

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

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

¹ URCA/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

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

Résumé

Dans le cadre de la conservation des biens culturels, la thermographie infrarouge stimulée a déjà montré ses possibilités en matière de détection de déplacements situés dans des peintures murales du patrimoine [1-32]. Toutefois, la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé, peut, dans certains cas défavorables, conduire à des artefacts de détection. Dans le travail que nous présentons ici, nous montrons que l'association d'une analyse SVD [33] à la thermographie infrarouge pulsée permet une réduction notable de cet effet optique perturbateur.

Nomenclature

| | | | |
|-----|------------------------------------|----------|-------------------------------------|
| EOF | Fonction empirique orthogonale | V | Matrice temporelle |
| m | Nombre de pixels d'un thermogramme | X | Matrice d'observation |
| n | Nombre de thermogrammes | | <i>Symboles grecs</i> |
| U | Matrice des EOF | Σ | Matrice de représentativité des EOF |

1. Introduction

Dans le cadre de la conservation des biens culturels, la thermographie infrarouge stimulée a déjà montré ses possibilités en matière de détection de déplacements situés dans des peintures murales du patrimoine [1-32]. L'un des problèmes rencontré au cours de ces études est la sensibilité variable selon sa couleur, de la couche picturale au flux excitateur utilisé. Cette différence de sensibilité peut, 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 de type SVD (Singular value decomposition [33]) 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 forte intensité énergétique (au sens du traitement du signal) alors que ceux dus à la présence de défauts sont plutôt de plus faible intensité énergétique. De ce fait, nous pensons que les EOF (Empirical Orthogonal Function) supérieures, résultant d'un post traitement de type SVD, 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 la décomposition SVD

La décomposition en valeur singulière (SVD) est un outil classique de traitement du signal [33]. Il est très puissant. Il permet de décomposer un signal dans la base orthogonale la plus adaptée, du point de vue énergétique, au dispositif expérimental mis en œuvre pour l'acquérir. Il permet donc de construire un modèle empirique de l'expérimentation. Il est donc plus naturel, du point de vue énergétique que les transformées classiques, de Fourier ou de Laplace. Ces dernières supposent en effet, a priori que la réponse étudiée est respectivement une somme de fonctions trigonométriques ou une somme d'exponentielles décroissantes. Il est donc d'un emploi intéressant dans le domaine du contrôle non destructif. Cela explique sa mise en œuvre dans cette étude.

Le principe d'une décomposition SVD est le suivant : Tout d'abord, nous bâtissons à partir du film thermographique issu de l'expérience photothermique, une matrice d'observation rectangulaire X . Elle contient m lignes et n colonnes ($m > n$). Le paramètre m correspond au nombre de pixels (points de mesures) d'un thermogramme. Le paramètre n correspond quant à lui, au nombre de thermogrammes. Pour bâtir cette matrice X , nous procédons colonne par colonne. Dans une colonne nous regroupons l'ensemble des valeurs des pixels d'un même thermogramme (le balayage du thermogramme s'effectue colonne par colonne). Elle correspond donc à un instant de mesure. Nous balayons alors l'ensemble du film thermographique pour construire l'ensemble des colonnes. Une fois cette matrice d'observation X construite, nous procédons à sa décomposition en valeurs singulière. Nous utilisons alors la formule suivante [33] :

$$X = U \cdot \Sigma \cdot V^T \quad (1)$$

Dans cette expression, U est une matrice carrée comprenant m lignes et m colonnes. Chaque colonne est orthogonale aux autres. Les colonnes représentent les directions de plus grande variation énergétique spatiale (au sens du traitement du signal) de l'expérience. Elles représentent donc les axes de la base empirique orthonormée de l'expérience. Elles sont classées par ordre décroissant d'importance énergétique. Elles sont nommées « Empirical orthogonal function » (EOF). Ainsi la première colonne de la matrice U , nommée EOF₁ correspond à la direction la plus énergétique de la base du modèle empirique de l'expérimentation. Ensuite, la seconde colonne de la matrice U , nommée EOF₂, correspond à la direction orthogonale, énergétiquement juste inférieure à la précédente. Le raisonnement se poursuit ainsi de façon logique jusqu'à la colonne EOF _{m} .

Σ est une matrice rectangulaire et diagonale. Elle comprend m lignes et n colonnes. L'ensemble des valeurs de la diagonale correspond à la représentativité des « Empirical Orthogonal Function » (EOF) précédentes. Ces valeurs sont classées de l'EOF le plus énergétique à l'EOF le moins énergétique. Ainsi la première valeur Σ_1 de la matrice Σ , correspond à la représentativité énergétique de l'EOF₁. De même la seconde valeur Σ_2 ($\Sigma_2 < \Sigma_1$) de la matrice Σ , correspond à la représentativité énergétique de l'EOF₂. Là encore, le raisonnement se poursuit de façon logique jusqu'à la valeur Σ_m .

V est une matrice carrée. Elle comprend n lignes et n colonnes. Chaque colonne est orthogonale aux autres. Les colonnes représentent les directions de plus grande variation énergétique temporelle de l'expérience. Cette représentation s'éloigne de la représentation physique de l'expérimentation. Elle n'est plus comme dans le cas de la matrice U homogène à un thermogramme. Elle est donc plus difficile à interpréter. Cela explique que nous ne l'avons pas considérée dans cette première étude. Elle pourrait toutefois être intéressante pour la caractérisation temporelle de la profondeur à laquelle se situe un défaut.

Dans cette étude, nous avons utilisé les propriétés de la décomposition SVD pour essayer de réduire l'effet perturbateur de la couche picturale. Nous pensons que les variations photothermiques dues à la présence de défauts sont d'un point de vue énergétique (au sens du traitement du signal), moins important que celles dues à l'inhomogénéité de dépôt d'énergie. De ce fait, les toutes premières EOF de la décomposition SVD devraient faire apparaître cette inhomogénéité. Les EOF suivantes y seraient moins sensibles et feraient plutôt apparaître la signature photothermique des défauts. Ainsi, pour étudier les signatures photothermiques liées au défaut, nous proposons d'éliminer les toutes premières EOF, les plus énergétiques et de ne travailler que sur les EOF suivantes (dans la limite de celles présentant un bon rapport signal / bruit).

3. Etude théorique

Afin de tester notre approche, nous avons 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 est un bloc de plâtre (car ses propriétés thermophysiques sont très proches de celles d'une peinture murale réelle). 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 dans cet échantillon. Nous avons considéré que ces défauts étaient parallélépipédiques et qu'ils avaient les mêmes dimensions. 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 premier défaut, situé en haut à gauche de la plaque, est situé à 2 mm de profondeur. Le second défaut situé en bas à gauche de la plaque, est situé à 4 mm de profondeur. Le troisième défaut situé en haut et au milieu de plaque est situé à 6 mm de profondeur. Le quatrième défaut situé en bas et au milieu de plaque est situé à 8 mm de profondeur. Le cinquième défaut, situé en haut à droite de la plaque, est situé à 10 mm de profondeur. Le dernier défaut situé en bas à droite de la plaque, est situé à 12 mm de profondeur. 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 de 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.

Sur la figure 1, 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 sont bien perturbées par l'inhomogénéité de dépôt d'énergie.

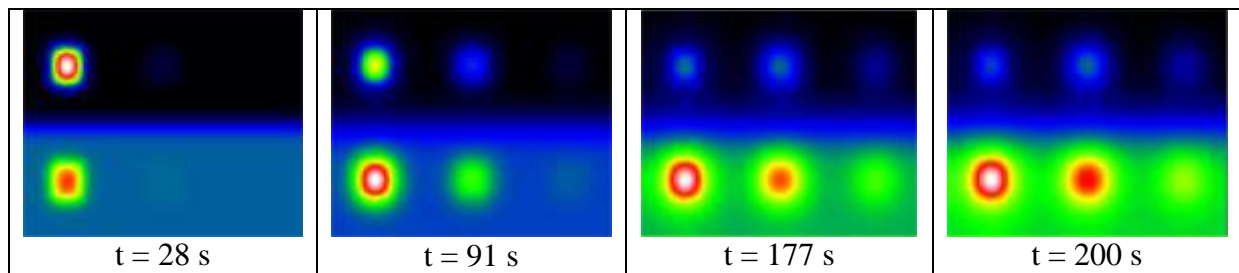


Figure 1 : Exemple de thermogrammes théoriques obtenus (à $t = 28$ s, $t = 91$ s, $t = 177$ s et $t = 200$ s)

Sur la figure 2, nous présentons ensuite les résultats obtenus après une décomposition SVD. Il s'agit des six premières EOF de la décomposition. Elle montre d'abord, que ces thermogrammes synthétiques permettent la détection des six défauts. Elle montre ensuite et comme attendu, que si les toutes premières EOF sont sensibles à l'inhomogénéité de dépôt d'énergie, les EOF suivantes semblent y être bien moins sensibles. Ce résultat théorique semble confirmer l'intérêt d'un traitement SVD pour améliorer le contrôle non destructif des œuvres d'art.

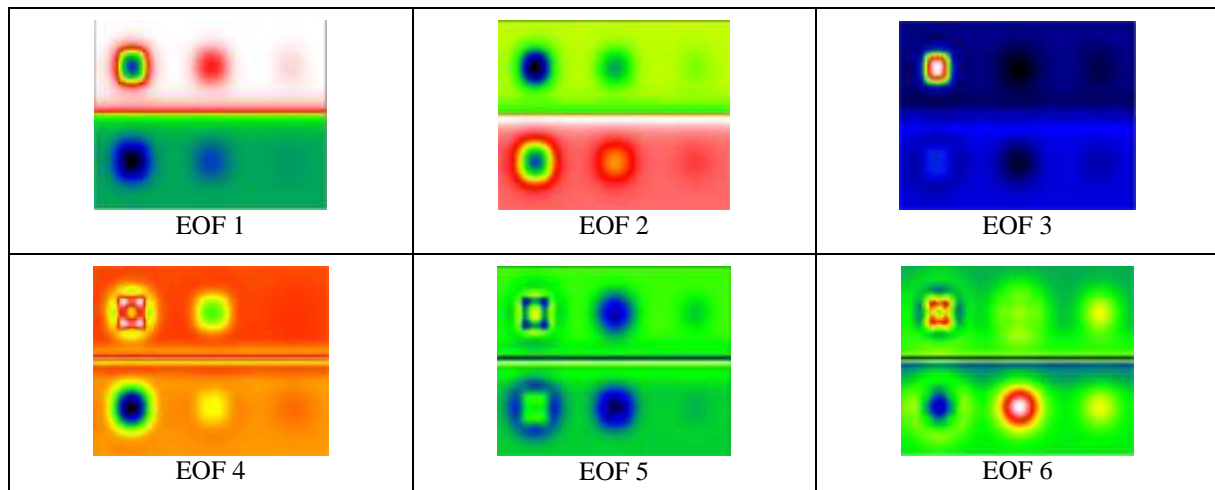


Figure 2 : Les 6 premières EOF obtenues

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 3. Il s'agit 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 lazulli, ocre jaune, noir de charbon, blanc de plomb, malachite, mixtion à la feuille d'or. Ces différentes couleurs entraineront donc, comme nous le cherchons lors de l'analyse photothermique, une inhomogénéité spatiale d'absorption d'énergie



Figure 3 : La fresque étudiée

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



Figure 4 : Position des défauts

Cette fresque a été analysée 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 FLIR 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 50 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 50 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 60 secondes. La durée d'analyse est égale à 60 secondes (étude de la phase d'échauffement). La fréquence d'acquisition du signal photothermique est de 1 Hz.

Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 5. Il s'agit du thermogramme obtenu 56 secondes après le début de l'étude. Il correspond au thermogramme permettant, dans cette configuration expérimentale, la meilleure détection des défauts. Il fait apparaître une signature photothermique plus importante à l'endroit de trois défauts périphériques, permettant ainsi leur détection. Il montre ensuite qu'il est difficile, dans cette configuration expérimentale, de détecter les deux défauts les plus profonds à l'aide de l'étude des thermogrammes bruts. Il montre enfin, la présence notable et gênante de la signature photothermique de la couche picturale.

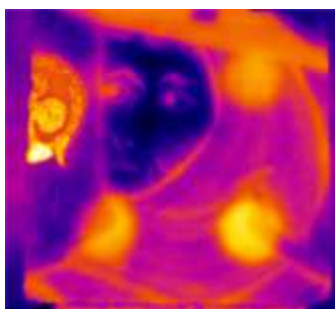


Figure 5 : Thermogramme brut obtenu 56 s après le début de l'excitation

Sur la figure 6, nous présentons ensuite les résultats obtenus après une décomposition SVD du film photothermique. Il s'agit des quatre premières EOF de la décomposition SVD. Elle montre d'abord et comme attendu théoriquement, que les toutes premières EOF sont très sensibles à l'inhomogénéité de dépôt d'énergie. Elle montre ensuite que cette sensibilité diminue notablement lorsque l'ordre des EOF augmente. Elle montre encore que l'EOF 4, via un signal photothermique plus important, permet la détection des 5 défauts présents dans la fresque analysée, ce que ne permettait pas l'analyse directe des thermogrammes bruts. De ce fait cette figure semble enfin montrer qu'une décomposition SVD pourrait conduire à une détection plus précoce des défauts qu'une analyse des thermogrammes bruts, ce qui serait un atout considérable pour des analyses *in situ*.

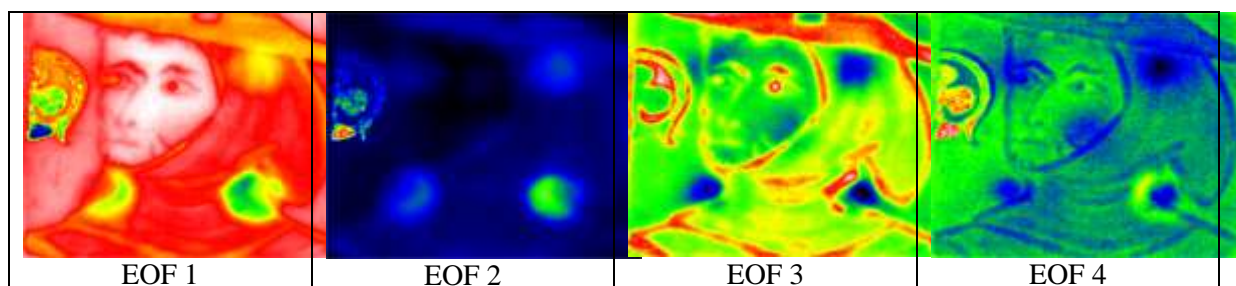


Figure 6 : Les 4 premières EOF obtenues

5. Conclusion

Dans ce travail, nous avons approché l'apport d'une décomposition SVD à la thermographie infrarouge 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 est déjà très performant, il peut être gêné par les couleurs différentes de la couche picturale.

Nous avons ensuite présenté le fondement scientifique de notre approche. Notre hypothèse consiste à considérer que les perturbations apportées par une inhomogénéité de dépôt d'énergie sont plus importantes d'un point de vue énergétique (au sens du traitement du signal) que celles dues à la présence de défauts. Or lors d'une décomposition SVD, les toutes premières EOF représentent les fluctuations les plus énergétiques alors que les EOF suivantes représentent les fluctuations de moins en moins énergétiques. Cela signifie dans notre cas, que l'analyse des EOF d'ordre supérieur devrait permettre de s'affranchir en partie de l'inhomogénéité de dépôt d'énergie et de plutôt considérer les variations de signaux photothermiques dues à la présence de défauts.

Afin de confirmer cette hypothèse, nous avons alors développé une étude théorique basée sur la modélisation de l'expérience photothermique. Nous avons alors montré d'une part que les toutes premières EOF sont effectivement très sensibles à l'inhomogénéité de dépôt d'énergie, alors que les EOF suivantes y sont bien moins sensibles. Nous avons montré d'autre part, que les EOF d'ordre supérieur permettent bien la détection des défauts présents dans l'échantillon analysé.

Enfin, nous avons développé une étude expérimentale pour confirmer les résultats théoriques obtenus. Nous avons alors montré d'une part, lors de l'étude d'une copie d'une peinture murale de la cathédrale d'Angers, à l'aide du système SAMMTHIR du laboratoire, que les EOF d'ordre supérieur permettent bien la détection des défauts présents dans l'échantillon analysé tout en étant bien moins sensible aux effets optiques induits par les différentes couleurs de la couche picturale. Nous avons montré d'autre part qu'une décomposition SVD semble pouvoir permettre une détection plus précoce des défauts qu'une analyse des thermogrammes bruts, ce qui serait un atout considérable pour des analyses *in situ*. 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] 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] E. Grinzato, P.G. Bison, S. Marinetti: Monitoring of ancient buildings by the thermal method. *Journal of Cultural Heritage* 3 (2002) 21–29.
- [4] E. Grinzato, C. Bressan, S. Marinetti, P. Bison, C. Bonacina: Monitoring of the Scrovegni chapel by IR thermography: Giotto at infrared, *Infrared physics and technology*, vol 43, n°3-5, 2002, pp165-169.
- [5] G. Carlomagno, C. Meola: Comparison between thermographic techniques for frescoes NDT, *NDT&E International* 35 (2002) 559–565.
- [6] N. Avdelidis, A. Moropoulou : Applications of infrared thermography for the investigation of historic structures, *Journal of Cultural Heritage* 5 (2004) 119–127.
- [7] C. Ibarra-Castanedo, S. Sfarra, D. Ambrosini, D.Paoletti, A.Bendada, and X. Maldague, Subsurface defect characterization in artworks by quantitative PPT and holographic interferometry, *Qirt* 2008.
- [8] B. F. Miller, The feasibility of using thermography to detect subsurface voids in painted wood panels, 1977, *JAIC* 16, pp. 27-35.
- [9] C.Meola, R.Di Maio, N.Roberti, and G.M. Carlomagno, Application of infrared thermography and geophysical methods for defect detection in architectural structures, *Engineering Failure Analysis*, 2005, 12, pp. 875-892
- [10] C. Meola, Infrared thermography of masonry structures', *Infrared Physics & Technology*, 2007, 49, pp. 228-233
- [11] 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
- [12] J.C. Candoré : Détection et caractérisation de défauts par thermographie infrarouge stimulée : Application au contrôle d'œuvres d'art. Phd thesis, Reims, june 2010.
- [13] 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.

- [14] Jean Charles Candoré, J.L Bodnar, Vincent Detalle, Philippe Grosse: Non destructive testing in situ, of works of art by stimulated infra-red thermography, *Journal of physics*, (2010), 012068
- [15] S. Brahim, J.L. Bodnar et P. Grosse: Thermal diffusivity measurement by photothermal radiometry under random excitation and parametric analysis? *Journal of physics* (2010), 012065
- [16] J.C. Candoré, J.L. Bodnar, V. Detalle, B. Remy et P. Grosse: Approach of the measurement of the thermal of thermal diffusivity of mural painting by front face photothermal radiometry, *Journal of physics conferences series*, *Journal of physics* (2010), 012094
- [17] V. Detalle, S. Duchêne, V. Belmin, J.M. Vallet, and J.L. Bodnar, Application of laser in conservation and restoration of historical building, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2011, 7996, art. n°. 799614.
- [18] J. C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grosse: Nondestructive testing of work of art by stimulated infrared thermography. *European physical journal Applied Physics*, 2012, vol 57, 02, pp 21002 -210011.
- [19] J.C. Candoré, J.L Bodnar, V. Detalle, P. Grosse: Characterization of defects situated in a fresco by stimulated infrared thermography, *European physical journal Applied Physics*, 2012, vol 57, 01, pp 11002 -11008.
- [20] 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.
- [21] 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 Thermophysics*, (2012), Vol 33, pp 2011-2015.
- [22] J.L Bodnar, J.L. Nicolas, K. Mouhoubi, J.C. Candore and V. Detalle : Characterization of an inclusion of plastazote located in an academic fresco by photothermal thermography *International Journal of Thermophysics*, (2012), 34, pp 1633–1637.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] J.L Bodnar, J.L. Nicolas, K. Mouhoubi, V. Detalle: Stimulated infrared thermography applied to thermophysical characterization of cultural heritage mural paintings, *European physical journal: Applied physics*, 2012, 60, 21003.
- [26] V. Vrabie, E. Perrin, J.L. Bodnar, K. Mouhoubi, and V. Detalle, Active IR Thermography Processing Based on Higher Order Statistics for Nondestructive Evaluation, *EUSIPCO 2012*, Bucharest, August 27-31, 2012, pp. 894-898
- [27] E. Bernikola, E. Tsiranidou, V. Tornari, V. Detalle, J.L. Bodnar: Mapping of defect structural micro-morphology in the documentation of conservation approaches, *Computer Science*, 2012, 7616 LNCS, pp. 86-96.
- [28] 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
- [29] J. L. Bodnar, J. L. Nicolas, K. Mouhoubi, J. C. Candore, V. Detalle : Characterization of an Inclusion of Plastazote Located in an Academic Fresco by Photothermal Thermography, *International Journal of Thermophysics*, (2013), vol 34, pp 1633–1637.
- [30] J.L. Bodnar, J.J. Metayer, K. Mouhoubi, V. Detalle: Non-destructive testing of works of art by terahertz analysis, *European physical journal: Applied physics*, 2013, 64, 21001.
- [31] P. Vázquez, C. Thomachot-Schneider, K. Mouhoubi, G. Fronteau, M. Gommeaux, D. Benavente, V. Barbin, J.L. Bodnar : Infrared Thermography monitoring of the NaCl crystallisation process, *Infrared Physics & Technology*, 71, 2015, pp 198 - 207.
- [32] C. Thomachot-Schneider, M. Gommeaux, N. Lelarge, A. Conreux, K. Mouhoubi, J.L. Bodnar, P. Vazquez: Relationship between Na₂SO₄ concentration and thermal response of reconstituted stone in the laboratory and on site, *Environmental Earth Sciences*, 2016.
- [33] I.T. Jolliffe: *Principal component analysis*, Springer, 2002.