

Aide à la restauration de peintures murales du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée

Jean Charles CANDORE¹, Jean Luc BODNAR^{1*}, Vincent DETALLE², Philippe GROSSEL¹

¹Laboratoire d'Énergétique et d'Optique, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims

²Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 avenue du Paris, 77420 Champs sur Marne

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

Résumé

Dans ce travail, nous présentons différents exemples d'aide à la restauration de peintures murales du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée. Nous montrons d'abord, lors d'une étude menée en laboratoire, sur une mini fresque académique et sur le Saint Christophe de la collection Campana du Louvre que la radiométrie photothermique permet la détection de défauts de déplacements de la couche picturale et ce de façon corrélée à une analyse acoustique. Nous montrons ensuite, lors de l'étude de la fresque de « la traversée du désert » de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe et lors de l'étude de la fresque « hommage aux pêcheurs de Sainte Marie » de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer, que la radiométrie photothermique est aussi utilisable in situ. Enfin, nous montrons dans une dernière étape, que la méthode photothermique permet une analyse plus rapide, plus fine et certainement plus objective que l'analyse acoustique.

1. Introduction

Dans le cadre de l'aide à la restauration des œuvres d'art du patrimoine, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques et les restaurateurs du patrimoine utilisent de nombreuses méthodes et instruments physiques et chimiques. Sans être exhaustifs, nous pouvons citer les photographies visibles, ultra violets et infrarouges (mises en œuvre en lumière naturelle, polarisée ou encore rasante), la radiographie X, la microscopie électronique à balayage, la spectroscopie, la chromatographie en phase liquide ou vapeur, l'accélérateur de particules AGLAE, le sondage acoustique, ... Ces méthodes, très diverses, sont très performantes dans leurs domaines d'applications mais, ne sont bien sûr, pas universelles. Par ailleurs, leur principe de mise en œuvre peut rendre certaines d'entre elles fastidieuses et fatigantes à mettre en œuvre. On peut citer, par exemple, la détection de défauts dans des fresques murales par analyse acoustique, dont la source sonore est le tapotement de l'index du restaurateur sur l'œuvre d'art [1-2]. De nouvelles méthodes de contrôle, destructives ou non destructives peuvent donc encore trouver leur place dans le domaine de l'aide à la restauration d'œuvres d'art. Notre laboratoire travaille depuis plus de 20 ans, au développement de la radiométrie photothermique. Ce mode de contrôle non destructif, sans contact est utilisé pour l'analyse thermophysique de matériaux minces. Il a déjà été mis en œuvre pour détecter et caractériser différents types de défauts (délaminages, fissures, ...), localisés ou étendus, dans différents types de matériaux [3]. Il semble donc pouvoir être d'un emploi possible dans le domaine de l'aide à la restauration d'œuvres d'art, et ce de façon complémentaire à l'analyse acoustique. Cela explique que depuis maintenant plusieurs années, nous l'avons mis en ce cadre [4-5]. Ce sont les résultats alors obtenus que nous présentons ici. Nous montrons ainsi, la possibilité de détecter, par cette technique, des décollements ou des déplacements situés dans une mini fresque académique, dans le « Saint Christophe » de la collection Campana du Louvre, dans les fresques Cocteau de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer ou enfin dans les plafonds peints de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe.

2. Principe du contrôle non destructif par radiométrie photothermique infrarouge

Le principe de la radiométrie photothermique est relativement simple. Il consiste à soumettre l'échantillon à analyser à un flux de photons dont l'absorption produit une élévation locale de température au voisinage du point d'impact lumineux, puis à observer les variations d'émissions du matériau à l'aide d'une chaîne de détection optique infrarouge. Les phénomènes thermophysiques mis principalement en œuvre par cette méthode de contrôle sont la conduction et le rayonnement thermique. Le signal photothermique recueilli par le radiomètre infrarouge dépend donc des paramètres gouvernant ces phénomènes physiques mais aussi de tous les paramètres pouvant être corrélés à ces derniers (présence de défaut). Elle permet donc potentiellement d'analyser ces différents paramètres. Le principe de la méthode fait aussi qu'elle est non destructive, sans contact, modulable et facilement personnalisable en fonction des besoins.

3. Les dispositifs de radiométrie photothermique infrarouge mis en œuvre pour l'analyse en laboratoire et in situ de peintures murales

Comme nous venons de le voir, la radiométrie photothermique est une méthode de contrôle non destructif très modulable. Il existe donc de nombreuses façons de la mettre en œuvre et par conséquent de nombreux types de dispositifs expérimentaux. Examinons la démarche logique qui nous a conduits à choisir les différents éléments du dispositif expérimental utilisés dans notre étude. Le caractère « industriel » de cette application ainsi que le besoin de portabilité que nécessite une analyse *in situ*, nous ont conduits à considérer un dispositif expérimental le plus simple, le plus robuste et le moins coûteux possible. Par ailleurs, les dimensions potentielles des défauts à détecter étant assez importants (plusieurs cm²), nous avons choisi de mettre en œuvre une analyse étendue, tant pour l'excitation que pour la détection infrarouge. Enfin, la fragilité éventuelle des échantillons analysés, nous a aussi conduits à mettre en œuvre, le plus souvent possible, une analyse aléatoire. Ainsi, nous avons choisi des projecteurs à halogènes industriels comme source d'excitation, une caméra de thermographie infrarouge à bolomètres pour assurer la collecte des informations et enfin une électronique et une informatique de pilotage de l'instrumentation permettant une analyse photothermique aléatoire (figure 1)



Figure 1 : Exemple de dispositifs expérimentaux utilisés pour l'étude

4. Analyse de peintures murales

4.1 Analyse d'une mini fresque

Le premier type de peinture murale que nous avons analysé est une copie partielle du Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Il s'agit, comme le montre la figure 2a d'une mini fresque réalisée selon la technique des primitifs Italiens dans un mélange de chaux et de plâtre, le tout étant recouvert d'une couche picturale, qui représente ici l'enfant Jésus. Cette

mini fresque, réalisée comme échantillon d'étude en vue de l'analyse du Saint Christophe lui-même, comporte 4 défauts : des inclusions de plastazote. Afin de détecter ces défauts, nous avons considéré les conditions expérimentales suivantes : un signal d'excitation de type binaire pseudo aléatoire de 256 termes, une période d'analyse de 10 secondes et enfin une reconstruction paramétrique de type Auto régressive à Moyenne Ajustée (ARMA), prenant en compte 40 paramètres en entrée et en sortie du modèle de comportement utilisé. La figure 2b représente en vue tridimensionnelle, les résultats obtenus dans ce cadre. Elle fait clairement apparaître une signature infrarouge plus importante à l'endroit des défauts. Ces signatures caractéristiques sont dues aux propriétés thermiques plus isolantes du plastazote par rapport au mélange chaux-plâtre, qui engendrent un ralentissement des flux de conduction internes, donc un refroidissement moins rapide de la surface éclairée au droit des défauts et par conséquent une signature infrarouge plus importante à cet endroit.

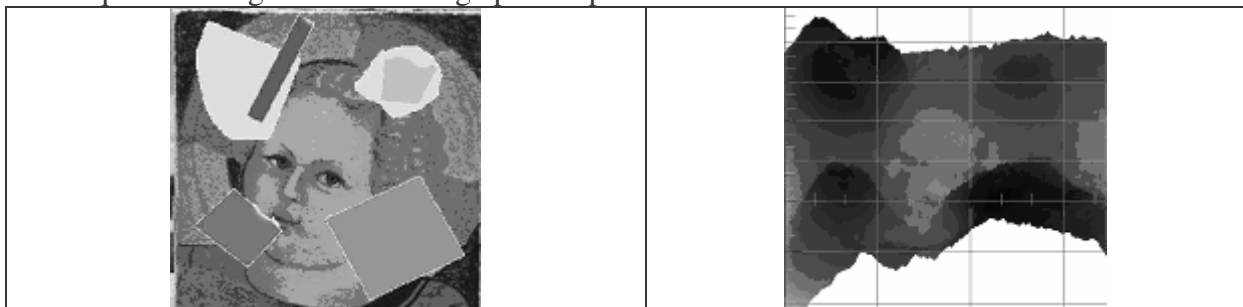


Figure 2 : Analyse photothermique d'une mini fresque

4.2 Analyse du saint Christophe

Les résultats obtenus sur la mini fresque étant encourageants, nous avons analysé dans un second temps le Saint Christophe lui-même. Cette œuvre d'art représente Saint Christophe portant l'enfant Jésus et est attribuée à Tommaso del Mazza. Elle a été créée entre 1385 et 1390. Elle fait partie de la collection Campana du Louvre (figure 3a). Cette fresque a d'abord été analysée de façon acoustique par Gabriella Szatanick, restauratrice du patrimoine. Nous l'avons ensuite analysée, zone par zone, afin d'obtenir une résolution optique suffisante pour chaque image, par radiométrie photothermique pulsée (le dispositif du LRMH utilisé à cette occasion ne permettait pas encore une analyse aléatoire). L'excitation mise en œuvre est alors de type Heaviside, d'une durée de 360 secondes. Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 3c. Il concerne l'analyse de la zone proche de la main droite du Saint Christophe (3b). Il fait apparaître une signature photothermique plus importante au niveau de cette main droite, qui est caractéristique, comme précédemment, de la présence d'un défaut.



Figure 3 : Analyse photothermique de La fresque du Saint Christophe

Dans le but de valider les résultats obtenus sur l'ensemble de la fresque à l'aide de la méthode photothermique, nous les avons comparés sur les figures 4, à ceux obtenus par analyse acoustique. Cette figure montre alors clairement que les signatures caractéristiques de défauts visibles par radiométrie photothermique correspondent à des zones de décollement détectées avec la méthode acoustique. Par ailleurs, ces figures 4 montrent que la méthode

photothermique permet une localisation plus fine de l'étendue des défauts. Enfin, le retour d'expérience montre que la méthode photothermique donne accès à une analyse plus rapide (analyse instantanée d'une surface importante), moins intrusive (pas de contact physique entre l'œuvre d'art et l'instrument d'analyse) et certainement plus objective (car ne dépendant pas de l'opérateur) que l'analyse acoustique.

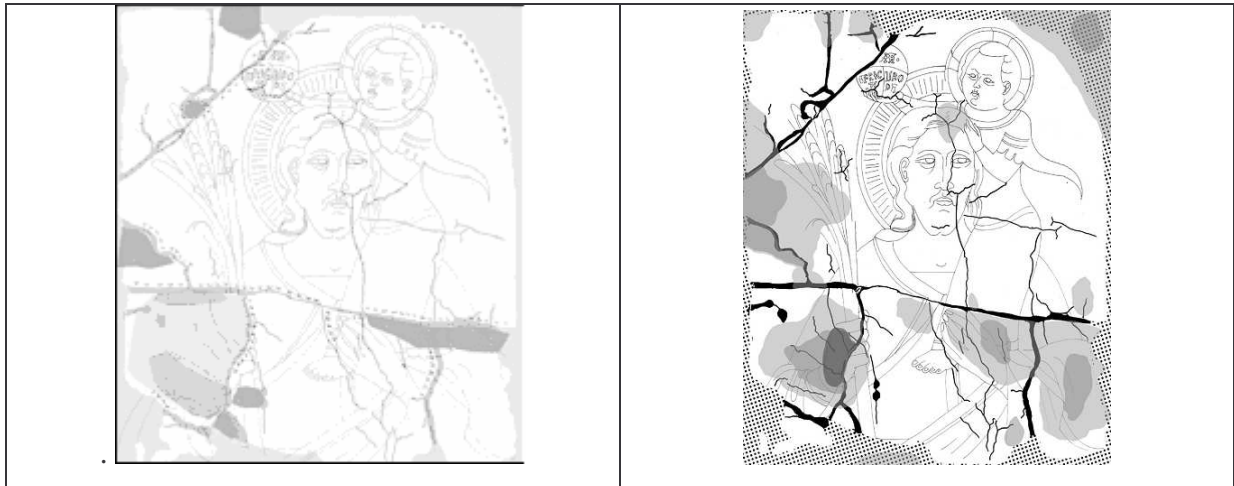


Figure 4 : Comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus lors de l'analyse photothermique (à gauche) et acoustique (à droite) du Saint Christophe

4.3 Analyse d'une fresque murale de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer

La troisième peinture murale que nous avons étudiée est une fresque de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer. Il s'agit de la fresque dénommée « hommage aux pécheurs de Sainte Marie » qui a été réalisée par Jean Cocteau en 1956-1957 (figure 5a). Cette étude menée *in situ* avait pour objectif d'approcher les possibilités de la méthode photothermique, en matière d'aide à la restauration de peintures murales, dans des conditions réelles d'analyses (présence de public – restaurateurs, scientifiques, grand public, ...-, fresques murales sur leurs supports, campagne d'étude de durée limitée, présence de poussière, température et humidité non contrôlées, ...). Cette peinture murale a d'abord été analysée par voie acoustique par Antoinette Sinigaglia (SINOPIA), restauratrice du patrimoine et chargée de la mission de restauration des peintures murales de l'église. Comme le montre la figure 5b, elle indique la présence d'un décollement de la couche picturale dans la partie basse de la fresque. Cette zone de la peinture murale a ensuite été analysée par voie photothermique aléatoire (excitation binaire pseudo aléatoire de 256 termes, période d'analyse de 15 secondes, reconstruction paramétrique de type ARMA prenant en compte 40 paramètres d'entrée et 40 paramètres de sortie). Le résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 5c. Cette figure montre une signature photothermique plus importante dans le bas du thermogramme reconstruit par analyse paramétrique, significative, comme expliqué précédemment, de la présence d'un défaut. Ce résultat totalement corrélé à l'analyse acoustique confirme les possibilités d'analyse d'œuvre d'art *in situ* de la méthode photothermique. La figure 5c montre aussi, par une définition plus fine du contour des défauts et donc, comme nous l'avons déjà remarqué lors des études précédentes, que la méthode photothermique semble permettre une détection plus précise de l'étendue spatiale des défauts, que l'analyse acoustique. Le retour d'expérience montre encore, comme déjà évoqué lors des analyses en laboratoire, que la méthode photothermique donne accès à une analyse plus rapide et moins intrusive et plus objective que l'analyse acoustique. Enfin, la possibilité d'une analyse à distance offerte par la technique infrarouge et donc la possibilité de pouvoir se passer d'un échafaudage auxiliaire par exemple en phase d'avant projet (visant le plus

souvent à dimensionner l'étendue physique mais aussi financière du travail de restauration) lors d'analyse de peintures murales situées en hauteur (voûte) a été perçu comme un vrai gain potentiel, tant au niveau temporel que financier par les restaurateurs professionnels

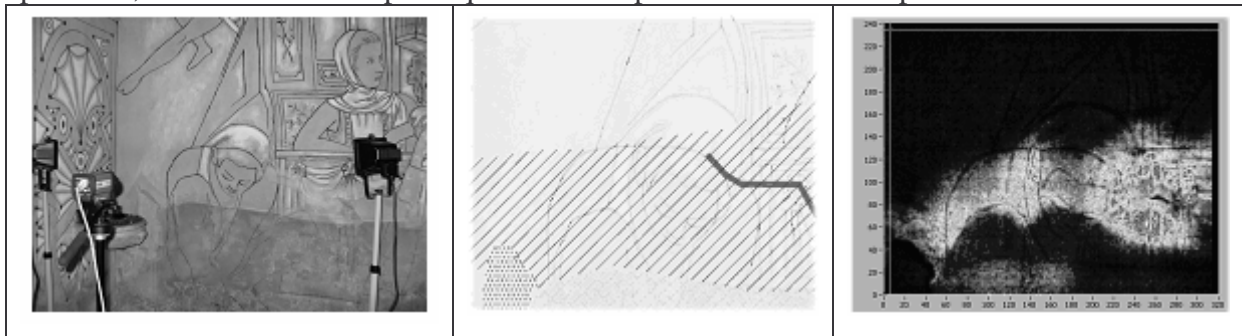


Figure 5 : Analyse photothermique de la peinture murale

« Hommage aux pêcheurs de Sainte Marie » de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer

4.4 Analyse d'une fresque murale de l'église abbatiale de Saint Savin sur Gartempe

La quatrième peinture murale que nous avons étudiée est la peinture murale du 11^{ème} siècle de la « Traversée du désert » de l'Abbaye de Saint Savin sur Gartempe (classée au patrimoine mondial de l'UNESCO – figure 6a). Il s'agissait là aussi d'approcher les possibilités de la méthode photothermique lors d'analyse in situ, sur échafaudage (à environ 20 m de hauteur), mais aussi parallèlement à de véritables travaux de restauration (poussière, vibrations des murs mais aussi de l'échafaudage, présence de sources radiatives parasites, ...), au froid (2°C de moyenne) et à l'humidité et enfin durant une période d'analyse limitée. La fresque a d'abord été analysée, comme dans les cas précédents, par voie acoustique par l'équipe de restaurateurs travaillant sur le chantier (Brice Moulinier). Elle a ensuite été analysée par voie photothermique aléatoire (excitation binaire pseudo aléatoire de 256 termes, période d'analyse de 15 secondes, reconstruction paramétrique de type ARMA prenant en compte 40 paramètres d'entrée et 40 paramètres de sortie). Sur les figures 6b et 6c, nous présentons les résultats obtenus dans ce cadre. La figure 6b concerne le relevé acoustique de l'équipe de restaurateurs. Elle fait apparaître deux défauts dans la zone analysée. L'image infrarouge reconstruite par radiométrie photothermique aléatoire est présentée sur la figure 6c. Elle fait apparaître quant à elle quatre signatures photothermiques significatives de la présence de défauts. Il y avait donc là une divergence entre les résultats obtenus. Comme, les analyses précédentes ont indiqué que l'analyse photothermique possédait une plus grande finesse de détection, que l'analyse acoustique, nous avons demandé à l'équipe de restaurateurs présente sur le chantier de procéder à une nouvelle inspection sonore. Cette inspection a alors bien indiqué la présence de quatre défauts comme détecté par analyse photothermique. Cette potentialité de détection plus précise donnée par la méthode photothermique a aussi été observée avec intérêt par les restaurateurs du patrimoine. En effet, un travail de restauration basé sur l'analyse acoustique initiale n'aurait conduit qu'au percement d'un seul trou pour procéder à l'injection du consolidant dans l'œuvre d'art. Le travail de restauration aurait alors été imparfait, puisqu'une seule cavité aurait alors été remplie. A la suite de l'analyse photothermique deux trous ont été percés à l'aplomb de chacune des poches d'air, pour permettre l'injection du consolidant. La restauration a alors été plus complète. Enfin, le retour d'expérience montre, là aussi, que la méthode photothermique donne accès une analyse plus rapide et moins intrusive que l'analyse acoustique.

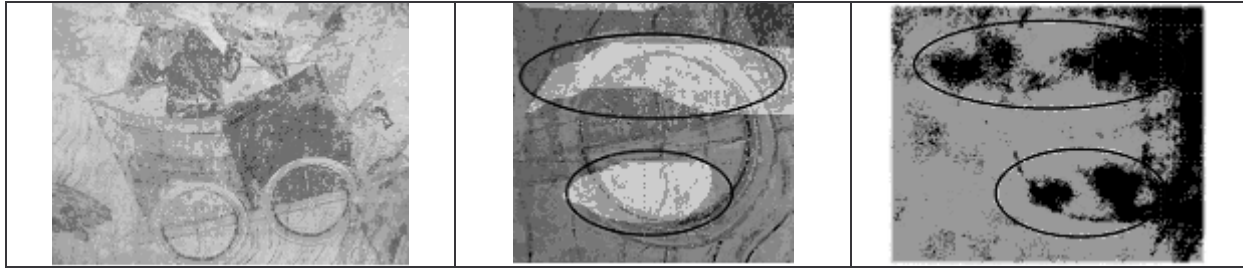


Figure 6 : Analyse photothermique de la peinture murale de la «traversée du désert » de l'Abbaye de Saint Savin sur Gartempe (classée au patrimoine mondial de l'UNESCO)

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons approché les possibilités de la thermographie infrarouge stimulée en matière d'aide à la restauration d'œuvres d'art du patrimoine. Nous avons d'abord montré la possibilité de détecter par cette technique, quatre inclusions de plastazote situées dans une mini fresque académique. Nous avons ensuite étudié une fresque déposée : le Saint Christophe de la collection Campana du Louvre. Les résultats alors obtenus confirment bien la possibilité de détection, par voie photothermique des altérations de la structure interne de l'œuvre. Ils montrent aussi que l'analyse photothermique est plus rapide, moins intrusive et certainement plus précise que l'analyse acoustique classique. Dans une deuxième étape, nous avons approché les possibilités de la méthode photothermique en conditions réelles de restauration. Pour cela, nous avons étudié in situ, la fresque de « la traversée du désert » de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe et la fresque « hommage aux pêcheurs de Sainte Marie » de l'église Saint Pierre de Villefranche sur Mer. Dans ce cadre, nous avons montré d'une part les possibilités d'analyse in situ de peintures murales offertes par l'analyse photothermique, puisque qu'ayant permis de détecter les défauts préalablement référencés par analyse acoustique. Nous avons confirmé d'autre part que l'analyse photothermique semble plus fine que l'analyse acoustique, puisque ayant permis de détecter deux poches d'air là où la voie acoustique n'en avait initialement détecté qu'une seule. Enfin, nous avons souligné le réel avantage temporel et financier que pouvait offrir une analyse optique à distance par rapport à une analyse acoustique développée sur échafaudage Ces résultats très encourageants demandent maintenant à être confirmés et complétés. Il y a d'abord à optimiser le protocole expérimental. Il y a ensuite à étudier les possibilités de la méthode photothermique lors de l'étude d'autres types d'œuvre d'art ou lors de suivis de restauration. Il y a encore à étudier les possibilités quantitatives de la méthode photothermique en matière de caractérisation de défauts. Il y a enfin à améliorer les procédures de dépouillements afin de mieux faire ressortir les informations photothermiques utiles et de faire disparaître les artefacts de détectations. Des études allant dans ce sens sont en cours

Références bibliographiques

- [1] W.Eposti, S. Levrero, G.Stella, actes de la 1^{ère} conférence internationale sur les essais non destructifs en conservation d'œuvres d'art, Rome, 1985, p. I/11.1-I/11.14.
- [2] G. Schirripa Spagnolo, G. Guattari, E. Grinzato: Frescoes Diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography, 6th World Conference on NDT, Rome, 1999, p. 385-398.
- [3] J.L. Bodnar: Le contrôle optique des matériaux par radiométrie photothermique aléatoire infrarouge, Revue REE, février 2007, pp 68-74
- [4] G. Szatanik, Etude et restauration d'une peinture murale représentant Saint Christophe (collection Campana, Louvre), mémoire de fin d'études, INP- département des restaurateurs, 2004.
- [5] J.C. Candoré, J.L Bodnar, V.Detaille, P. Grossel : Non destructive testing of works of art by stimulated infrared thermography, QIRT2008, Kracow 2-5 July 2008 Poland