

Contrôle non destructif des oeuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée : Etude de l'apport d'un post traitement fréquentiel à la réduction des effets optiques induits par la couche picturale

K. Mouhoubi¹, J.L. Bodnar¹, V. Detalle², J.M. Vallet³, T. Duvaut¹

¹ *GRESPI/ CATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02*

² *LRMH, 29 avenue du Paris, 77420 Champs sur Marne*

³ *CICRP, 21 rue Guibal, 13003 Marseille*

Résumé

Dans le cadre de la conservation et de l'aide à la restauration des biens culturels, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), le Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine (CICRP) et Le Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI) de l'Université de Reims développent de nouvelles méthodes d'aide à la restauration du patrimoine culturel. Cette collaboration a déjà montré, à l'aide de la thermographie infrarouge stimulée, la possibilité de détecter des déplacements situés dans de nombreuses peintures murales du patrimoine culturel [1-9]. L'un des problèmes rencontré au cours de ces études était toutefois, la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé. Cette différence de sensibilité pouvait, dans certains cas défavorables, conduire à des artefacts de détection. Dans le travail que nous présentons ici, nous montrons théoriquement puis expérimentalement, que l'association d'une analyse fréquentielle de type PPT (Pulse Phase Thermography [10-11]) à la thermographie infrarouge pulsée permet une réduction notable de cet effet optique perturbateur.

Nomenclature

a_n	Coefficient de Fourier
b_n	Coefficient de Fourier
f	Fonction
RI	Réponse impulsionnelle
RH	Réponse harmonique
t	Temps, s

<i>Symboles grecs</i>	
ω	Pulsation, $rad.s^{-1}$
<i>Indices et exposants</i>	
n	Indice courant

1. Introduction

Dans le cadre de la conservation et de l'aide à la restauration des biens culturels, le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), le Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine (CICRP) et Le Groupe de Recherche en Sciences Pour l'Ingénieur (GRESPI) de l'Université de Reims développent de nouvelles méthodes d'aide à la restauration du patrimoine culturel. Cette collaboration a déjà montré, à l'aide de la thermographie infrarouge stimulée, la possibilité de détecter des déplacements situés dans des peintures murales du patrimoine (murs peints de l'église Saint Florentin de Bonnet, plafonds peints de l'abbaye de Saint Savin sur Gartempe - classée au patrimoine mondial de l'UNESCO, ...) [1-9]. Toutefois, l'un des problèmes rencontrés au cours de ces études était la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé. Cette différence de sensibilité pouvait, dans certains cas défavorables, conduire à des artefacts de détection. Dans le travail que nous présentons ici, nous cherchons à réduire cet inconvénient. Pour cela, nous avons associé une analyse fréquentielle de type PPT (Pulse Phase Thermography [10-11]) à la thermographie infrarouge pulsée. En effet, nous pensons que les effets perturbateurs dus aux effets optiques induits par la couche picturale sont plutôt de nature énergétique alors que ceux dus à la présence de défauts sont aussi de nature temporelle. De ce fait, nous pensons que les images de phase, résultant d'un post traitement fréquentiel, permettront de réduire l'effet perturbateur optique. Pour tester cette hypothèse, nous avons procédé en deux étapes : Tout d'abord nous avons procédé à une série de simulations théoriques. Ensuite nous avons développé une série d'expérimentations. Ce sont la démarche suivie et les résultats obtenus dans ce cadre que nous présentons ici.

2. Principe de l'analyse fréquentielle utilisée

Le mode d'analyse fréquentielle que nous avons mis en place pour cette étude est une analyse de type PPT (pulse phase thermography). Elle consiste d'abord à éclairer brièvement l'œuvre d'art à analyser. Elle consiste ensuite à recueillir le signal photothermique émis par cette dernière. Il s'agit donc pour cette première étape, d'une analyse flash face avant classique. Cette première réponse permet déjà la détection d'éventuels défauts. Mais elle est de caractère énergétique. En effet le signal photothermique obtenu est proportionnel à l'échauffement induit par l'excitation flash. Il est donc sensible aux effets optiques induits par la couche picturale de l'œuvre d'art étudiée ou à une inhomogénéité de dépôt d'énergie. C'est justement ce que l'on veut réduire. On ne peut donc se contenter de travailler avec ce premier type de réponse. Il faut lui ajouter un post traitement permettant de faire apparaître un paramètre peu sensible à l'énergie déposée. Or le principe de Fourier indique que toute fonction mathématique peut être modélisée par une somme de fonctions trigonométriques (1)

$$f(t) = \sum_{n=0}^N a_n \cos n\omega t + \sum_{n=0}^N b_n \sin n\omega t \quad (1)$$

Cette représentation dans l'espace des fonctions trigonométriques, appelé espace de Fourier, fait alors apparaître pour chaque fréquence deux paramètres caractéristiques l'amplitude et la phase de la fonction analysée. L'intérêt de cette nouvelle représentation du signal photothermique est double. D'abord, elle donne accès à deux paramètres caractéristiques ce qui permet de réduire les artéfacts de détection. Elle permet aussi de donner accès à la phase du signal photothermique. Ce paramètre permet de mesurer le retard de la réponse photothermique par rapport à l'excitation. Il est donc de nature temporelle et non plus de nature énergétique. Il est donc être par nature, bien moins sensible aux effets optiques induits par la couche picturale (de couleurs différentes) de l'œuvre d'art étudiée. Cela explique son utilisation dans ce travail. Le principe de l'analyse fréquentielle mise en œuvre dans cette étude consiste donc, après l'analyse flash, à calculer la transformée de Fourier du signal photothermique recueilli pour obtenir la réponse harmonique (images d'amplitude et de phase) multi fréquentielle de l'œuvre d'art étudiée (2).

$$RH(f) = TF [RI(t)] \quad (2)$$

3. Etude théorique

Afin de tester notre approche, nous avons d'abord développé une série de simulations. Elles mettent en œuvre la méthode des éléments finis pour modéliser l'expérience photothermique associée à l'étude. L'échantillon analysé (figure 1) est un bloc de plâtre (car ses propriétés thermophysiques sont très proches de celles d'une peinture murale du patrimoine). Ses dimensions géométriques sont une longueur de 160 mm, une largeur de 120 mm et une épaisseur de 20 mm. Ses propriétés thermophysiques sont une conductivité thermique de 0,4 W/mK, une masse volumique de 1100 kg/m³, une capacité calorifique de 830 J/kg K soit une diffusivité thermique de 4,38 10⁻⁷ m²/s. Afin de simuler la présence de déplacages, nous avons considéré six lames d'air placées dans cet échantillon. Nous avons considéré que ces défauts étaient parallélépipédiques et qu'ils avaient les mêmes dimensions géométriques. Leur longueur et leur largeur sont égales à 20 mm. Leur épaisseur est égale à 4 mm. Leurs profondeurs varient de 2 mm à 12 mm par pas de 2 mm (le balayage de l'échantillon se fait de haut en bas puis de la gauche vers la droite). Les propriétés thermophysiques prises en compte pour ces défauts, sont celles de l'air à 20°C : Une conductivité thermique de 0,026 W/mK, une masse volumique de 1,17 kg/m³, une capacité calorifique de 1006 J/kg K soit une diffusivité thermique de 2,22 10⁻⁵ m²/s. Enfin pour simuler, les effets optiques induits par la couche picturale, nous avons d'une part, partagé la surface de notre échantillon en deux parties. La première recouvre les défauts situés à 4 mm, 8 mm et 12 mm de profondeur. La seconde recouvre donc les défauts situés à 2 mm, 6 mm et 10 mm de profondeur. Nous avons d'autre part imposé sur la seconde un flux 1,5 fois plus énergétique que sur la première. Le type de signal d'excitation considéré est un créneau. Sa durée est égale à 2 secondes. La durée d'analyse est égale à 200 secondes. La fréquence d'acquisition est égale à 1 Hertz. La densité d'énergie déposée est égale à 1500 W. Enfin nous avons considéré, un modèle sans pertes.

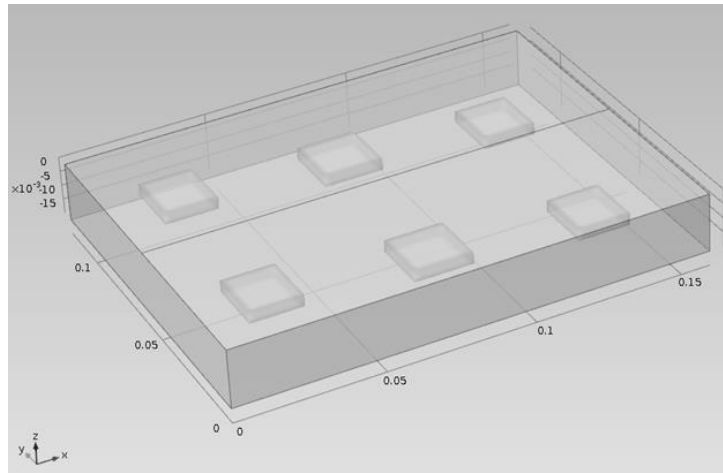


Figure 1 : Vue de l'échantillon étudié théoriquement

Sur la figure 2, nous présentons les thermogrammes obtenus à $t = 28$ s, $t = 91$ s, $t = 177$ s et $t = 200$ s. Ils montrent, comme attendu une signature photothermique plus importante à l'aplomb des défauts. Ils montrent aussi que ces signatures temporelles sont très perturbées par l'inhomogénéité de dépôt d'énergie.

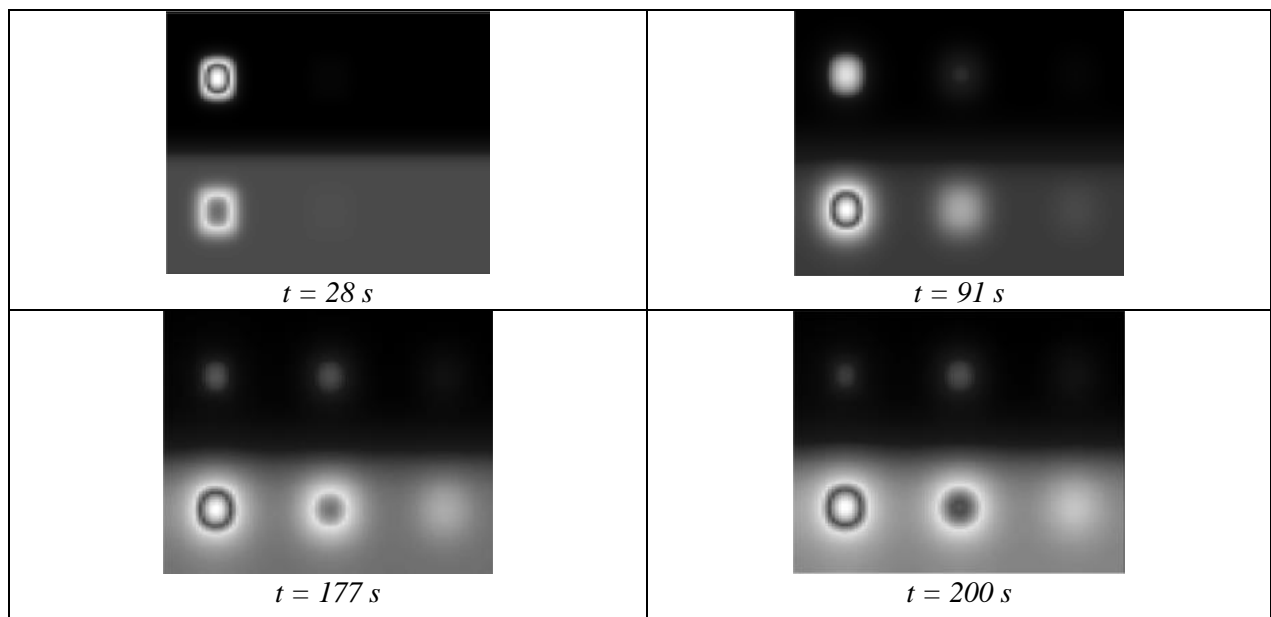


Figure 2 : Exemple de thermogrammes théoriques obtenus
($t = 28$ s, $t = 91$ s, $t = 177$ s et $t = 200$ s)

Sur les figures 3 et 4, nous présentons ensuite les résultats obtenus après une analyse fréquentielle de type PPT. La figure 3 représente les images d'amplitude du signal photothermique obtenu. Elles correspondent respectivement aux fréquences de 5 mHz, 10 mHz, 20 mHz, 30 mHz, 40 mHz et 80 mHz. Elles montrent que ces signatures permettent bien la détection des défauts, mais aussi qu'elles sont encore très sensibles aux inhomogénéités de dépôt d'énergie.

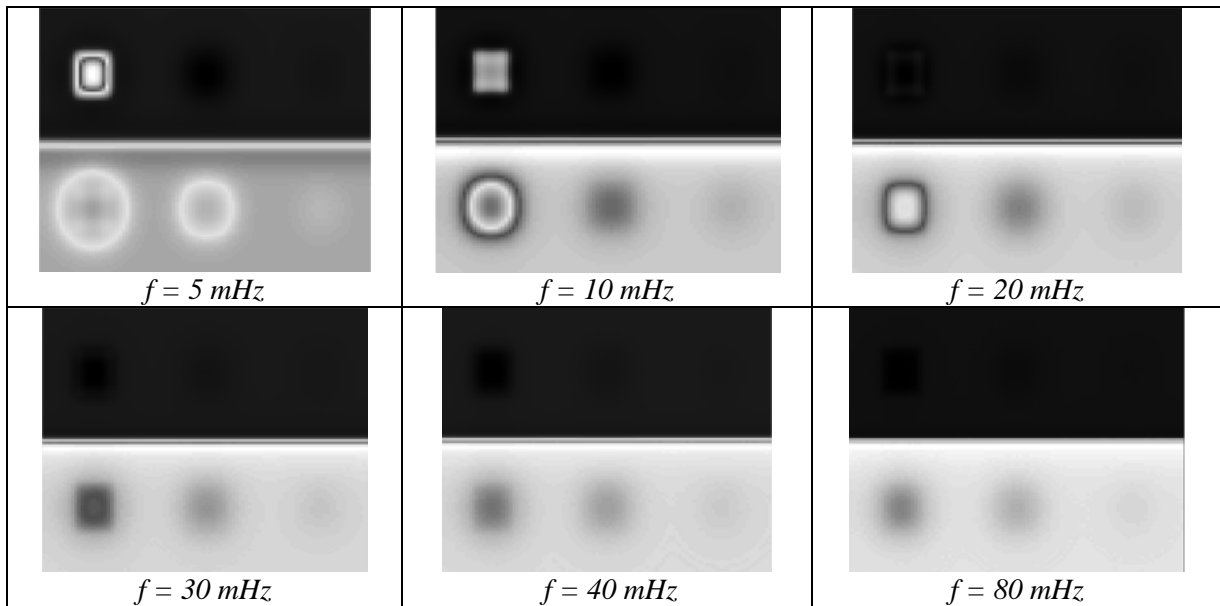


Figure 3 : Images d'amplitude de la réponse harmonique calculée

La figure 4 présente, pour les mêmes fréquences, les images de phase obtenues. Elles montrent d'une part là aussi, la possibilité de détecter les six défauts présents dans l'échantillon étudié. Elles montrent d'autre part, une bonne rejection des effets optiques induits par la couche picturale. On observe en effet, une signature photothermique assez homogène des parties saines de l'échantillon étudié. Le post traitement fréquentiel PPT, semble donc théoriquement, bien permettre pouvoir une meilleure détection des défauts situés dans une peinture murale, via une rejection partielle des effets optiques induits par la couche picturale.

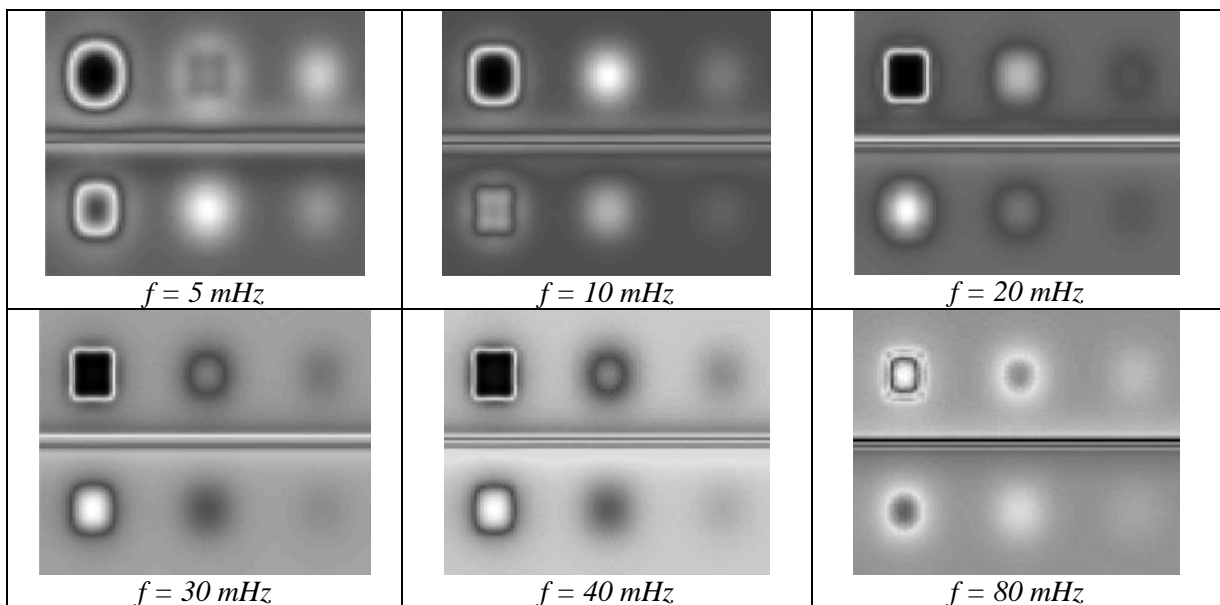


Figure 4 : Images de phase de la réponse harmonique calculée

4. Etude expérimentale

Suite à cette étude théorique encourageante, nous sommes passés à une étude expérimentale. L'échantillon étudié dans ce cadre est présenté sur la figure 5. Il s'agit d'un bloc de plâtre recouvert d'une couche picturale composée de 20 motifs carrés de couleurs

différentes. Le choix de ces couleurs visait d'une part à couvrir le spectre visible (violet, bleu vert, jaune, orange, rouge). Il visait d'autre part à prendre en compte des propriétés radiatives opposées. Ainsi la couleur noir permet de prendre en compte une forte absorptivité. La couleur blanche permet de prendre en compte une forte diffusion. Enfin, la couleur argentée permet de prendre en compte une forte réflectivité. Ces différentes couleurs entraineront donc, comme nous le cherchons lors de l'analyse photothermique, une inhomogénéité spatiale d'absorption d'énergie. Les dimensions géométriques de ce bloc de plâtre sont une largeur de 68 cm, une hauteur de 50 cm et une épaisseur de 5 cm. 32 inserts de polystyrène extrudé ont été introduits dans cet échantillon. Il s'agit de disques de 20 mm de diamètre et de 2 mm d'épaisseur. Ils ont été placés à une profondeur de 5 mm. Ils ont été répartis de façon à couvrir l'ensemble de la surface de l'échantillon étudié.

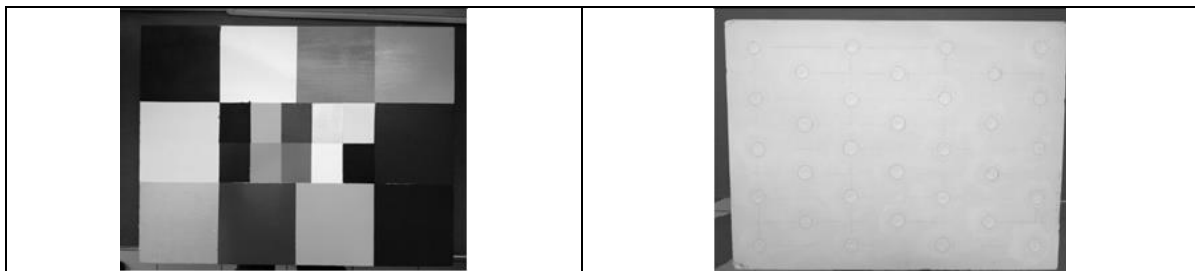


Figure 5 : L'échantillon analysé

Cet échantillon a été analysé avec le système SAMMTHIR du laboratoire. Ce dernier comporte trois parties principales. Il est d'abord composé d'un couple de lampes à halogènes pour exciter l'échantillon étudié. Il est ensuite composé d'une caméra de thermographie infrarouge à bolomètres de type SC655, pour recueillir le signal photothermique. Il est enfin composé d'une électronique et d'une informatique de pilotage et d'acquisition des données.

Les conditions expérimentales retenues pour l'étude, sont les suivantes : Tout d'abord la caméra de thermographie est située face à l'échantillon étudié à une distance d'environ 150 cm. Les sources lumineuses sont placées de part et d'autre de la caméra de façon à éclairer de façon symétrique et homogène l'échantillon étudié. Elles éclairent approximativement l'échantillon étudié sous un angle de 45 degrés. La distance échantillon – source lumineuse est d'environ 60 cm. La puissance de ces lampes est de 500 W. Le type d'excitation est de type créneau. La durée d'excitation est égale à 1 minute. La durée d'analyse est égale à 194 s. La fréquence d'acquisition du signal photothermique est de 1 Hz. Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 6. Il s'agit des thermogrammes bruts obtenus aux instants $t = 10$ s, $t = 60$ s et $t = 120$ s. Ils montrent clairement la possibilité de détecter la majeure partie des inserts isolants présents dans l'échantillon étudié. Ils montrent aussi très clairement l'influence importante de la couche picturale sur le signal photothermique recueilli.

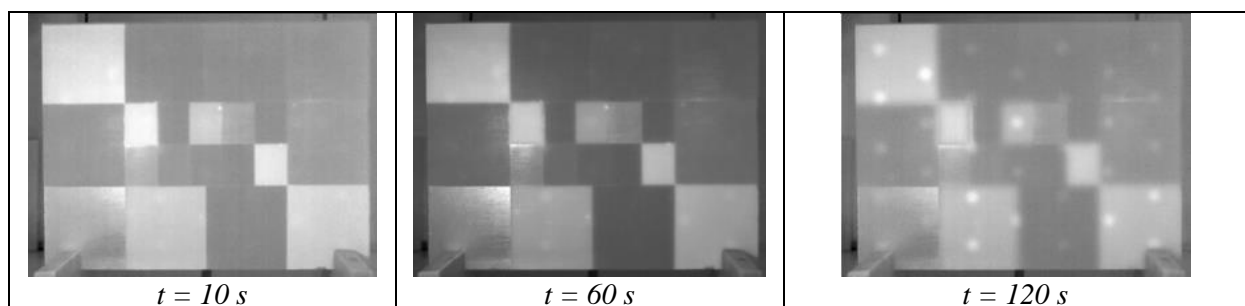


Figure 6 : Exemple de thermogrammes expérimentaux obtenus (à $t = 10$ s, $t = 60$ s et $t = 120$ s)

Sur les figures 7 et 8, nous présentons ensuite les résultats obtenus après une analyse fréquentielle de type PPT. La figure 7 représente les images d'amplitude du signal photothermique obtenu. Elles correspondent respectivement aux fréquences de 5,15 mHz, 10,30 mHz et 0,9 Hz. Elle montre comme attendu théoriquement que ces signatures permettent une détection partielle des défauts, mais aussi qu'elles sont encore très sensibles aux inhomogénéités de dépôt d'énergie.

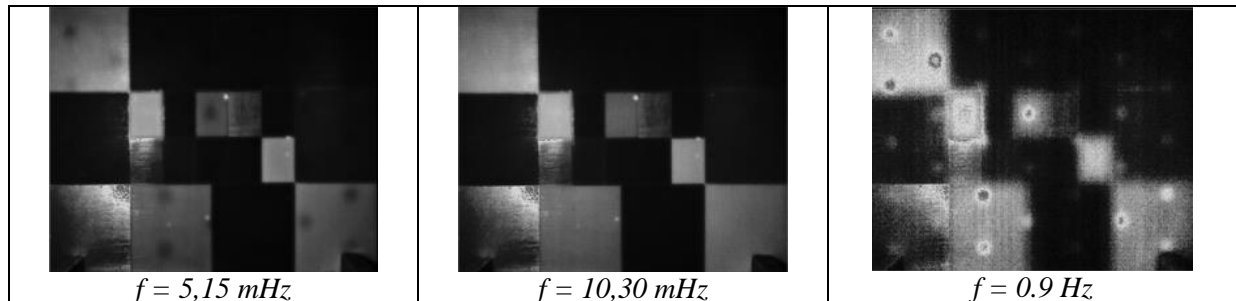


Figure 7 : Images d'amplitude de la réponse harmonique calculée

La figure 8 présente, pour les mêmes fréquences, les images de phase obtenues. Elles montrent d'une part la possibilité de détecter quasiment l'ensemble des défauts situés dans l'échantillon étudié. Elles montrent d'autre part, une importante rejection des effets optiques induits par la couche picturale, ce qui était le but recherché.

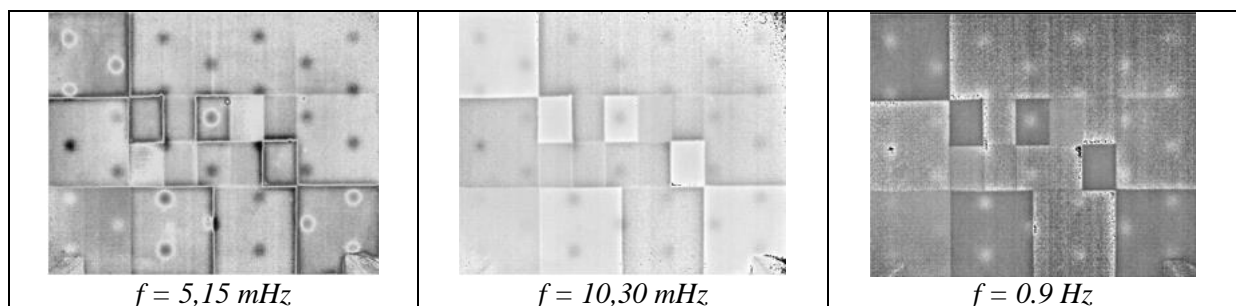


Figure 8 : Images de phase de la réponse harmonique calculée

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons approché l'apport d'une analyse fréquentielle de type PPT à la thermographie infrarouge flash pour améliorer l'aide à la restauration et à la conservation d'œuvres d'art.

Nous avons d'abord rappelé que si le contrôle non destructif de ces œuvres d'art par thermographie infrarouge stimulé était déjà très performant, il pouvait être gêné par les couleurs différentes de la couche picturale.

Nous avons ensuite présenté le principe de notre approche. Cette dernière consiste à considérer que les perturbations apportées par une inhomogénéité de dépôt d'énergie pourraient être atténuées par une analyse temporelle des signaux photothermiques recueillis. Dans notre cas, cette analyse temporelle se caractérise par une analyse des images de phase de la réponse harmonique multi fréquentielle calculée par transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle obtenue par analyse flash.

Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons alors développé une étude théorique basée sur la modélisation numérique à l'aide de la méthode des éléments finis de l'expérience photothermique. Nous avons alors montré d'une part que les images d'amplitude permettent

une bonne détection des défauts, mais qu'elles restent très sensibles aux effets optiques induits par la couche picturale. Nous avons montré d'autre part, que les images de phases permettent une bonne détection des défauts mais aussi une réduction importante de ces effets optiques induits par la couche picturale.

Enfin, nous avons développé une étude expérimentale pour confirmer les résultats théoriques obtenus. Nous avons alors montré, lors de l'étude d'une peinture murale multicolore à l'aide du système SAMMTHIR du laboratoire, que les images de phase de la réponse harmonique obtenue permettent bien une rejection importante des effets optiques induits par les différentes couleurs de la couche picturale.

Ces résultats, très encourageants, semblent permettre l'amélioration du contrôle non destructif des œuvres d'art par thermographie infrarouge stimulée. Ils demandent maintenant d'une part, à être généralisés. Ils demandent d'autre part à être confirmés lors d'analyse in situ. Des études allant dans ce sens sont en cours.

Références

- [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 thesis, 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] 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, (2010), 012068
- [5] 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.
- [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, 49, pp 40-46, 2012.
- [7] V. Tornari, E. Bernikola, E. Tsiranidou, K. Hatzigiannakis, M. Andrianakis, V. Detalle and J.L Bodnar : Micro-mapping of Defect Structural Micro-morphology in the Documentation of Fresco Wallpaintings, International Journal of Heritage in the Digital Era, vol 2, n° 1, 2013, pp 1 – 23.
- [8] 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, (2012), Vol 33, pp 1996-2000.
- [9] J.L. Bodnar, K. Mouhoubi, L. Di Pallo, V. Detalle, J.M. Vallet, T. Duvaut : Contribution to the improvement of heritage mural painting non-destructive testing by stimulated infrared thermography, European physical journal : Applied physics, (2013), 64, 11001
- [10] X. Maldague et S. Marinetti, « Pulse phase infrared thermography », J. Appl. Phys., vol. 79, n° 5, p. 2694–2698, 1996.
- [11] X. Maldague, F. Galmiche, et A. Ziadi, « Advances in pulsed phase thermography », Infrared Phys. Technol., vol. 43, n° 3, p. 175–181, 2002.