

# LA TOMOGRAPHIE

## en cohérence optique pour examiner les objets du patrimoine

Corinna Ludovica KOCH DANDOLO<sup>1,2</sup>, Maxime LOPEZ<sup>1</sup>, Xueshi BAI<sup>1,3</sup>, Vincent DETALLE<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> C2RMF, Palais du Louvre, Porte des Lions, 14 quai François Mitterrand, 75001 Paris, France

<sup>2</sup> Fondation des sciences du patrimoine/EUR-17-EURE-0021, 33 boulevard du Port, MIR de Neuville, 95011 Cergy-Pontoise Cedex, France

<sup>3</sup> Centre de Recherche sur la Conservation (CRC), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS, Ministère de la Culture, 36 rue Geoffroy Saint Hilaire, 75005 Paris, France

[vincent.detalle@culture.gouv.fr](mailto:vincent.detalle@culture.gouv.fr)

Après avoir connu un essor sans précédent pour les applications biomédicales dès 1991, la tomographie en cohérence optique (OCT) s'est étendue à différentes disciplines d'étude des matériaux. Parmi les plus intéressantes on peut aujourd'hui y ajouter l'histoire de l'art technique et matériel, la conservation et la restauration d'objets du patrimoine culturel. En effet, la technique OCT permet d'obtenir une vision non-invasive de la stratigraphie et de la structure interne des œuvres d'art et peut contribuer à résoudre des questions telles que l'authenticité et la provenance des œuvres d'art, mais également donner des réponses sur leurs conditions de conservation et l'efficacité ou le contrôle de certains traitements de restauration.

### Comprendre la structure stratigraphique des objets

L'étude de la stratigraphie d'une peinture ou d'un autre objet du patrimoine culturel est considérée comme essentielle pour les domaines de l'histoire de l'art technique et de la restauration. La vue en coupe transversale d'une œuvre d'art permet en effet de rendre compte de la complexité des agencements des couches composant une peinture, comprendre un rendu de couleur finale, la technique de réalisation d'une finition décorative ou d'autres couches de surface.

Des informations importantes telles que le nombre et l'épaisseur des couches appliquées peuvent donner des éclaircissements sur la nature des matériaux utilisés. La connaissance de l'étendue et de la structure des couches présentes est également fondamentale dans le domaine de la conservation pour évaluer l'état d'altération de

chaque strate, la présence de détachement ou de soulèvement entre elles, et pour déterminer si des interventions de restauration sont nécessaires ou ont eu lieu.

La méthode traditionnelle pour réaliser une étude stratigraphique consiste à prélever des échantillons et à réaliser une coupe qui sera observée au microscope.

Grâce à sa capacité à réaliser des profils en profondeur et en 3 dimensions, la tomographie en cohérence optique (OCT) offre la possibilité d'obtenir des images en coupe transversale de l'œuvre sous examen, sans contact et de manière non-invasive. Sa nature non-invasive permet d'inspecter les œuvres sur un nombre d'emplacements théoriquement illimité, même dans une partie artistique centrale de l'objet, en toute innocuité vis à vis de la matière d'origine composant l'objet, permettant d'offrir un examen exhaustif de l'œuvre étudiée.

### Principe de la tomographie par cohérence optique

Le fonctionnement de l'imagerie OCT est basé sur le principe physique d'interférence de la lumière. Les propriétés cohérentes d'une source de lumière sont utilisées pour mesurer la longueur du chemin optique dans un échantillon. La source de lumière est divisée par un coupleur de fibres en un bras « échantillon » et un bras « référence » associé à un montage interférométrique. La lumière rétro-réfléchiée par les propriétés physico-chimiques d'un échantillon va rejoindre la fibre du bras échantillon, puis se recombiner avec la lumière qui a parcouru le bras de référence, formant un motif d'interférence correspondant aux interfaces de changement d'indice de réfraction, enregistré par le détecteur.

Il existe deux technologies principales pour l'OCT : OCT temporelle

(*time domain* : TD-OCT) et OCT fréquentielle ou dans le domaine de Fourier (*Fourier domain* : FD-OCT).

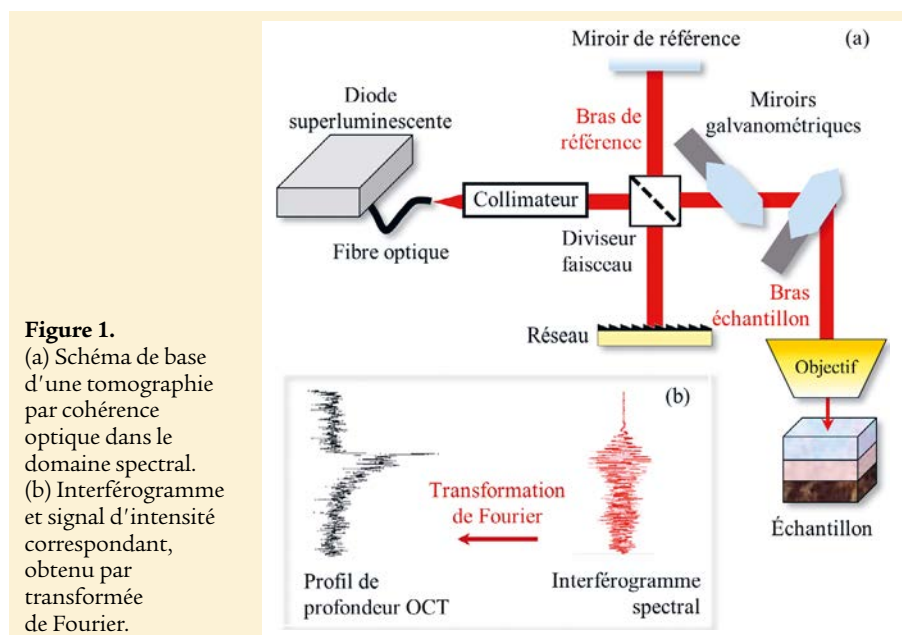
Dans un système TD-OCT, un motif d'interférence peut être obtenu en translatant mécaniquement, à haute fréquence, et de façon contrôlée, le miroir de référence pour modifier la longueur du chemin optique pour le faire correspondre à la longueur du chemin optique parcouru dans l'échantillon permettant d'interférer avec les différentes réflexions des couches de celui-ci.

Dans un montage FD-OCT, le miroir de référence est fixe. On distingue l'OCT à domaine spectral (*spectral domain* : SD-OCT) et l'OCT à balayage (*swept source* : SS-OCT). Pour la méthode SS-OCT, un laser à longueur d'onde rapidement balayée est utilisé comme source, avec une seule photodiode en tant que détecteur. Dans le cas du SD-OCT, une source à large bande spectrale est utilisée avec un détecteur comprenant un réseau équipé d'une caméra CCD ou CMOS à une seule ligne ; la fréquence de l'interférogramme est liée à l'emplacement en profondeur du réflecteur dans l'échantillon, de sorte qu'un profil de réflectivité en fonction de la profondeur est obtenu par transformée de Fourier. Les systèmes fonctionnant dans le domaine de Fourier permettent une imagerie beaucoup plus rapide puisque toutes les réflexions

internes de l'échantillon sont mesurées simultanément. La *figure 1* montre le schéma de base d'un système OCT dans le domaine spectral.

La résolution micrométrique de l'OCT est idéale pour étudier les œuvres d'art multicouches telles que les peintures, dans lesquelles l'épaisseur d'une couche de peinture peut aller de quelques microns à quelques dizaines de microns. Les résolutions axiales et latérales sont dites découplées. La **résolution axiale** (ainsi que la résolution spectrométrique) est définie par la largeur spectrale  $\Delta\lambda$  de la source de lumière. La largeur de bande des sources de lumière utilisées dans les OCT varie de 20 à 200 nm dans la gamme spectrale de 700 à 1500 nm, fournissant une résolution axiale de 2,0 à 20  $\mu\text{m}$  dans l'air (cela variera ensuite en fonction de l'indice optique du matériau). Seuls certains systèmes OCT plein champ utilisant la lumière visible peuvent atteindre une résolution axiale inférieure à 1  $\mu\text{m}$ . La **résolution transversale** dépend du rayon minimal du faisceau gaussien focalisé, elle est généralement comprise dans une plage de 15 à 40  $\mu\text{m}$  dépendant du système optique.

La capacité d'imagerie en profondeur de la technique OCT est principalement limitée par la capacité de pénétration de la source de lumière dans l'échantillon, rarement supérieure à quelques millimètres.



**Figure 1.**  
 (a) Schéma de base d'une tomographie par cohérence optique dans le domaine spectral.  
 (b) Interférogramme et signal d'intensité correspondant, obtenu par transformée de Fourier.

*The World's  
 Most Influential  
 Optoelectronic Exhibition*

CHINA INTERNATIONAL  
**OPTOELECTRONIC**  
 EXPO

**CIOE**  
**2019**

**SEPT. 4-7, 2019**  
 SHENZHEN • CHINA

OPTICAL COMMUNICATIONS EXPO

INFRARED APPLICATIONS EXPO

LASER TECHNOLOGY & INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO

PRECISION OPTICS, LENS & CAMERA MODULE EXPO

PHOTONICS INNOVATION PAVILION

OPTOELECTRONIC SENSOR EXPO

CHINA INTERNATIONAL OPTOELECTRONIC CONFERENCE

Exhibition Area **110,000 m<sup>2</sup>**

Exhibitor **2000<sup>+</sup>**

Visitor **70000<sup>+</sup>**



For more information, please visit

**www.cioe.cn/en**



**Figure 2.** « La Sainte Anne » (huile sur panneau de Leonardo Da Vinci, 1519, musée du Louvre, Paris France) numérisée par OCT au département recherche du C2RMF, pour caractérisation technique. (© C2RMF / Vincent Detalle)

Elle sera dépendante de la longueur d'onde d'émission et de la puissance de la source. Le processus principal limitant la profondeur de pénétration de la source de lumière OCT dans l'échantillon est la diffusion.

Dans la technique SD-OCT, l'épaisseur sondée est limitée par la plage de balayage du faisceau de référence (et par la sensibilité du système), la profondeur d'imagerie dans le domaine de FD-OCT est limitée par la résolution du dispositif spectrométrique ainsi que par le nombre fini de pixels et la résolution optique du spectromètre [1-3].

Les systèmes fonctionnent de sorte que la zone balayée est récupérée sur une matrice carrée (pixels) et le signal correspondant au profil en profondeur (ou A-scan) est associé aux coordonnées de pixel (X, Y). L'enregistrement des signaux le long d'une ligne de balayage permet de créer une image en coupe transversale (B-scan), tandis que l'enregistrement de lignes de balayage adjacentes dans une zone définie permet l'acquisition d'un volume de données 3D complet, à partir duquel des images en vue de dessus (C-scan) peuvent également être obtenues.

### Les applications OCT dans le domaine du patrimoine

Depuis 2004, plus de 126 articles ont été publiés sur l'utilisation de l'OCT pour la caractérisation des objets du patrimoine [4]. L'article de revue publié en 2011 par Targowski et Iwanicka [1] a servi de base à la rédaction de cette partie.

Les premiers essais ont été réalisés sur des peintures de chevalet généralement de composition multicouche. Cependant, la majorité des pigments présents dans les couches de peinture dispersent fortement le rayonnement, y compris dans le proche infrarouge, de sorte qu'ils ne sont pas suffisamment transparents pour permettre l'inspection de la stratigraphie complète de la peinture. Ainsi, l'application principale de l'OCT pour le contrôle des peintures concerne l'imagerie et la mesure d'épaisseur de couches de vernis ou de glacis qui possèdent des propriétés optiques parfaitement adaptées à leur visualisation. De plus, la technique OCT s'est révélée un outil efficace pour contrôler les retraits de vernis avec différentes méthodes de nettoyage mais aussi pour distinguer les anciennes et les

nouvelles couches de vernis. En fait, les vernis vieillis, souvent jaunis, présentent une opacité supérieure (donc un changement d'indice optique) dans les images OCT par rapport aux nouvelles. En outre, le système a été utilisé pour suivre « on line » le processus du séchage d'une couche de vernis. Cette technique permet ainsi de détecter efficacement les problèmes de conservation, tels que les détachements entre les couches. En plus des questions de suivi de nettoyage, la technique a été utilisée pour évaluer l'efficacité des traitements de restauration, la ré-adhésion de couches détachées et le remplissage de lacunes sous-jacentes.

Cette technique permet également d'imager les dessins sous-jacents recouverts par la couche de peinture, comme en réflectographie infrarouge en faisant apparaître une image de la zone numérisée sur le plan où ces matériaux généralement absorbants (noir de carbone par exemple) sont présents.

Le vernis et les couches de surface ont été inspectés sur différents supports, tels que les toiles de tableaux de chevalet, les panneaux de bois peints, les peintures murales, les violons (Stradivarius) dont on connaît leur importance pour le son finalement obtenu, etc. Des photographies peintes ont également été inspectées à l'aide de cette technique, ainsi que l'observation des écrits de manuscrits.

Parmi les autres applications passionnantes de la technique figure l'examen de solides semi-transparents tels que les jades et les céramiques émaillées, mais aussi la porcelaine et la faïence. Les feuilles d'or recouvertes de vernis ont également été inspectées par OCT afin de détecter les marques de perforation. Le verre convient particulièrement à l'inspection au moyen d'OCT, car ce matériau est transparent. La présence de gel de surface sur le verre due à la corrosion atmosphérique a pu être efficacement détectée, de même que d'autres phénomènes de détérioration du verre, tels que le *crizzling* et la formation de cloques.

De plus, l'OCT a été utilisée pour mesurer le volume du cratère formé lors de la mise en œuvre de la spectroscopie

d'émission optique de plasma induit par laser (LIBS), qui permet de déterminer la composition élémentaire d'un matériau [5]. En fait, l'évolution de la concentration des éléments en profondeur peut être déterminée en mesurant la profondeur du cratère d'ablation après chaque impulsion laser.

### L'expérience au C2RMF

Le département de recherche du Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF) possède depuis 2017 un système de tomographie en cohérence optique (SD-OCT) utilisé à des fins d'étude et de recherche. Il comprend une unité de base Thorlabs GAN220-OCT et un scanner Thorlabs OCTP900M, longueur d'onde centrale de 912 nm, capables d'imager un objet jusqu'à 1,9 mm / 1,4 mm dans l'air / eau avec une résolution axiale de 3,0  $\mu\text{m}$  / 2,2  $\mu\text{m}$  dans l'air / l'eau et possède une résolution latérale de 6,5  $\mu\text{m}$  en Y et de 3,3  $\mu\text{m}$  en X. Des développements sont effectués afin d'adapter le matériel aux différentes applications tant du point de vue de la mise en œuvre instrumentale que du développement du traitement de données afin d'améliorer et de simplifier le rendu visuel des résultats.

Dans le contexte d'étude quotidien, la stratigraphie des peintures peut être inspectée à la demande du service de la conservation du C2RMF ou d'institutions muséales.

Cette technique permet une nouvelle approche des technologies de fabrication des peintures, et la technique artistique peut être révélée à l'aide de cette instrumentation. La figure 3 montre des images OCT en coupe transversale enregistrées sur différentes peintures de chevalet, l'intensité du signal collecté est représentée au moyen d'une charte colorée.

La figure 3a montre l'image en coupe OCT d'une peinture du XVI<sup>e</sup> siècle (huile sur toile). La stratigraphie révélée par l'OCT est d'une complexité impressionnante, montrant au moins huit couches minces optiques superposées (<20  $\mu\text{m}$  d'épaisseur) hautement mais différemment transparentes au

rayonnement incident. Elles se trouvent au-dessus d'une couche de peinture (ou d'une préparation) qui est opaque dans l'image, car dispersant fortement le rayonnement incident OCT. Cela permet de comprendre comment le peintre a joué sur la mise en œuvre, pour représenter les volumes par exemple.

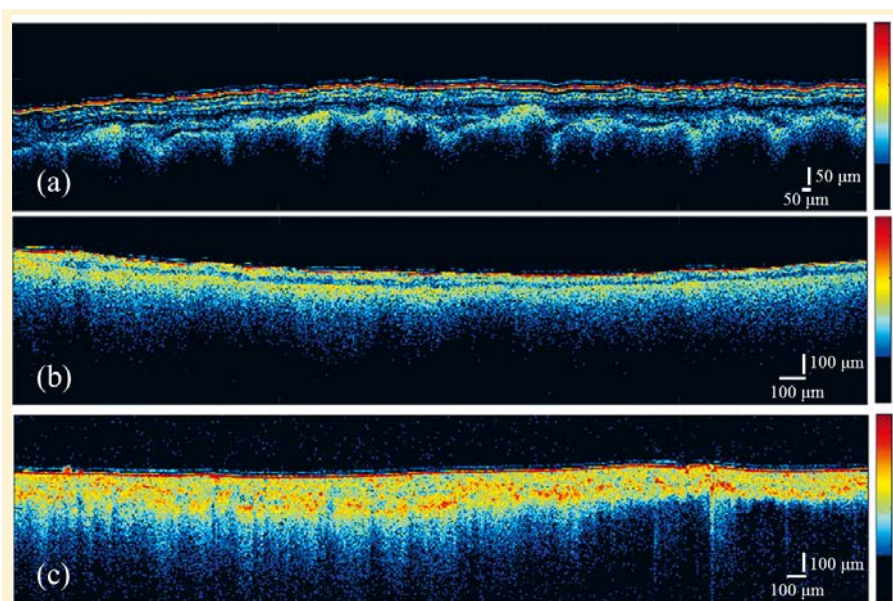
La figure 3b montre l'image en coupe obtenue à partir d'une peinture sur panneau du XVI<sup>e</sup> siècle (huile sur panneau) réalisée par un artiste différent. Par rapport au précédent, cet enregistrement OCT montre une stratigraphie de peinture de moindre complexité, composée de deux couches semi-transparentes d'environ 30  $\mu\text{m}$  d'épaisseur chacune située en surface.

Enfin, la figure 3c montre l'image en coupe transversale d'une découverte archéologique polychrome datant approximativement de 900 av. J.-C. La couche de peinture est épaisse (> 100  $\mu\text{m}$ ) et sa structure interne est très inhomogène. Elle présente des opacités locales de différentes dimensions liées à l'utilisation d'un pigment de granulométrie variée, avec des grains jusqu'à 50  $\mu\text{m}$  dans la dimension latérale.

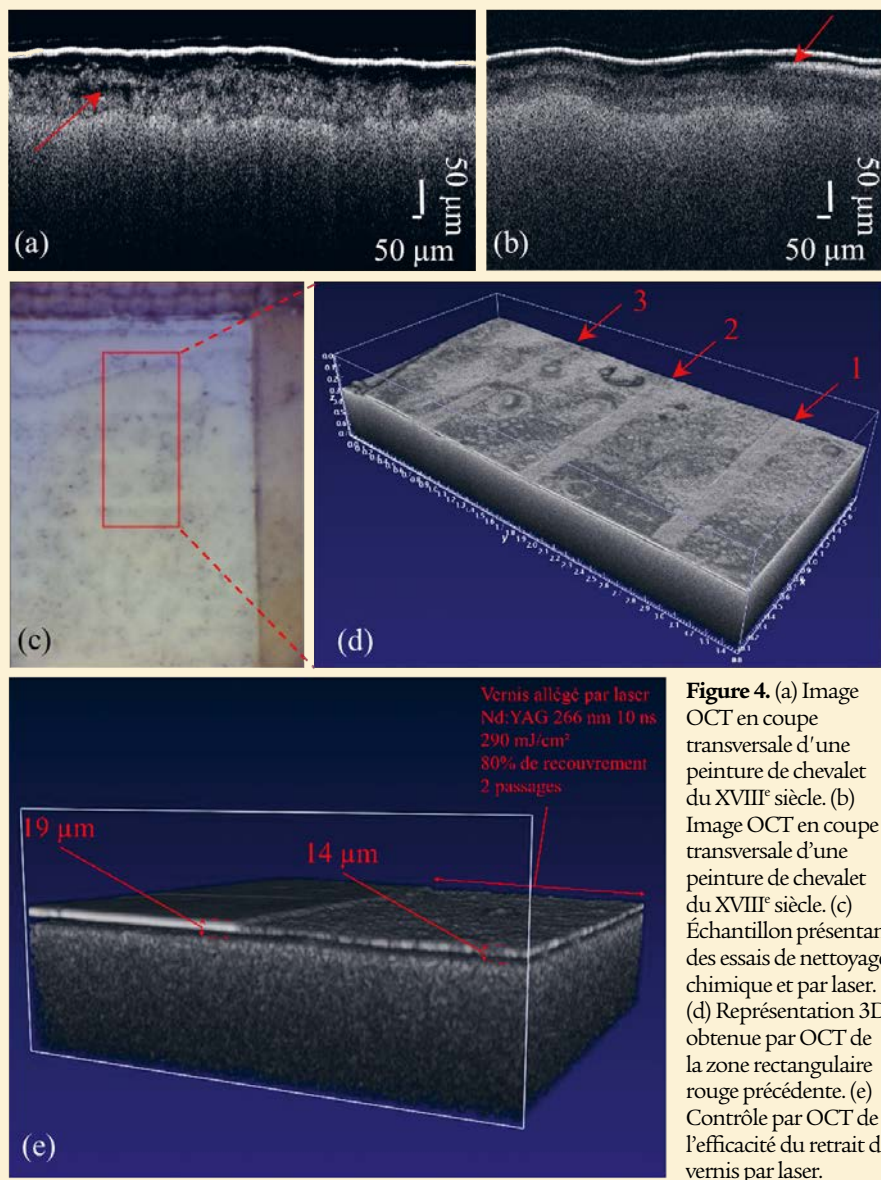
Ainsi, la capacité du dispositif à visualiser la structure de peinture peut fournir des informations sur les couches qui la composent, telles que le nombre, l'épaisseur, l'homogénéité,

le pouvoir couvrant etc. Ces caractéristiques structurelles sont parfois associées à un artiste ou une culture artistique spécifiques, ce qui signifie que le système peut potentiellement contribuer à l'authentification ou à déterminer la provenance des œuvres.

En outre, au C2RMF, nous utilisons le dispositif pour aider à caractériser l'état de conservation de l'œuvre. La figure 4a montre l'image en coupe transversale en niveaux de gris enregistrée à partir d'une peinture de chevalet du XVIII<sup>e</sup> siècle (huile sur toile). La stratigraphie de peinture à cet endroit est composée de la couche de vernis (couche optique sombre dans l'image), d'une double couche de peinture (couches optiques gris foncé) et d'une autre couche ou préparation de peinture ci-dessous (couche optique gris clair). Dans ce cas, une séparation entre les couches de peinture est détectée à l'aide d'un tomogramme (indiquée par la flèche rouge sur la figure 4a). Un détachement entre les couches est un problème de préservation important, car il peut évoluer par la suite en un soulèvement et ultérieurement à la perte d'une écaille de peinture. Avoir la possibilité de le détecter de manière non invasive au moyen d'un système d'imagerie à haute résolution est précieux pour les conservateurs et les restaurateurs, qui



**Figure 3.** Images OCT en coupes transversales. (a) Peinture de chevalet du XVI<sup>e</sup> siècle. (b) Peinture sur panneau du XVI<sup>e</sup> siècle. (c) Découverte archéologique polychrome (environ 900 av. J.-C.).



**Figure 4.** (a) Image OCT en coupe transversale d'une peinture de chevalet du XVIII<sup>e</sup> siècle. (b) Image OCT en coupe transversale d'une peinture de chevalet du XVIII<sup>e</sup> siècle. (c) Échantillon présentant des essais de nettoyage chimique et par laser. (d) Représentation 3D obtenue par OCT de la zone rectangulaire rouge précédente. (e) Contrôle par OCT de l'efficacité du retrait de vernis par laser.

peuvent intervenir rapidement et de façon précise. La *figure 4b* montre l'image OCT en coupe transversale du même tableau dans un endroit différent. La stratigraphie de la peinture est la même que celle observée précédemment (*figure 4a*), mais une modification optique affectant la partie inférieure de la couche de vernis est observée, indiquée par la flèche rouge sur la *figure 4b*. Le vernis, la couche de surface qui sert de couche finale à une peinture, peut facilement se modifier dans certaines conditions environnementales (exposition à la lumière, humidité, etc.) et perdre ainsi ses performances. Le scanner OCT a le mérite de localiser précisément le site de la modification optique, qui en ce cas concerne la partie inférieure de la couche de vernis,

à environ 30 µm de la surface. Il s'agit d'une information importante pour le domaine de la restauration car, en fonction de la profondeur de l'altération, les restaurateurs peuvent parfois décider de ne pas enlever complètement la couche

de vernis, mais de limiter l'intervention à un amincissement de la couche.

La *figure 4c* présente l'image d'un échantillon de toile peinte recouverte d'une couche de vernis. Cette maquette a été utilisée pour tester l'efficacité de l'élimination du vernis au moyen d'un nettoyage au laser. Trois lignes laser différentes se trouvent sur la zone balayée par l'OCT, incluse dans le carré rouge de la *figure 4c*. Les données volumétriques OCT résultantes indiquent très bien où les lignes laser sont situées dans la zone balayée et la profondeur maximale des lignes tracées par laser pour enlever le vernis en utilisant 3, 2 ou 1 impulsion(s) du laser (*figure 4d*). La *figure 4e* représente le résultat d'un allègement contrôlé de vernis de 5 µm obtenu en utilisant un laser Nd:YAG quadruplé à 266 nm (couche initiale de 19 µm d'épaisseur à 14 µm). Le niveau de contrôle atteint rend cet outil parfait pour cette application.

## Conclusion

Ces quelques exemples d'utilisation de l'OCT dans le domaine du patrimoine démontrent le potentiel de cette technique photonique. De précieuses informations peuvent être obtenues sur la technologie de fabrication des œuvres d'art et ainsi améliorer considérablement les pratiques de conservation en détectant et en localisant de façon non-invasive des défauts ou en monitorant les traitements d'intervention.

Il est probable que, dans un proche avenir, le système sera utilisé comme outil de routine pour la surveillance en temps réel du nettoyage des œuvres ou de toute autre intervention de restauration.

### POUR EN SAVOIR PLUS

- [1] P. Targowski, M. Iwanicka, Optical coherence tomography: its role in the non-invasive structural examination and conservation of cultural heritage objects—a review, *Appl. Phys. A*, vol. **106**, no. 2, pp. 265–277, 2012.
- [2] A.F. Fercher, W. Drexler, C.K. Hitzenberger, T. Lasser, Optical coherence tomography—principles and applications, *Rep. Prog. Phys.*, vol. **66**, no. 03, pp. 239–303, 2003.
- [3] D.P. Popescu et al., Optical coherence tomography: fundamental principles, instrumental designs and biomedical applications, *Biophys. Rev.*, vol. **3**, no. 3, p. 155, 2011.
- [4] P. Targowski, Complete list of papers published on OCT for examination of artwork, 2011. <http://www.oct4art.eu/>
- [5] V. Detalle, M. Sabsabi, Method and apparatus for depth profile analysis by laser induced plasma spectroscopy, *US patent* 6,532,068B2, 2003.