

Aide à la restauration d'œuvres d'art du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée : Contribution à la réduction des effets optiques induits par la couche picturale

K. Mouhoubi¹, J.L Bodnar¹, M. Pommies², V. Detalle³, J.M. Vallet⁴, T. Duvaut¹

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

² Measurement Control Department, Arcelor Mittal, BP 30320, 57283 Maizières -lès-Metz

³ Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, 29 avenue du Paris, 77420 Champs sur Marne

⁴ Centre Interdisciplinaire de Conservation et Restauration du Patrimoine, 21 rue Guibal, 13003 Marseille

Résumé

Le contrôle non destructif des peintures murales du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée est déjà relativement performant [1-10]. Toutefois, les propriétés radiatives différentes des pigments constituant la couche picturale, peuvent conduire à des artefacts de détection. Dans le travail que nous présentons ici, nous cherchons à réduire cet inconvénient. A l'aide d'une étude spectroscopique de différentes couches picturales, nous montrons d'abord, que dans le domaine de l'infrarouge moyen, cette disparité radiative diminue notablement. Nous montrons ensuite, à l'aide de l'étude d'un échantillon académique puis d'une copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers, que l'association d'une source d'excitation émettant dans le domaine des infrarouges moyens à notre dispositif expérimental SAMMTHIR, permet un gain notable en termes de détection de défauts.

Nomenclature

L : Luminance, W / Sr.m²

T : Température, K

α : Absorptivité

λ : Longueur d'onde, m

ρ : Réflectivité

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, ...) [5-10]. L'un des problèmes rencontré au cours de ces études était la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé (Celui-ci, du fait de l'utilisation d'un couple de lampes à halogènes était réparti dans le domaine spectral du visible / proche infrarouge). 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 essayons de déterminer une plage spectrale d'analyse dans laquelle les propriétés radiatives des différents pigments d'une même couche picturale sont plus proches les unes des autres que dans le spectre visible / proche infrarouge. Notre présentation se décompose en quatre parties. Nous mesurons d'abord les propriétés radiatives de différentes peintures murales monochromes. Nous montrons alors que ces propriétés radiatives se rapprochent notablement dans le domaine de l'infrarouge moyen. Nous tirons ensuite partie de ce résultat en associant à notre dispositif expérimental, des

sources d'excitation émettant dans ce domaine spectral. Enfin, nous montrons que cette évolution expérimentale permet, lors de l'étude d'un échantillon académique puis d'une copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers, un gain notable en termes de détection de défauts.

2) Etude des propriétés radiatives de peintures murales du patrimoine

2.1) Présentation du spectroradiomètre à large bande utilisé

Dans le but d'étudier les propriétés radiatives de peintures murales du patrimoine, nous avons utilisé le spectroradiomètre large bande du département de recherche « Mesure et Contrôle » du groupe ArcelorMittal. Ce dispositif expérimental est constitué par l'association d'un spectroradiomètre large bande, d'une sphère intégrante, d'un corps noir et d'échantillons de références. Le spectroradiomètre permet l'analyse de l'énergie radiative réfléchie par l'échantillon étudié dans une direction donnée et dans une bande spectrale s'étendant de $1\mu\text{m}$ à $14.5\mu\text{m}$. Des échantillons en Spectralon, en Infragold et un miroir en or, possédant des réflectivités spectrales hémisphériques directionnelles parfaitement connues, servent de références radiatives. La source radiative utilisée est un corps noir. Elle est portée à $1100\text{ }^\circ\text{C}$. Elle éclaire une sphère intégrante via un orifice d'environ 2 cm de diamètre. Devant un second orifice, de mêmes dimensions, sont placés successivement les échantillons à étudier et les échantillons de références. Ils sont donc éclairés par une lumière parfaitement diffuse. Enfin en face d'un troisième orifice de la sphère intégrante, est placé le dispositif de mesure : le spectromètre large bande (figure 1).

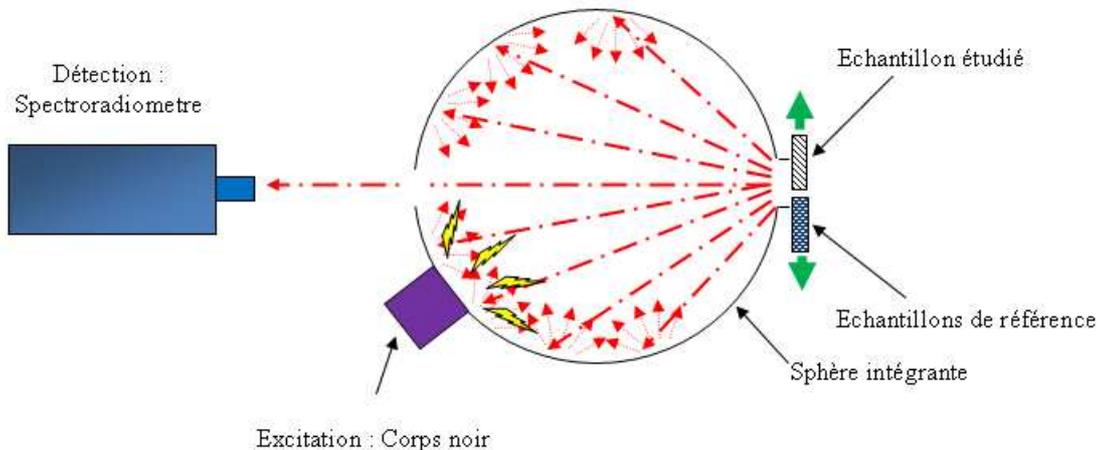


Figure 1 : Le spectroradiomètre à large bande utilisé

Ce spectromètre mesure la réflectivité spectrale hémisphérique directionnelle de l'échantillon étudié. Ces échantillons étant opaques, l'absorptivité spectrale hémisphérique directionnelle de l'échantillon étudié est donc le complément à 1 de cette réflectivité spectrale hémisphérique directionnelle (1).

$$\alpha_{\lambda}^{\wedge'} = 1 - \rho_{\lambda}^{\wedge'} = 1 - \frac{L_{ech}(\lambda, T) - L_{bruit}(\lambda, T)}{L_{réf}(\lambda, T) - L_{bruit}(\lambda, T)} \cdot \rho_{réf, \lambda} \quad (1)$$

2.2) Les échantillons étudiés

Les échantillons étudiés sont des peintures murales réalisées à la fresque selon la technique des primitifs Italiens. Ce sont des échantillons parallépipédiques réalisés dans un

mélange de chaux et plâtre. Leurs dimensions sont approximativement les mêmes et valent environ 15 cm de longueur, 7,5 cm de largeur et 3 cm d'épaisseur. Chaque échantillon est recouvert d'une couche picturale monochrome. Celle-ci varie d'un échantillon à l'autre. Elles comprennent respectivement du lapis lazuli, de la malachite, de l'ocre jaune (figure 2), du noir d'os, du vert de chrome, du bleu de Prusse, du cinabre, du jaune de plomb, de la laque de garance et du badigeon. Ces couleurs permettent de couvrir approximativement l'ensemble du spectre visible et sont représentatives de celles couramment utilisées par les artistes peintres.



Figure 2 : Exemple de couche picturale étudiée : Un ocre jaune déposé à la fresque

2.3) Les propriétés radiatives obtenues

Ces douze peintures murales ont été analysées à l'aide du spectroradiomètre à large bande présenté précédemment. Les spectres obtenus sont présentés sur la figure 3. Elle montre d'une part que les propriétés radiatives des différents pigments sont, comme nous le supposions, très différentes les unes des autres dans le très proche infrarouge. Le flux lumineux apporté par l'analyse photothermique sera alors absorbé de façon différente selon les couleurs de la couche picturale, ce qui pourra conduire, dans des cas défavorables, à des artefacts de détection. La figure 3 montre d'autre part, que dans la bande « ondes longues » ($8\mu\text{m}$ - $12\mu\text{m}$) des caméras de thermographie infrarouge, ces valeurs d'absorptivité spectrale hémisphérique directionnelle sont très faiblement dispersées autour de 0.9. Ce résultat est très important, car il justifie l'utilisation d'une caméra de thermographie infrarouge « ondes longues » pour l'analyse des peintures murales du patrimoine. En effet, le signal photothermique émis dans cette bande spectrale est quasiment indépendant des propriétés radiatives de la couche picturale et ne sera donc pas perturbé par cette dernière. Enfin, la figure 3 montre qu'à partir d'une longueur d'onde d'environ $3\mu\text{m}$, les valeurs de propriétés radiatives sont plus proches les unes des autres que dans le domaine de l'infrarouge moyen. C'est donc à partir de cette longueur d'onde qu'il faudra exciter l'œuvre d'art à étudier pour limiter l'influence potentiellement perturbatrice de sa couche picturale. Comme il faut par ailleurs, que l'excitation ne perturbe pas la détection, cette étude montre que le signal photothermique excitateur doit être délivré entre environ $3\mu\text{m}$ et $8\mu\text{m}$ pour permettre une analyse optimale des peintures murales du patrimoine. Ce n'était pas le cas de notre dispositif expérimental. Il y avait donc à le faire évoluer.

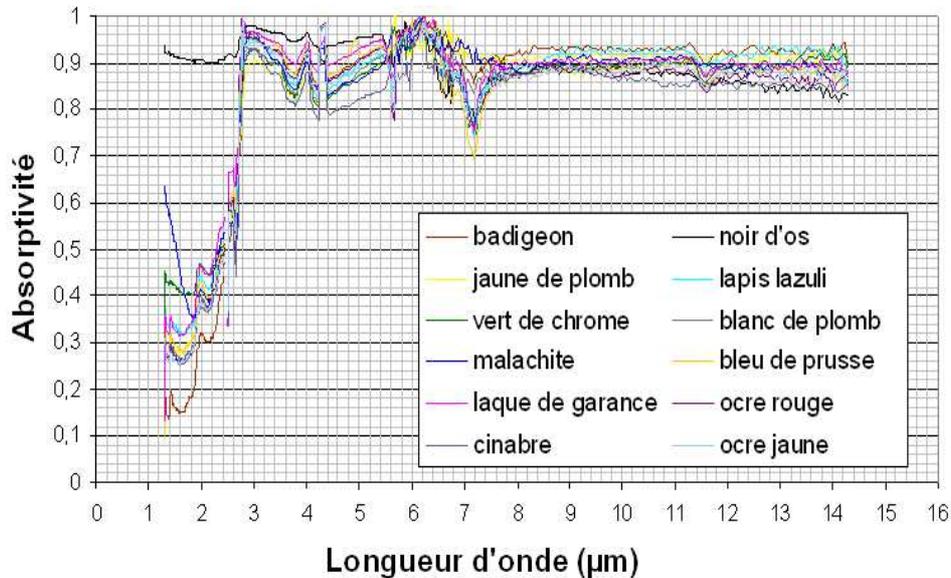


Figure 3 : Les propriétés radiatives des peintures murales étudiées

3) Etude expérimentale de la réduction des effets optiques induits par la couche picturale.

3.1) Les dispositifs expérimentaux mis en œuvre

A la suite de l'étude radiative précédente, nous avons fait évoluer notre dispositif expérimental, et étudié en termes de contrôle non destructif, le gain apporté par une modification spectrale du flux excitateur. La version de base du système d'Analyse des Matériaux Minces par Thermographie InfraRouge (SAMMTHIR) du laboratoire est la suivante : La source d'excitation est constituée d'un couple de lampes halogènes, d'une puissance unitaire de 500W. Leur bande spectrale d'émission s'étend du visible au proche infrarouge. L'optique d'acquisition infrarouge est constituée d'une caméra à bolomètres « ondes longues ». Cette dernière est placée perpendiculairement à l'échantillon, à une distance d'environ 50 cm. Les sources lumineuses sont placées symétriquement et de façon inclinée, de part et d'autre de cette caméra. Cette version de base est celle que nous avons classiquement utilisée jusqu'à maintenant [5-10]. Dans la nouvelle version du système SAMMTHIR, nous avons remplacé le couple de lampes à halogènes par un couple de lampes émettant dans l'infrarouge moyen. Ces nouvelles sources d'excitation sont constituées d'un fil résistif noyé dans de la céramique. Elles ont un pic d'émission situé à 4,4 μm et ont une puissance unitaire de 250 W.

3.2) Etude d'un échantillon académique

Dans le but d'étudier l'apport des nouvelles sources, nous avons analysé de façon comparative, une peinture murale académique avec les deux variantes du système SAMMTHIR : Excitation visible / proche infrarouge et excitation infrarouge moyen. Cette peinture murale académique est composée d'un bloc de chaux / plâtre recouvert *al fresco*, d'une couche picturale. Ses dimensions sont : une longueur de 9 cm, une largeur 4,8 cm et enfin une épaisseur de 1,8 cm. Il comprend trois inclusions de plastazote de 4,8 cm de longueur, de 1 cm de largeur et 0,5 cm d'épaisseur. Ces inclusions sont situées respectivement à 0,25 cm, 0,5 cm et 1 cm de profondeur et sont parallèles à la surface. Elles sont placées à respectivement 2,5 cm, 5 cm et 7,5 cm du bord gauche de l'échantillon. Enfin, la couche

picturale est composée de trois bandes colorées approximativement d'égale largeur et de 9 cm de longueur. Les couleurs composant cette couche picturale sont le noir, l'ocre jaune et l'ocre brun (figure 4).



Figure 4 : La peinture murale académique étudiée

Cet échantillon a été étudié respectivement à l'aide du système SAMMTHIR traditionnel puis à l'aide du dispositif mettant en œuvre les nouvelles sources infrarouges. Dans les deux cas, les durées d'excitation et d'analyse étaient respectivement égales à 60 s et à 240 s. Dans le premier cas, la puissance excitatrice était égale à $2 * 500$ W alors que dans le second cas, elle était égale à $2 * 250$ W. Sur les figures 5 et 6, nous présentons un exemple de résultat obtenu. Il correspond aux thermogrammes obtenus 65 s après la fin de l'excitation. C'est l'instant qui fournit le meilleur contraste. La figure 5 correspond à l'analyse traditionnelle. Elle fait d'abord apparaître, une signature photothermique plus importante à l'endroit des trois défauts. La méthode permet donc bien la détection de ces derniers. Elle fait ensuite apparaître, une signature non uniforme à l'aplomb d'un même défaut, alors que la profondeur de ce dernier est constante. Cette non uniformité est dû aux absorptivités radiatives différentes des pigments de la couche picturale. La bande noire absorbe plus d'énergie que la bande ocre brun qui absorbe elle-même plus d'énergie que la bande ocre jaune. Cela engendre donc des élévations de températures différentes selon les bandes et par conséquent des signatures photothermique elles aussi différentes. Cela peut alors fausser l'interprétation des résultats. Il est en effet possible de conclure, à la lecture de cette image que les défauts détectés sont inclinés par rapport à la surface analysée alors que ce n'est pas le cas. En effet, les parties les plus proches de la surface donnent classiquement, des signatures photothermiques plus intenses que les parties les plus profondes. Ce possible artefact de détection est une limitation de cette variante expérimentale. Il y avait à essayer de le réduire.

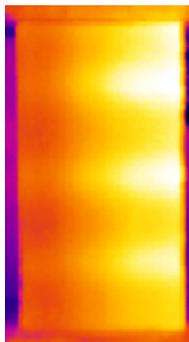


Figure 5 : Analyse d'une peinture murale académique à l'aide du système SAMMTHIR associé à une excitation halogène

La figure 6 correspond à l'analyse de la peinture murale académique à l'aide du système SAMMTHIR associé à une excitation infrarouge moyen. Elle fait apparaître un thermogramme différent de celui obtenu dans l'étude précédente. Elle fait d'abord apparaître, une signature photothermique plus importante à l'aplomb des trois inclusions de plastazote, ce qui permet, comme précédemment, leur détection. Elle fait apparaître d'autre part et

contrairement au cas précédent, des signatures photothermiques uniformes à l'aplomb d'un même défaut. Ce résultat est la conséquence d'une absorption plus uniforme du flux excitateur. Ce résultat est par ailleurs, caractéristique de défauts parallèles à la surface étudiée, comme c'est le cas ici. Ce résultat montre donc clairement, en terme de qualité de détection de défauts, l'intérêt de l'évolution expérimentale apportée au système SAMMTHIR.

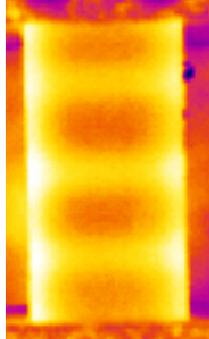


Figure 6 : Analyse d'une peinture murale académique à l'aide du système SAMMTHIR associé à une excitation infrarouge moyen

3.3) Etude d'une copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers.

A la suite de cette étude positive, nous avons procédé à une nouvelle comparaison des deux configurations expérimentales possibles, lors de l'étude d'une copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers. Les caractéristiques de cette peinture murale sont les suivantes : Elle est faite d'un mortier de chaux et de sable. Ses dimensions sont 15 cm de côté et 1,5 cm d'épaisseur. La couche picturale, réalisée à la fresque est composée de différents pigments : vermillon, minium, lapis lazuli, ocre jaune, noir de charbon, blanc de plomb, malachite, mixtion à la feuille d'or (figure 7).



Figure 7 : La fresque étudiée

Cette peinture murale contient 5 inclusions de polystyrène extrudé de 30 mm de diamètre et d'environ 1mm d'épaisseur. Ces défauts sont situés à des profondeurs de 2 mm, 3mm, 4mm, 5mm et 6 mm (figure 8).



Figure 8 : Position des défauts

Cette fresque a été étudiée, comme précédemment, à l'aide des deux variantes du système SAMMTHIR, d'abord à l'aide de sources à halogènes, puis à l'aide de sources à infrarouges moyens. Les conditions expérimentales retenues sont identiques pour les deux configurations. La durée d'excitation est de 60 s et la durée d'analyse est de 240 s. Les puissances d'excitation mises en œuvre sont de $2 * 500$ W dans le premier cas et de $2 * 250$ W dans le second cas. Sur les figures 9 et 10, nous présentons les thermogrammes obtenus 65 secondes après le début de l'étude. Ils correspondent aux thermogrammes offrant le meilleur contraste. La figure 9 correspond à l'excitation visible / proche infrarouge. Elle montre d'une part, une signature plus importante à l'endroit des quatre défauts périphériques, permettant ainsi leur détection. Elle montre ensuite une ébauche de signature photothermique particulière à l'emplacement du défaut central. Toutefois, sans connaissance a priori, il serait difficile d'associer cette signature à la présence d'un délaminage. Elle montre encore la présence notable et gênante de la signature photothermique de la couche picturale. Elle montre enfin que l'intensité des signatures photothermiques est d'autant plus importante que le défaut est proche de la surface, ce qui ouvre la voie à la caractérisation de ces derniers.

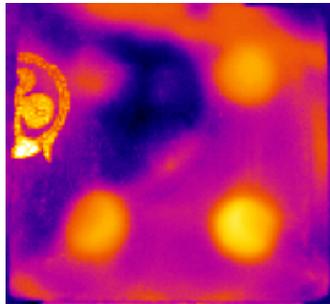


Figure 9 : Analyse de la copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers à l'aide du système SAMMTHIR associé à une excitation halogène

La figure 10 correspond à l'excitation dans l'infrarouge moyen. Elle montre d'une part une signature plus importante à l'endroit des cinq défauts présents dans l'oeuvre d'art (et non plus quatre comme dans le cas précédent), permettant ainsi leur détection. Elle montre d'autre part, que l'influence de la couche picturale sur le signal photothermique est limitée à la réponse du trèfle situé à gauche de l'oeuvre d'art et qu'elle est bien moins gênante que dans la configuration expérimentale précédente. Elle montre enfin, comme précédemment, que l'intensité des signatures photothermiques est d'autant plus importante que le défaut est proche de la surface, ce qui ouvre là aussi la voie à la caractérisation de ces derniers. Ces résultats confirment clairement les précédents et donc l'intérêt de l'évolution expérimentale proposée pour le contrôle non destructif des peintures murales du patrimoine.

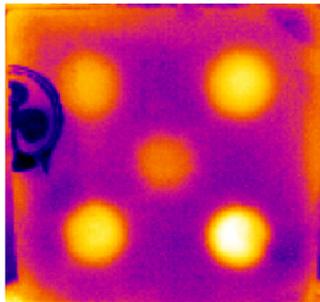


Figure 10 : Analyse de la copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers à l'aide du système SAMMTHIR associé à une excitation infrarouge moyen

4) Conclusion

Dans le travail que nous avons présenté ici, nous avons cherché à améliorer le contrôle non destructif des peintures murales du patrimoine par thermographie infrarouge stimulée. Pour cela, nous avons étudié la possibilité de réduire les artefacts de détection potentiels liés aux propriétés radiatives inhomogènes de leur couche picturale.

Nous avons d'abord étudié à l'aide d'un spectroradiomètre à large bande, l'évolution spectrale de l'absorptivité hémisphérique directionnelle d'une douzaine de peintures murales. Les résultats alors obtenus ont montré d'une part, que les couches picturales étudiées ont des comportements radiatifs proches les unes des autres, à partir d'une longueur supérieure à 3 μ m. Cela nous a amené à adjoindre au système SAMMTHIR d'analyse photothermique du laboratoire, des sources d'excitation fonctionnant dans ce domaine des infrarouges moyens, plutôt que dans le domaine visible / proche infrarouge. Cela nous a permis d'autre part, de justifier le choix d'une caméra de thermographie infrarouge « ondes longues » pour l'analyse des peintures murales.

Ensuite, nous avons montré que cette évolution expérimentale permet, lors de l'étude d'un échantillon académique puis d'une copie partielle d'une fresque de la cathédrale d'Angers, un gain notable en termes de détection de défauts. En effet, ce choix technologique a permis de diminuer notablement les artefacts de détection potentiels induits par les différences de propriétés radiatives des pigments utilisés.

Ces résultats expérimentaux sont encourageants puisque semblent permettre d'améliorer les possibilités de contrôle non destructif de la thermographie infrarouge stimulée. 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] E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti, V. Vavilov, : *Non destructive evaluation of delamination in fresco plaster using transient infrared thermography*. Research in NDE, vol 5, n°4, pp257-274, 1994.
- [2] G. Schirripa Spagnolo, G. Guattari, E. Grinzato : *Frescoes Diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography*. Proc I the 6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage, Rome, 1999, p. 385-398.
- [3] G. Carlomagno, C. Meola: *Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT*, NDT&E International 35 (2002) 559–565.
- [4] N. Avdelidis, A. Moropoulou : *Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures*, Journal of Cultural Heritage 5 (2004) 119–127
- [5] 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.
- [6] J.C. Candoré : Détection et caractérisation de défauts par thermographie infrarouge stimulée : Application au contrôle d'œuvres d'art. PhD, Reims, June 2010.
- [7] 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.
- [8] J. C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Gressel : Non destructive testing of work of art by stimulated infrared thermography. EPJAP, 2012, vol 57, 02, pp 21002 -210011.
- [9] 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
- [10] 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, IJOT, DOI 10.1007/s10765-012-1301-2.