

Alain Roche  
Jean-Pierre Chambard

# Détection par thermographie et TV-holographie des défauts de la voûte de la Galerie des Glaces du château de Versailles

*Less appels de figure en gras renvoient aux planches en couleur hors texte.*

32 **Résumé.** À l'occasion du chantier de restauration de la Galerie des Glaces, des méthodes d'analyse non destructives ont été développées afin de mettre en évidence les altérations de la voûte, tant sur la peinture sur enduit que sur la peinture sur toile, et plus particulièrement les fissures et décollements des toiles.

**Mots-clés.** Versailles, Galerie des Glaces, restauration, voûte, décollement, fissure.

**Abstract.** During restoration work on the Hall of Mirrors, non-destructive methods of analysis were developed in order to bring to light deteriorations of the vault, regarding both the paintings on plaster and the paintings on canvas, and more especially cracks and loosening of the canvases.

**Keywords.** Versailles, Galerie des Glaces (Hall of Mirrors), restoration, vault, loosening, crack.

## Introduction

Dans le cadre de la restauration d'un grand décor monumental, l'évaluation de son état de conservation structurel est souvent sujette à des approximations qui se manifestent au moment décisif des travaux. Pour améliorer les estimations des désordres d'une telle structure, nous devons avoir recours à des méthodes non destructives, faciles d'utilisation, transportables sur des chantiers, maniables et fiables.

La méthode du sondage acoustique est encore la plus utilisée. Cette méthode empirique consiste à tapoter sur la paroi du décor, qui nous renvoie un son différent si la matière est saine ou endommagée. La notion de subjectivité est fortement présente dans ce diagnostic. Malgré tout, le sondage acoustique reste un moyen simple d'ausculter une paroi décorée malgré le manque de précision de cette technique.

Peu de publications font état de l'utilisation des techniques sans contact et non destructives pour la détection des défauts de décors monumentaux. Une étude sur la détection par thermographie des décollements ou fissures d'enduits de fresques a donné des résultats relativement satisfaisants sur un fragment de petites dimensions [1]. Schirripa Spagnolo *et al.* [2] ont réalisé une peinture sur enduit en créant artificiellement des défauts. Ils ont ensuite testé en laboratoire la TV-holographie et la thermographie infrarouge. Les deux techniques ont permis de détecter les défauts avec une grande sensibilité. Thomas Fricke-Begemann [3] a mis en œuvre avec succès la technique de TV-holographie associée à une excitation acoustique d'abord en laboratoire

sur un échantillon avec des défauts artificiels (excitation de 110 dB entre 2 et 6 KHz) puis dans une église (excitation entre 30 et 500 Hz). Gerd Gülker [4] a mis en œuvre la même technique pour inspecter à une distance de 6 m la voûte d'une église. Pour une surface d'analyse de 0,25 x 0,4 m<sup>2</sup>, il identifie les décollements de plâtre pour des fréquences d'excitation situées entre 500 Hz et 2 KHz.

## Matériaux et défauts des parois décorées

La voûte de la Galerie des Glaces est constituée d'un lattis de bois, recouvert d'un enduit de plâtre sur lequel les peintures à l'huile sur toile sont marouflées<sup>1</sup>. Avant toutes dégradations, ces éléments sont intimement liés et le contact entre eux est parfait. Actuellement, la voûte de la Galerie des Glaces présente différents types d'altérations structurelles. Dans certaines zones, la toile de la peinture s'est décollée de l'enduit. Il existe également une série de fissures de l'enduit de plâtre qui sillonnent le décor et passent derrière les peintures marouflées.

Chacun des matériaux constituant la voûte (lattis, plâtre, toile, peinture) peut être caractérisé par des propriétés physiques qui sont modifiées par les différents types d'altérations:

- les variations de conductivité thermique<sup>2</sup> et d'émissivité<sup>3</sup> sont exploitées par la thermographie;
- les variations de rigidité mécanique sont révélées par la TV-holographie.

Alain Roche, ingénieur, Laboratoire d'analyse et de recherche pour la conservation et la restauration d'œuvres d'art (Larcroa).  
Jean-Pierre Chambard, docteur ingénieur, directeur du Centre interrégional de transfert de technologie (Holo3).



## Thermographie

Le principe de détection des défauts d'une paroi décorée multicouche est basé sur une analyse thermique de la surface. Le dispositif de détection est composé d'une caméra à infra-rouge et, dans le cas d'une thermographie active, d'une source de chaleur qui sollicite la surface de la peinture pour en révéler les défauts. Le thermogramme<sup>4</sup> de deux matériaux collés uniformément donnera une image ne contenant qu'une seule couleur, correspondant à la température de surface. Si les deux matériaux se décolle, la poche d'air formée, en jouant un rôle d'isolant thermique, sera à l'origine d'une différence de température de surface représentée par plusieurs couleurs sur le thermogramme. Avec cette technique, nous pouvons explorer avec précision une surface d'environ 2 m<sup>2</sup>.

## Résultats

### *Suivi du développement des taches isothermes en fonction de la température de surface<sup>5</sup>*

Dans cette partie de la peinture restaurée, le décollement des toiles n'est pas visible. À l'équilibre avec l'environnement, la température de départ de la surface est de 17,3 °C et la couleur du thermogramme est uniforme. Au cours de l'échauffement de la surface, on voit apparaître des différences de température et, à 19,9 °C, le thermogramme nous donne déjà un premier niveau d'informations sur l'étendue des décollements. À 22,2 °C, nous avons une représentation très détaillée de la forme, de la continuité et de la profondeur des différentes poches qui se situent dans cette zone. Les poches les plus profondes sont en orangé et la discontinuité du collage est représentée par les taches jaunes, (figure 1.IV).

### *Détection de fissures<sup>6</sup>*

Le repérage acoustique avait permis de détecter un défaut discontinu composé de deux sillons vertical et horizontal. La thermographie donne des informations plus précises sur l'étendue et la forme de défaut. L'aspect du thermogramme est caractéristique d'une fissure autour de laquelle la toile s'est décollée. La fissure fait un angle droit et la partie verticale se divise en deux embranchements. La profondeur des vides est indiquée par les couleurs (figure 2.IV).

Figure 3. L'image TV-holographique de gauche montre les zones de décollement en sombre, entourées de cercles clairs. L'image de droite est la photo de la même zone où l'on voit à la craie les zones jugées défectueuses lors de l'investigation manuelle.

La thermographie est plus explicite en nous montrant la position de la fissure et sa forme exacte. Elle est plus étendue que la présumée fissure identifiée par sondage acoustique.

## Principe de mesure par TV-holographie

La TV-holographie est une technique d'imagerie qui permet de mesurer les microdéplacements de surface avec une très grande résolution (0.1 µm). La technique est utilisée depuis les années 1990 dans les laboratoires et dans l'industrie pour l'étude de comportement mécanique de pièces ou d'assemblages ainsi que pour le contrôle non destructif de structures d'avion.

Nous avons mis en œuvre la technique de TV-holographie associée à une excitation de type acoustique pour inspecter la voûte ainsi que les tympans de la Galerie des Glaces au château de Versailles. La technique a été testée sur des zones de peinture sur enduit et de peinture sur toile marouflée. La tête de TV-holographie est posée au sol (inspection de la voûte) ou sur échafaudage (cas des tympans). Le champ analysé en une prise de vue varie entre 1 m<sup>2</sup> et 4 m<sup>2</sup>. L'excitation est apportée par une enceinte acoustique pilotée par un sinus pur. La plage de fréquence retenue pour l'excitation est de 20 Hz à 200 Hz.

La figure 3 montre le type d'image obtenu : en noir apparaissent les éléments de la surface inspectée qui sont mis en mouvement par l'excitation acoustique. Il s'agit de mouvements d'amplitude micrométrique invisible à l'œil nu. Les parties qui sont adhérentes à la paroi ne sont quant à elles pas mises en mouvement par cette excitation qui reste d'un niveau très faible au regard de la force d'adhésion normale de l'enduit ou de la toile sur son support. En comparaison de l'investigation manuelle, les zones détectées par TV-holographie sont beaucoup plus localisées. Elles sont situées, sauf exception, à l'intérieur des zones repérées manuellement.

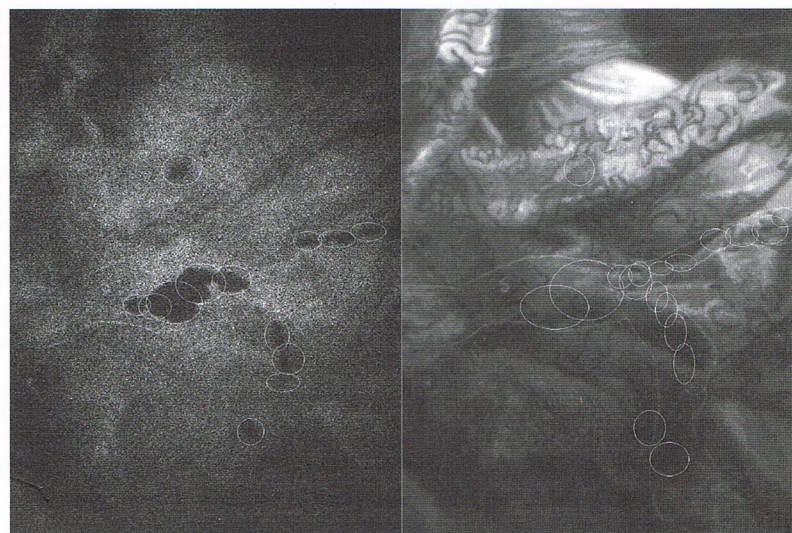
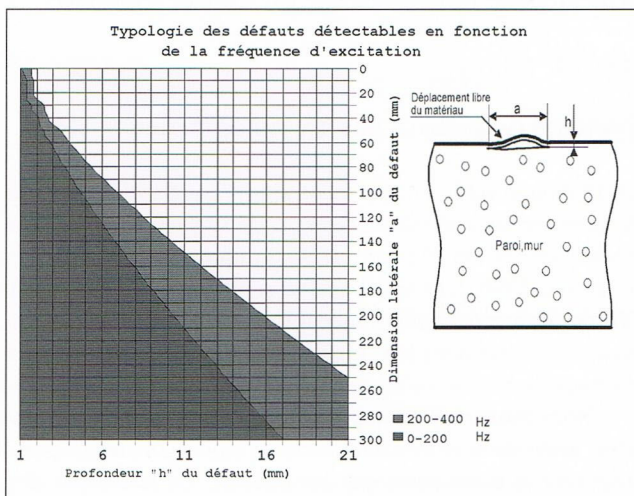




Figure 4. Représentation et typologie des défauts détectables par TV-holographie en fonction de la fréquence d'excitation.



34

Nous avons conduit une étude théorique en vue d'estimer le type de défaut pouvant être détecté par ce principe. Le défaut est considéré comme une plaque carrée de dimension latérale «a» et d'épaisseur «h» (profondeur du défaut) qui n'est pas adhérente sur le support et qui est encastrée sur tout son pourtour (figure 4). La première fréquence de résonance d'une telle plaque est fonction de la constante élastique du matériau (module de Young), de sa masse volumique, ainsi que des paramètres dimensionnels «a» et «h».

Le graphique montre les valeurs des fréquences d'excitation qu'il faut utiliser, en fonction des paramètres largeur «a» et profondeur «h» des défauts. On comprend la nécessité

d'effectuer un balayage en fréquence pour détecter les différentes typologies de défauts. D'autre part, si on limite à 400 Hz la fréquence d'excitation, on peut par ce graphique déterminer les limites en profondeur et en largeur des défauts détectables. En particulier, les défauts de petites dimensions ne seront détectés que s'ils sont proches de la surface. En d'autres termes, ce principe de détection de défaut met avant tout en lumière les zones présentant une faible rigidité mécanique : ce sont aussi des zones qui présentent le plus de risque de se détacher de la paroi.

## Conclusion

La figure 5.IV permet de comparer, sur deux zones différentes, les mesures thermographiques (colonne de gauche), holographiques (colonne de droite) et manuelles (marquage à la craie visible dans les deux colonnes). Les deux techniques d'imagerie donnent des résultats très comparables en fournissant une délimitation beaucoup plus précise des décollements. La thermographie permet toutefois d'identifier plus de zones que les deux autres méthodes et, en particulier, des zones isolées de petite taille. La TV-holographie a révélé également la présence d'une fissure non débouchante (image du bas, trait horizontal) non détectée par les autres méthodes.

**Remerciements.** La thermographie et la TV-holographie ont pu être réalisées grâce à l'appui de Frédéric Didier, architecte en chef des Monuments historiques, et de Vinci.

## Notes

1. Marouflage : technique qui consiste à coller une peinture sur un mur ou sur une voûte.

2. La conductivité thermique est un coefficient qui caractérise le transfert de la chaleur à l'intérieur du matériau.

3. L'émissivité est une grandeur qui caractérise l'émission du rayonnement d'un corps.

4. Le thermogramme est une représentation cartographique des températures d'une surface, chaque couleur correspondant à une température de surface.

5. Détail des deux portraits de Monsieur et du prince de Condé, *Le roi donne ses Ordres pour attaquer en même temps quatre des plus fortes places de la Hollande*, 1672, surface 43,20 m<sup>2</sup>.

6. Détail de la Hollande, *La Hollande accepte la paix et se détache de l'Allemagne et de l'Espagne*, 1678, surface 32,3 m<sup>2</sup>.

## Notes bibliographiques

- [1] G. Szatanik, M. Gérard, J.L. Bodnard, M. Stefanaggi, V. Detalle, F. Pierron et A. Brandt-Grau, «Examen d'œuvres d'art par radiométrie photothermique», Méthodes et techniques optiques pour l'industrie, 5<sup>e</sup> colloque, Saint-Étienne 2004.
- [2] G. Schirripa Spagnolo, G. Guattari, E. Grinzato, P.G. Bison, D. Paoletti, D. Ambrosini, «Frescoes diagnostics by electro-optic holography and infrared thermography», 6th World Conference on NDT and Microanalysis in Diagnostics and Conservation of Cultural and Environmental Heritage, Rome, 1999 May.
- [3] T. Fricke-Begemann, G. Giiiker, K.D. Hinsch, H. Joost, «Mural inspection by vibration measurements with TV-Holographie», *SPIE* Vol. 3411, Ancona, 1998.
- [4] G. Gulker, «Investigation of decay mechanisms in historical artwork via TVHolography», *Optical Technologies in the Humanities*, Springer Verlag 52-68, 1997.

Laboratoire d'analyse et de recherche pour la conservation et la restauration d'œuvres d'art  
9, rue d'Alésia, 75014 Paris  
téléphone : 01 45 65 36 91  
mobile : 06 18 41 45 49.

Larcroa, société à responsabilité limitée au capital de 50 000 euros.  
Siège social : 9, rue d'Alésia, 75014 Paris.



Figure 1. Évolution des couleurs du thermogramme suite à un léger échauffement.

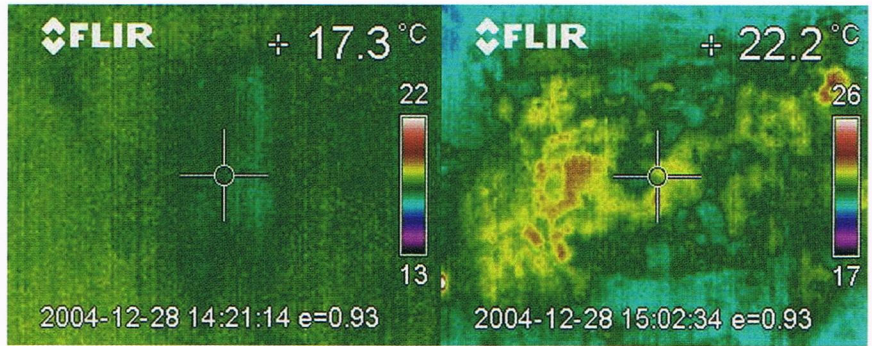


Figure 2. Thermogramme d'une fissure.

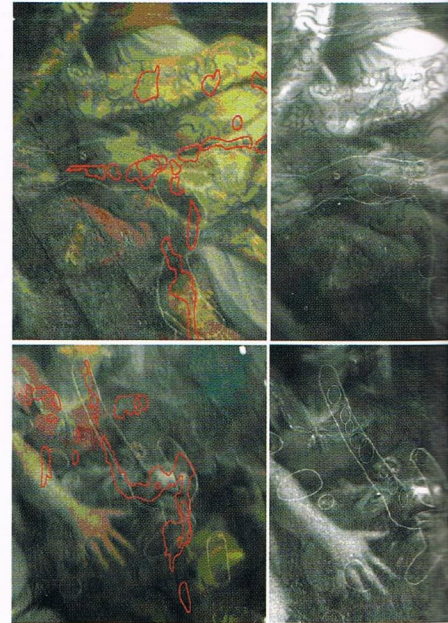
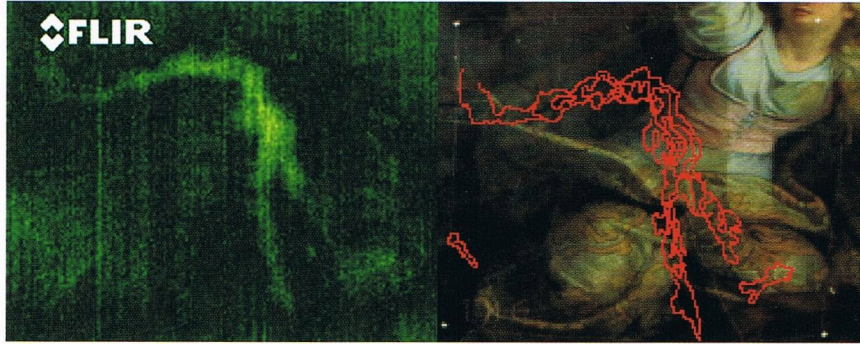


Figure 5. Comparaison de l'analyse thermographique (à gauche) et holographique (à droite) par rapport au repérage manuel (marquage à la craie).

IV

Conservation d'un rentoilage ancien sur un tableau appartenant à une série: *Le Port d'Antibes en Provence, vu du côté de la terre* par Joseph Vernet

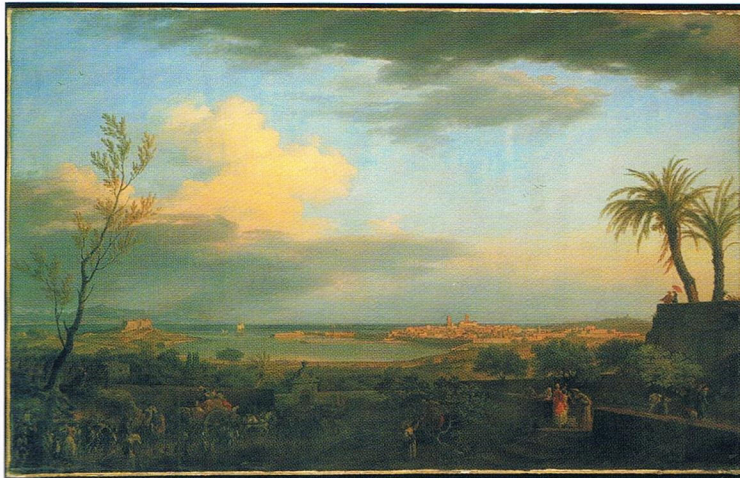
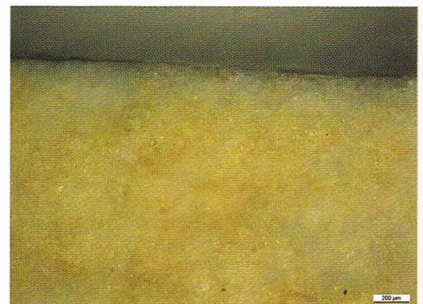


Figure 1. Joseph Vernet, *Le Port d'Antibes en Provence, vu du côté de la terre*, Paris, musée du Louvre, inv. 8299. © C2RMF, photo A. Thomasset.

Un agent de démoulage réversible faisant écran à la migration des huiles de silicone dans le matériau plâtre

Figure 2. Film de Carbopol® 940 observé sur la tranche au microscope. © F. Chantepie.



Analyses et regards croisés. Le cas de *Pan poursuivant Syrinx*

Figure 6. La coupe stratigraphique décèle la présence de vert de phtalocyanine. © C2RMF, S. Pagès.



Figure 7. Coupe stratigraphique de la couche rose orangé. © C2RMF, S. Pagès.

