures murales sont donc maintenant avérées et reconnues par la communauté scientifique. Il y a maintenant à étudier ses possibilités en matière de caractérisation dimensionnelle de défaut. Notre équipe a déjà proposé deux approches permettant une mesure locale et in situ du paramètre diffusivité thermique [8-10]. Dans l'optique de déterminer, in fine, le protocole de mesure de terrain le plus robuste, le plus fiable et le moins intrusif possible, nous étudions encore d'autres voies d'analyses. Le travail que nous présentons ici, entre dans ce cadre. Il présente une troisième façon d'aboutir à la mesure de la diffusivité thermique locale de l'œuvre d'art. Elle est basée sur l'analyse temporelle de l'évolution de la valeur maximale du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser locale. Notre présentation se divise en trois parties :

Nous présentons d'abord le principe de cette méthode de mesure.

Nous montrons ensuite la validité de l'approche à l'aide d'une série de simulations.

Nous montrons enfin expérimentalement, que la méthode permet une bonne estimation de la diffusivité thermique longitudinale d'un échantillon test en PVC, puis d'une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre.

2. Le méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale développée pour l'étude

Le principe de la méthode de mesure de diffusivité thermique longitudinale développée pour l'étude est le suivant : Un échantillon est soumis sur sa face avant à une excitation laser localisée, temporellement proche d'une fonction delta de Dirac $\delta(t)$ et spatialement de forme gaussienne. On mesure ensuite les variations de champ de température induites par cette excitation, 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, à la valeur de la diffusivité thermique du matériau. Examinons en détails ce post-traitement mathématique sur lequel est basée cette technique de mesure.

Soit une plaque d'épaisseur L , semi infinie radialement. Soit une perturbation thermique très brève (Fonction delta de Dirac temporelle $\delta(t)$), et de forme gaussienne spatialement. Cette excitation est appliquée à $t = 0$ au centre de la plaque précédente. Soit R , le rayon de la tache d'excitation (mesurée à Q_{\max}/e^2). Soit λ , ρ , c et a , respectivement, la conductivité thermique, la masse volumique, la capacité calorifique et la diffusivité thermique du matériau constitutif de la plaque étudiée. L'échantillon est initialement en équilibre thermique avec son environnement. Enfin, le modèle néglige les échanges convecto - radiatifs entre l'échantillon étudié et l'environnement. La traduction mathématique de ces hypothèses conduit au système différentiel suivant (1) :

$$\Delta T(r, z, t) = \frac{1}{a} \cdot \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{En } Z = 0 : -\lambda \frac{\partial T(z, 0, t)}{\partial t} = \frac{2Q}{\pi R^2} \text{Exp}\left(-\frac{2r^2}{R^2}\right) \delta(t)$$

$$\text{En } Z = L : -\lambda \frac{\partial T(z, L, t)}{\partial t} = 0$$

$$\text{A } t = 0 : T = T_{\text{ext}}$$

La résolution de ce système différentiel a déjà été présentée dans [10]. Elle met en œuvre deux transformations intégrales ; d'une part une transformation de Hankel d'ordre 0 sur l'axe r (2) et d'autre part, une transformation de Fourier en temps (3). Elle permet d'aboutir à l'expression de l'évolution spatio-temporelle de la température en face avant de l'échantillon étudié donnée par la formule (4).

:

$$H_0 \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right) \right] = -\sigma^2 \int_0^{\infty} r \cdot J_0(\sigma \cdot r) T(r, z, t) \cdot dr \quad (2)$$

$$F \left(\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \right) = \frac{i \cdot \omega}{\sqrt{2 \cdot \pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} T(r, z, t) \cdot \exp(-i \cdot \omega \cdot t) dt \quad (3)$$

$$T(r, 0, t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2 + 8at} \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{R^2 + 8at}\right) \quad (4)$$

Intéressons nous maintenant à la valeur maximale de la température. Elle est obtenue au centre de la Gaussienne, c'est-à-dire en $r = 0$. Elle a pour expression :

$$T_{max}(0, 0, t) \approx \frac{2Q}{b\sqrt{\pi^3 t}} \cdot \frac{1}{R^2 + 8at} \quad (5)$$

En réarrangeant mathématiquement cette expression, nous pouvons alors écrire :

$$\frac{1}{T_{max}(0, 0, t) \sqrt{t}} \approx \frac{bR^2 \sqrt{\pi^3}}{2Q} \left(1 + \frac{8a}{R^2} t \right) \quad (6)$$

On remarque alors que la diffusivité thermique recherchée peut donc être déterminée simplement à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine de l'inverse de l'évolution temporelle de la température maximale de la tache thermique engendrée par l'excitation laser multipliée par la racine carrée du temps (7). Cela nous offre donc une nouvelle méthode d'estimation de ce paramètre thermophysique.

$$a = \frac{\text{pente} \cdot R^2}{8 \cdot \text{ordonnée}} \quad (7)$$

3. Simulations théoriques

Afin de tester cette nouvelle procédure de mesure longitudinale de diffusivité thermique, nous avons d'abord entrepris une série de simulations, basées sur l'utilisation de la méthode des éléments finis pour résoudre le système différentiel précédent (1). Les conditions de simulations retenues pour l'étude sont les suivantes : Tout d'abord, nous nous sommes placés en géométrie 3D. Ensuite, nous avons considéré un bloc de plâtre, car ayant des propriétés thermophysique proches de celles d'une peinture murale. Nous avons considéré une conductivité thermique de $\lambda = 0,4$ W/mK, une masse volumique de $\rho = 1100$ Kg/m³, une

chaleur spécifique de $c = 830 \text{ J/Kg K}$ soit une diffusivité thermique théorique $a = 4,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Par souci de simplicité, la forme de ce bloc de plâtre a été prise rectangulaire. Ses dimensions sont une longueur de 12 cm, une largeur de 12 cm et une épaisseur de 3 mm. L'excitation de forme gaussienne a été déposée au centre de ce bloc de plâtre. Ses caractéristiques sont une puissance de 3W (c'est la puissance maximale délivrée par le laser du laboratoire associé à cette étude). La durée d'excitation a été fixée à 20 millisecondes de façon à s'approcher d'une fonction delta de Dirac. Le rayon caractéristique d'excitation a été fixé à $660 \mu\text{m}$, ce qui constitue là aussi à des valeurs accessibles classiquement par l'expérience. Enfin, pour réduire les temps de calculs, nous avons considéré un maillage progressif de l'échantillon étudié. Il a été pris plus fin à l'endroit de l'excitation laser et plus large ailleurs. Des cartes de températures fournies par ces simulations, nous avons extrait, à chaque instant, la valeur maximale de la température, mesurée à l'aplomb de l'excitation laser. Nous avons ensuite tracé l'évolution temporelle de l'inverse de la température maximale de la tache thermique engendrée par l'excitation laser multipliée par la racine carrée du temps (figure 1). Nous avons ensuite estimé la pente et l'ordonnée à l'origine de la droite obtenue. Nous avons ensuite utilisé la formule 7 pour déterminer la diffusivité thermique recherchée. Dans notre cas d'étude, la figure 1, fait apparaître une pente de $0,113 \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-3/2}$ et une ordonnée à l'origine de $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$. Ces valeurs conduisent à une valeur de diffusivité thermique égale à $4,39 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, pour une valeur théorique de $4,38 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Ces valeurs sont très proches, ce qui montre bien la faisabilité de la méthode.

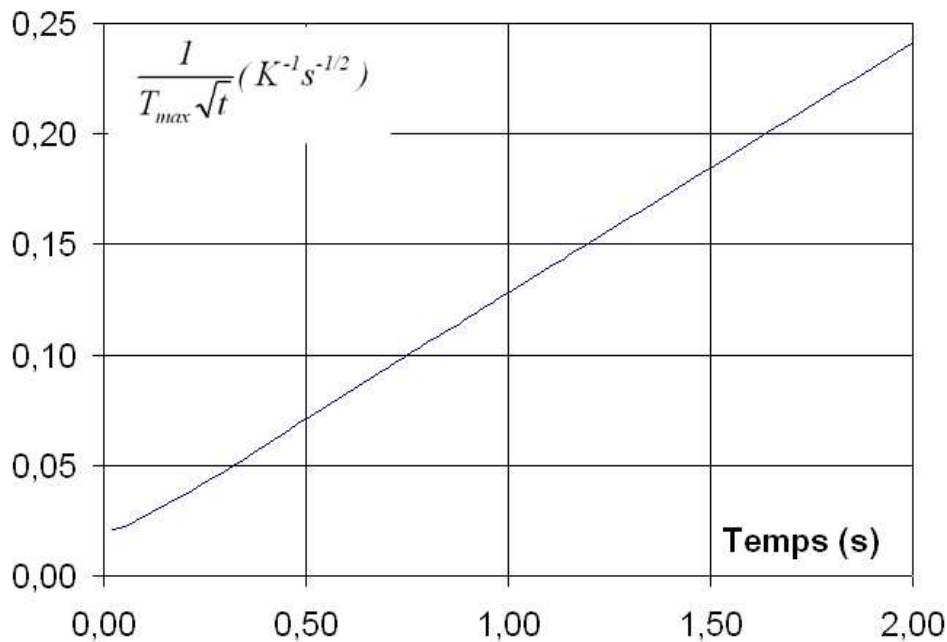


Figure 1 : Evolution temporelle de l'inverse de la température maximale de la tache thermique engendrée par l'excitation laser multipliée par la racine carrée du temps

4. Etude expérimentale

4.1 Le dispositif expérimental mis en œuvre

Les résultats obtenus lors de l'étude théorique étant encourageants, nous sommes passé dans une seconde partie de notre travail, à une étude expérimentale. Le dispositif expérimental que nous avons mis en œuvre dans ce cadre est le système d'Analyse des Matériaux Minces

par Thermographie InfraRouges (SAMMTHIR) du laboratoire. La source d'excitation est constituée d'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 2W pendant une durée de 20 ms. La fréquence d'acquisition de la camera thermographie infrarouge est de 50 Hz.

4.2 Etude d'un échantillon académique

Le premier échantillon que nous ayons analysé est un échantillon académique. Il s'agit d'un cylindre de PVC de 30 mm de diamètre et de 8 mm d'épaisseur. Afin de déterminer avec précision sa diffusivité thermique, nous l'avons d'abord étudié au diffusivimètre flash. Un exemple de résultat obtenu est présenté sur la figure 2. Elle fait apparaître des valeurs de diffusivité thermiques estimées à l'aide de trois méthodes de dépouillement. Ces dernières sont égales à $1,249 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour la méthode des temps partiels, $1,245 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$, pour la méthode des moments temporels et $1,244 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ pour l'ajustement théorie / expérience.

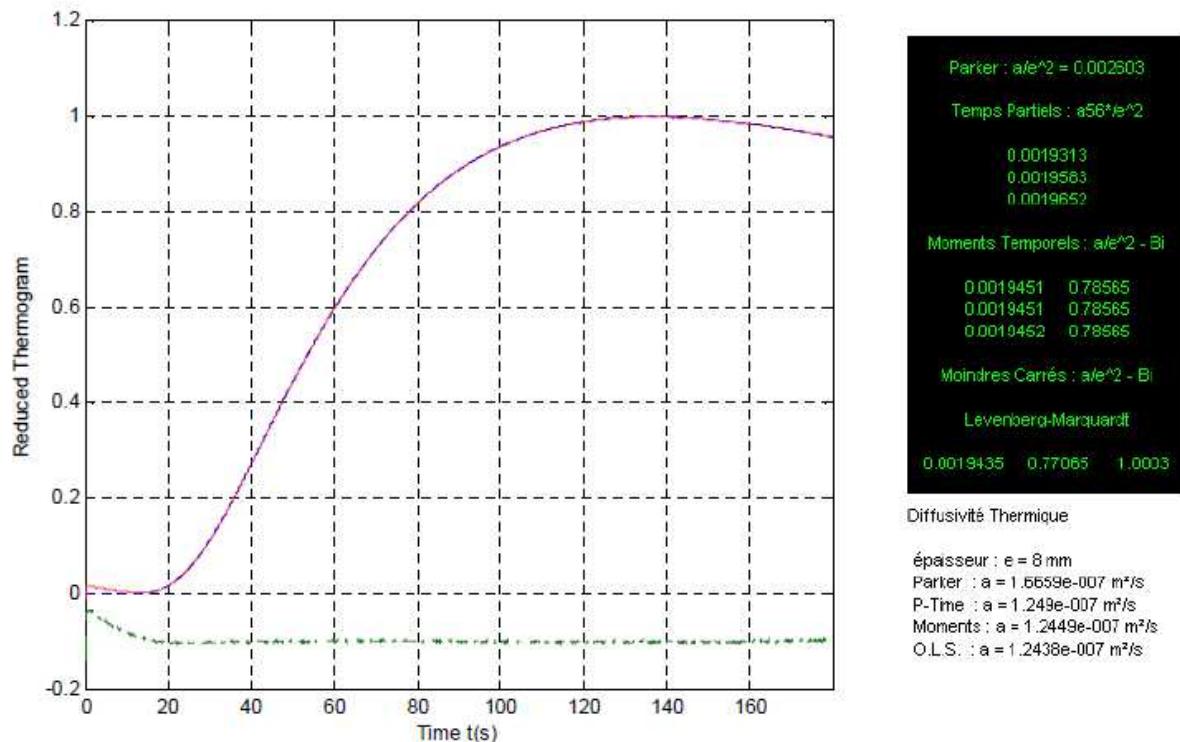


Figure 2 : Caractérisation de l'échantillon de PVC à l'aide d'un diffusivimètre flash

Cet échantillon académique de PVC a ensuite été analysé à l'aide du dispositif expérimental SAMMTHIR. A partir du film thermographique obtenu, nous avons d'abord, tiré l'évolution temporelle de l'inverse de la température maximale de la tache thermique engendrée par l'excitation laser multipliée par la racine carrée du temps. Le résultat obtenu est présenté sur la figure 3. Elle fait apparaître, comme le prévoit la théorie, une droite de pente positive. Nous avons alors estimé cette pente ainsi que l'ordonnée à l'origine de cette droite et trouvé des valeurs de respectivement : $1,73 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-3/2}$ et $8,8 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$. Nous avons

ensuite tiré d'autre part du film thermographique la valeur du rayon caractéristique d'excitation. Pour cela, nous avons analysé la première image du film et trouvé une valeur de 2,18 mm. Enfin, à l'aide de la formule 7, nous avons estimé la diffusivité thermique recherchée. Nous trouvons une valeur de $1,20 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$. Cette valeur est proche des valeurs de références. Cela confirme donc expérimentalement la faisabilité de la méthode.

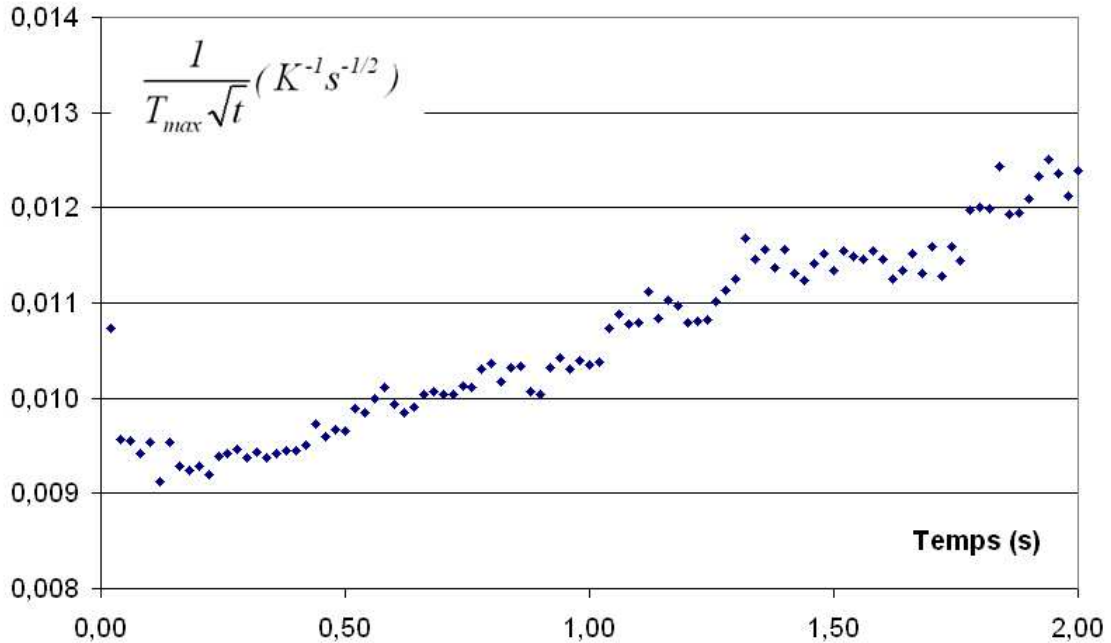


Figure 3 : Caractérisation d'un échantillon de PVC à l'aide du système SAMMTHIR

4.3 Etude d'une peinture murale

Le second échantillon que nous avons analysé expérimentalement est une peinture murale. Il s'agit d'une copie du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Elle a déjà été caractérisée précédemment à l'aide de deux méthodes : D'une part, par analyse de Fourier spatiale de la réponse photothermique de l'échantillon face à une excitation laser localisée [9] et d'autre part, par une analyse temporelle de l'évolution du rayon caractéristique des profils spatiaux du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser [10]. Dans le premier cas la diffusivité locale estimée au niveau de l'œil droit de l'enfant Jésus était égale à $5,13 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Dans le second cas et toujours au même endroit la diffusivité thermique estimée était égale $5,09 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. C'est toujours à cette position que nous avons développé notre nouvelle analyse. Nous avons utilisé le même protocole de dépouillement que pour l'échantillon académique de PVC et avons obtenu le résultat présenté sur la figure 4. Elle montre là encore une droite de pente positive. La valeur de cette pente a alors été estimée à : $37,6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-3/2}$. La valeur de l'ordonnée à l'origine a quant à elle été estimée à $9,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$. La première image du film thermographique donne quant à elle, une valeur de rayon caractéristique d'excitation égale à 1,01 mm. La diffusivité thermique recherchée est alors estimée à l'aide de la formule (7) à $4,96 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Cette valeur expérimentale est là aussi proche des valeurs de référence, ce qui confirme la faisabilité de la méthode.

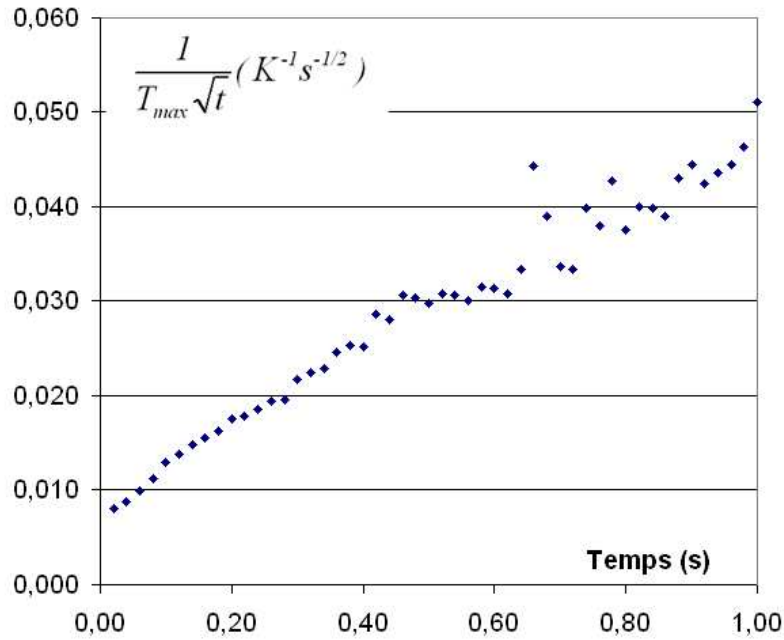


Figure 4 : Caractérisation d'une peinture murale à l'aide du système SAMMTHIR

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière de mesure in situ de la diffusivité thermique longitudinale de peinture murale.

Nous avons d'abord présenté le principe de la méthode de mesure, basée sur l'analyse temporelle de l'évolution de la valeur maximale du signal photothermique, mesuré à l'endroit d'une excitation laser locale.

Nous avons ensuite présenté les simulations entreprises et montré théoriquement que la méthode photothermique permettait bien la mesure du paramètre diffusivité thermique longitudinale d'un bloc de plâtre.

Les résultats théoriques obtenus étant positifs, nous avons alors développé une étude expérimentale. Dans ce cadre, nous avons d'abord présenté le dispositif expérimental développé pour l'étude, puis, nous avons enfin montré expérimentalement, que la méthode donnait accès à une bonne estimation de la diffusivité longitudinale d'un échantillon académique de PVC, puis d'une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre

Ces résultats théoriques et expérimentaux sont encourageants puisque semblent ouvrir la voie à la caractérisation photothermique in situ d'œuvres d'art. Ils demandent maintenant à être généralisés et à être mis en œuvre lors de l'analyse réelle d'œuvres d'art. 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. INP, Sept 2004.
- [2] J.C. Candoré : Détection et caractérisation de défauts par thermographie infrarouge stimulée : Application au contrôle d'œuvres d'art. PhD, Reims, June 2010.

- [3] G. Szatanik, M. Gerard, J.L. Bodnar : La thermographie infrarouge stimulée pour l'examen des enduits dans les peintures murales : Application au Saint Christophe portant l'enfant Jésus. *Journal de Conservation et restauration (coré)*, n°17, décembre 2006, pp 64 – 70.
- [4] J. C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grossel : Non destructive testing of work of art by stimulated infrared thermography. *European physical journal Applied Physics*, 2012, vol 57, 02, pp 21002 -210011.
- [5] J.L. Bodnar, J.L. Nicolas, J.C. Candoré, V. Detalle : Non destructive testing by infrared thermography under random excitation and ARMA analysis. *International journal of thermo physics*, DOI 10.1007/s10765-012-1265-2,.
- [6] J.L Bodnar, J. C Candoré, J.L. Nicolas, G. Szatanik, V. Detalle, J.M.Vallet : Stimulated infrared thermography applied to help for restoration of mural paintings, *NDT/E International*, 49, pp 40-46, 2012
- [7] J.L. Bodnar, K. Mouhoubi, G. Szatanik-Perrier, J.M. Vallet and V. Detalle : Photothermal thermography applied to the non-destructive testing of different types of works of art, *International Journal of Thermophysics*, DOI 10.1007/s10765-012-1301-2.
- [8] J.C. Candoré, J.L. Bodnar, V. Detalle, B. Remy and P. Grossel: Approach of the measurement of the thermal of thermal diffusivity of mural painting by front face photothermal radiometry, *Journal of physics*, 214, (2010), 012094.
- [9] J.C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grossel : Characterization of defects situated in a fresco by stimulated infrared thermography, *European physical journal Applied Physics*, 2012, vol 57, 01, pp 11002 -11008
- [10] J.L Bodnar, J.L. Nicolas, K. Mouhoubi, V. Detalle : Stimulated infrared thermography applied to thermophysical characterization of cultural heritage mural paintings, 2012, 60, 21003 DOI : 10.1051/epjap/2012120280