

Radiométrie photothermique appliquée à la caractérisation de défauts situés dans des fresques

Jean-Charles Candoré¹, Jean-Luc Bodnar^{1*}, Vincent Detalle², Gabriella Szatanik³ et Philippe Grossel¹

¹ UTAP / Laboratoire d'Energétique et d'Optique, UFR Sciences, BP 1039, 51687 Reims

² Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne

³ Restauratrice du patrimoine, 6 allées Pasteur, 78330 Fontenay le Fleury

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

Résumé

Dans le travail que nous présentons ici, nous étudions expérimentalement les possibilités de la radiométrie photothermique en matière de caractérisation dimensionnelle de défauts situés dans des fresques. Nous montrons d'abord que la méthode permet bien la détection de ce type de défaut. Nous montrons ensuite que plusieurs paramètres caractéristiques de la réponse photothermique recueillie sont corrélés à la profondeur de cette inclusion. Nous montrons encore que des images de ces paramètres caractéristiques nous renseignent sur l'étendue géométrique tridimensionnelle du défaut. Nous montrons enfin que l'exploitation de l'un de ces paramètres caractéristiques permet une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe un défaut inconnu.

1. Introduction

Les décollements et les poches d'air à l'intérieur des enduits sont des altérations très fréquentes dans les fresques. La technique traditionnelle utilisée par le restaurateur pour détecter les décollements est le sondage acoustique. Cette méthode ne demande aucun équipement particulier et reste simple à mettre en œuvre. Cependant la méthode est subjective et limitée dans les informations qu'elle fournit. 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. 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 radiométrie photothermique a déjà été mise en œuvre pour détecter et caractériser des défauts dans différents types de matériaux [2-3]. 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 photothermique est rapide, sans contact, objective et permet l'analyse de surfaces étendues. Dans un premier travail [4] : l'analyse du Saint Christophe de la collection Campana du Louvres, nous avons montré que la méthode photothermique permettait bien de détecter des défauts initialement repérés par analyse acoustique. L'objet du travail que nous présentons ici, consiste maintenant à aborder les possibilités de la méthode photothermique en matière de caractérisation de ce type de défaut. Dans ce cadre, nous montrons d'abord que la méthode photothermique permet bien la détection d'un défaut en plastazote située dans une fresque réalisée selon la technique des primitifs italiens. Nous montrons ensuite que plusieurs paramètres caractéristiques de la réponse photothermique recueillie sont corrélés à la profondeur variable de cette inclusion. Nous montrons encore que des images de ces paramètres caractéristiques nous renseignent sur l'étendue géométrique tridimensionnelle du défaut. Nous montrons enfin que l'exploitation de l'un de ces paramètres permet une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe une inclusion inconnue.

2. L'expérimentation mise en œuvre pour l'étude

Le système expérimental que nous avons mis en œuvre pour l'étude, est le Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge (SAMMTHIR) du Laboratoire d'Energétique et d'Optique de la Faculté des Sciences de Reims. Ce système d'analyse est d'abord composé d'une lampe à halogène d'une puissance de 500 W. Il est ensuite composé d'une caméra de thermographie infrarouge AGA Thermovision 782. Il est enfin composé d'une électronique et d'une informatique permettant une analyse photothermique impulsionnelle. L'échantillon utilisé pour l'étude est un revêtement de chaux et de sable déposé sur un substrat en plâtre et recouvert d'une couche picturale; deux bandes de peintures, verte et noire. Il a été réalisé selon la technique des primitifs italiens. Cette fresque comporte un défaut en plastazote simulant une inclusion d'air (les propriétés thermophysiques du plastazote sont proches de celles de l'air), incliné par rapport au plan de la surface de l'échantillon et situé à l'interface chaux - sable / plâtre. Les dimensions de cet échantillon sont une longueur de 137 mm, une largeur de 58 mm et une hauteur de 62 mm. Le défaut en plastazote, a une longueur de 137 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur de 5mm. Son inclinaison par rapport au plan de la surface de l'échantillon est d'environ 5 degrés. Sa profondeur varie donc de 2 mm à 14 mm sur la longueur de l'échantillon. Les conditions expérimentales retenues pour l'étude sont les suivantes : L'échantillon étudié a été placé 70cm face à la source d'excitation. Nous l'avons excité pendant 44,96 secondes et avons observé sa réponse en température à l'aide de la caméra de thermographie infrarouge placée approximativement au même niveau que le système d'excitation, mais légèrement décalé par rapport à la normale à la surface à l'échantillon étudié (d'environ 10 degrés). L'optique de la caméra est composée d'un objectif aga 750 de 20 degrés. L'ouverture de cet objectif a été choisie à 1,8. La fréquence d'acquisition des images a été fixée à 6,25 Hertz. La durée de l'analyse a été fixée à 655,36 secondes. Le « thermal range » de la caméra a été fixé à 2 et le « thermal level » à 14.

3. Les résultats expérimentaux obtenus

3.1. Etudes des réponses impulsionnelles brutes

Les premiers résultats expérimentaux que nous présentons sur la figure 1, sont les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues pour des profondeurs de défauts de respectivement : 5 mm, 5,7 mm, 7 mm et 8,5 mm. Cette figure montre clairement, en phase de refroidissement, des courbes disjointes et classées selon la profondeur à laquelle se situe le défaut.

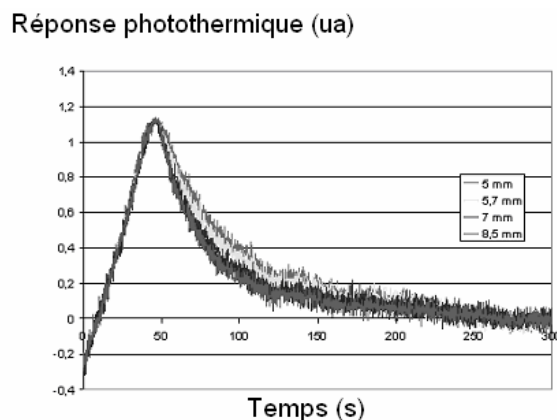


Figure 1 : Les réponses photothermiques impulsionnelles brutes obtenues

Dans le but d'aboutir à une caractérisation de cette profondeur, nous avons ensuite étudié sur les figures suivantes la corrélation pouvant exister entre certains points caractéristiques de

ces réponses impulsionnelles et ce paramètre géométrique. Sur la figure 2, c'est l'évolution de l'aire présente sous la réponse photothermique en fonction de la profondeur du défaut que nous avons étudiée. La courbe obtenue est monotone et décroissante. Elle montre donc bien qu'il existe une corrélation entre ces deux paramètres et donc la possibilité d'aboutir à une mesure de profondeur de défauts par une mesure intégrale de la réponse photothermique.

Aire sous la RI brute (ua)

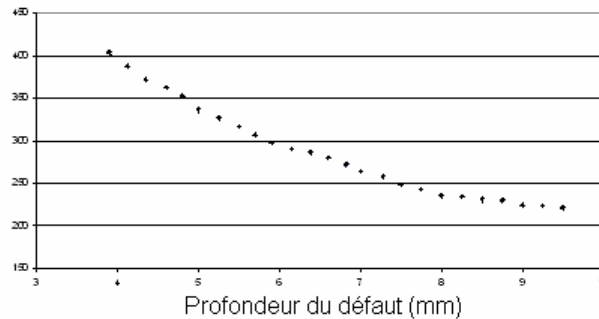


Figure 2 : Corrélation entre l'aire contenue sous la réponse impulsionnelle brute et la profondeur à laquelle se situe le défaut

La particularité d'une telle mesure serait toutefois d'être dépendante d'une variation du signal exciteur et du facteur émissivité. Pour essayer de nous affranchir de ces dépendances (très classiques en radiométrie infrarouge, mais aussi souvent très perturbatrices), nous avons dans la suite, essayé de considérer un paramètre caractéristique ayant plutôt une nature temporelle et étant donc naturellement indépendant des problèmes énergétiques. Sur la figure3, c'est la relation existant entre le temps de vol du signal photothermique (temps mis par le signal pour passer d'un premier niveau donné à un second niveau donné du signal photothermique) et la profondeur du défaut que nous avons étudié. La courbe obtenue est là aussi monotone et décroissante. Elle montre donc clairement la corrélation existant entre les deux paramètres et donc la possibilité d'aboutir à une mesure de profondeur à travers une mesure de temps de vol.

Temps de vol (s)

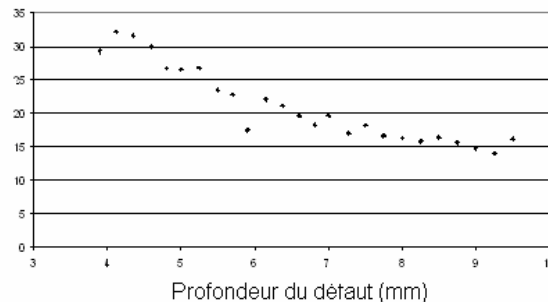


Figure 3 : Corrélation entre le temps de vol (100 % - 60 %) de la réponse impulsionnelle et la profondeur du défaut

3.2. Etudes des courbes de contraste

Traditionnellement en contrôle non destructif et donc en radiométrie photothermique, il est classique d'exploiter aussi les courbes de contrastes (différences entre une réponse obtenue sur une partie endommagée de l'échantillon étudié et une réponse obtenue sur une partie saine de ce dernier), pour aboutir à une détection ou à une caractérisation de défaut. En effet travailler sur ce type de courbes conduit à rehausser le contraste des résultats obtenus, puisqu'il s'agit en fait d'un filtrage passe haut de ces résultats. C'est donc tout naturellement que nous avons étudié aussi les possibilités de caractérisation de profondeur de défaut à partir

de ce type de signal. Sur la figure 4, nous avons d'abord tracé des courbes de contrastes calculées pour différentes profondeurs de défauts : 3,9 mm, 4,8mm, 5,7 mm, 6,6 mm et 8,5mm. Elles montrent d'abord que le contraste est d'autant plus prononcé que le défaut est proche de la surface. Elles montrent ensuite que le maximum de contraste se produit d'autant plus tôt que le défaut est proche de la surface. Elles montrent enfin que les paramètres, abscisse et ordonnée du maximum de contraste et aire sous la courbe semblent corrélés à la profondeur du défaut.

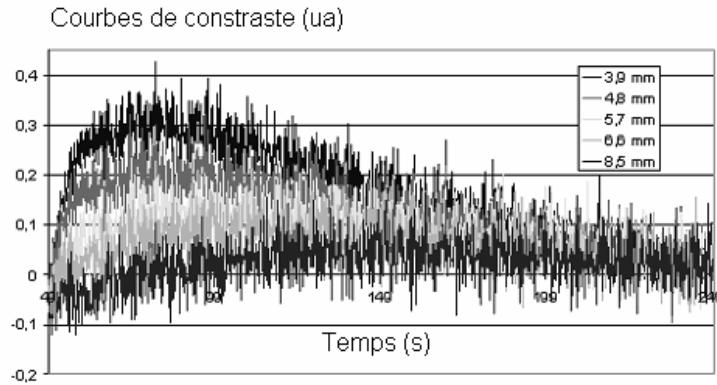


Figure 4 : Comparaison entre les contrastes obtenus à l'aplomb du défaut incliné.

Sur les courbes 5 à 7, ce sont donc les évolutions de ces trois paramètres en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut que nous avons tracées. Ces trois courbes montrent respectivement une variation monotone croissante, décroissante et enfin décroissante entre ces derniers et la profondeur du défaut. Elles confirment donc bien l'existence d'une corrélation entre chacun de ces paramètres et la profondeur du défaut et par conséquent la possibilité de mesurer ce paramètre géométrique par l'intermédiaire de la mesure de l'un de ces trois paramètres caractéristiques (on notera ici que l'abscisse du maximum de la courbe de contraste est aussi de nature temporelle et donc indépendant de fluctuations énergétiques).

Temps du maximum de contraste (s)

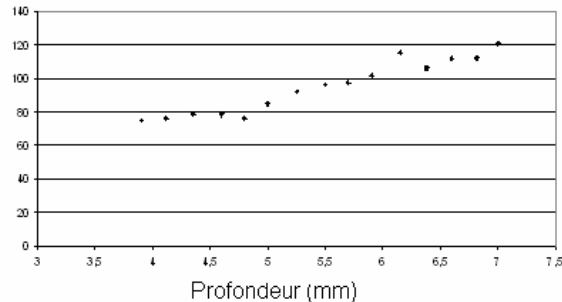


Figure 5 : Evolution de la valeur de l'abscisse du contraste maximal en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut

Valeur du maximum de contraste (ua)

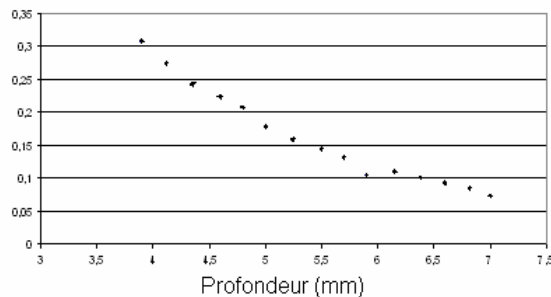


Figure 6 : Evolution de la valeur de l'ordonnée du contraste maximal en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut.

Aire sous la courbe de contraste (ua)

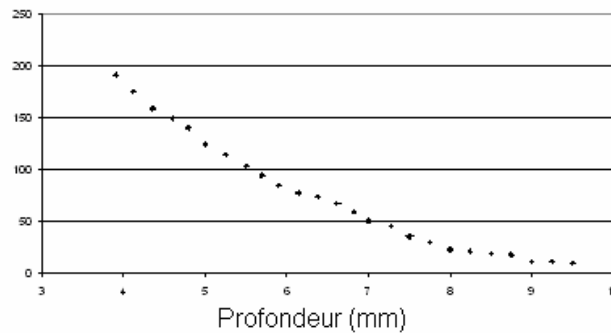


Figure 7 : Evolution de la valeur de l'aire sous la courbe de contraste en fonction de la profondeur à laquelle se situe le défaut

3.3. Imagerie de paramètres caractéristiques

Ces résultats obtenus lors de l'analyse de points particuliers de la surface de l'échantillon étudié, étant encourageants, nous avons voulu, dans une seconde étape, étendre l'analyse à toute la surface de la fresque étudiée et ainsi bâtir des images de paramètres caractéristiques. Sur la figure 8, ce sont les images, codées en niveaux de gris et tridimensionnelle de l'aire contenue sous les réponses impulsionnelles brutes obtenue en tous points de la surface de la fresque étudiée, que nous présentons. Elles montrent d'une part des valeurs intégrales plus importantes au centre de l'échantillon que sur ses bords. Elles montrent d'autre part que cette importance varie d'un bout à l'autre de l'échantillon. Or, la lecture de la figure 3, nous indique que plus la valeur de l'aire sous la courbe de contraste est importante, plus le défaut détecté se trouve à proximité de la surface de l'échantillon étudié. La conjugaison de ces deux informations nous permet bien de retrouver que l'échantillon étudié contient un défaut incliné en partie centrale de l'échantillon. Ce type d'image paraît alors être un nouvel outil intéressant pour les restaurateurs du patrimoine puisque semblant pouvoir leur donner simplement des informations géométriques sur les défauts détectés.



Figure 8 : Images de l'aire contenue sous les réponses impulsionnelles brutes tracées en tous points de la surface de la fresque étudiée

3.4. Exemple de caractérisation de profondeur de défaut

Dans une dernière étape, nous avons voulu essayer, à l'aide de l'un des paramètres caractéristiques précédents : l'aire sous le courbe de contraste, de déterminer la profondeur d'une nouvelle inclusion inclinée de plastazote située dans une nouvelle fresque. Nous avons étudié cet échantillon dans les mêmes conditions expérimentales que celles décrites au paragraphe 2.3. Les résultats obtenus dans ce cadre sont présentés sur la figure 9. Elle représente la profondeur estimée à partir de l'aire sous la courbe de contraste de la réponse photothermique impulsionnelle et de la courbe d'étalonnage de la figure 7, en fonction de la profondeur réelle du défaut. La courbe obtenue est proche d'une droite inclinée à 45 degrés, ce qui montre les possibilités de la méthode en matière de mesure de profondeur de défaut.

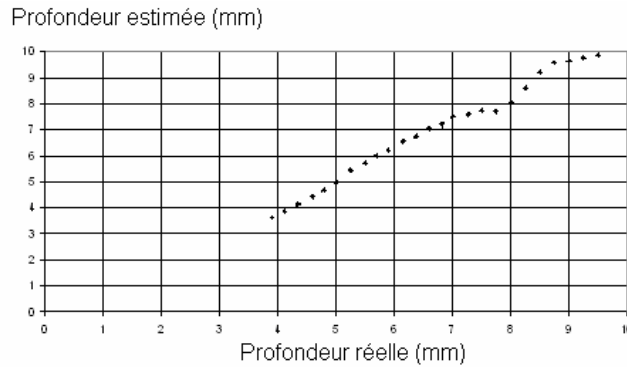


Figure 9 : Comparaison entre la profondeur réelle du défaut et sa profondeur estimée.

4. Conclusion.

Dans le travail que nous avons présenté ici, nous avons approché expérimentalement, à l'aide du Système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge (SAMMTHIR) de l'Université de Reims Champagne Ardenne, les possibilités de la radiométrie photothermique impulsionnelle en matière de caractérisation de défauts situés dans fresques murales et donc d'aide à la restauration d'œuvres d'arts. Nous avons d'abord montré que la méthode photothermique permettait bien la détection d'un défaut en plastazote incliné par rapport à la surface et situé dans une fresque. Nous avons ensuite montré que plusieurs paramètres caractéristiques de la réponse photothermique recueillie sont corrélés à la profondeur de cette inclusion, et devraient donc permettre la mesure de ce paramètre géométrique. Nous avons encore souligné que les paramètres, aires sous la réponse photothermique ou sous la courbe de contraste photothermique et ordonnées du maximum de contraste photothermique pouvaient présenter une dépendance à l'énergie déposée par la sonde photothermique alors que les paramètres temps de vol de la réponse photothermique et abscisse du maximum de contraste ne présentaient pas cette dépendance, ce qui constitue à notre sens un atout. Nous avons montré dans une quatrième étape, que des images de ces paramètres caractéristiques tracées en surface de l'échantillon étudié, pouvaient nous renseigner sur l'étendue géométrique tridimensionnelle du défaut et donc qu'elles pouvaient représenter un nouvel outil intéressant pour les restaurateurs du patrimoine. Nous avons enfin montré que l'exploitation de l'un de ces paramètres : l'aire sous la courbe de contraste permet une bonne approximation de la profondeur à laquelle se situe une inclusion inconnue. Il serait maintenant intéressant d'une part, d'étudier les possibilités de mesure de profondeur de défaut offertes par les autres paramètres caractéristiques, par l'ajustement d'un modèle thermique et l'utilisation de techniques inverses et enfin par l'utilisation de la variante aléatoire de la radiométrie photothermique (car moins perturbatrice que la variante pulsée). Il serait maintenant intéressant d'autre part, d'étudier les possibilités de la méthode lors de l'étude de fresques réelles situées par exemple dans des églises ou des châteaux. Des études allant dans ce sens sont en cours.

Références Bibliographiques

- [1] G. Szatanick : Etude et restauration d'une peinture murale représentant St Christophe, INP, 2004.
- [2] J.L Bodnar : Imagerie thermique, le contrôle non destructif des matériaux, thermogram' 2001.
- [3] J.L Bodnar : Contrôle non destructif par radiométrie photothermique aléatoire. thermogram' 2003.
- [4] J.C. Candoré, G. Szatanik, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grossel : Infra-red photothermal thermography: A tool of assistance for the restoration of mural paintings? Qirt 2006, Juin 2006.