Un système d'imagerie temporelle Térahertz au service du patrimoine bâti

David Giovannacci[1,2], Dominique Martos-Levif[1,2,3], Stéphanie Duchêne[1,2], Bianca Jackson[3], Vincent Detalle[1,2,3], Didier Brissaud[1,2], Gillian Claire Walker[4]

[1] LRMH, Laboratoire de recherche des Monuments historiques, ministère de la Culture et de la Communication, 29, rue de Paris 77420 Champs-sur-Marne, France

[2] Centre de recherche sur la conservation (CRC, USR 3224), Muséum national d'histoire naturelle, ministère de la Culture et de la Communication, CNRS, 36, rue Geoffroy-Saint-Hilaire 75005 Paris, France

[3] C2RMF, Centre de recherche et de restauration des musées de France, 14, quai François-Mitterrand 75001 Paris, France

[4] School of Systems Engineering, University of Reading, Whiteknights, Reading RG6 6AY, Grande-Bretagne

Introduction

Le présent article a pour objectif de présenter les atouts et le potentiel du rayonnement térahertz (THz) pour l'analyse des matériaux du patrimoine bâti.

Le domaine des ondes THz se situe entre les ondes infrarouges et les micro-ondes. Le domaine fréquentiel de ces ondes se situe entre 100 GHz et 10 THz [1] (ou en énergie entre 0,4 et 40 meV) comme illustré sur la Figure 1 avec un exemple d'application des ondes selon le domaine de fréquences [1-2].

Il y a ainsi presque trois ordres de grandeur d'écart entre l'énergie des photons THz et l'énergie de transition entre niveaux électroniques des atomes. L'énergie mise en jeu est ainsi trop faible pour que l'interaction entre les ondes THz et les atomes induise un changement d'état électronique. En revanche, cette énergie est suffisante pour appartenir au domaine roto-vibrationnel des molécules. La spectroscopie THz permet alors d'identifier / de différencier les molécules composant la matière observée.

1. Il y a alors bien un abus de langage lorsque le terme « domaine THz » est donné.

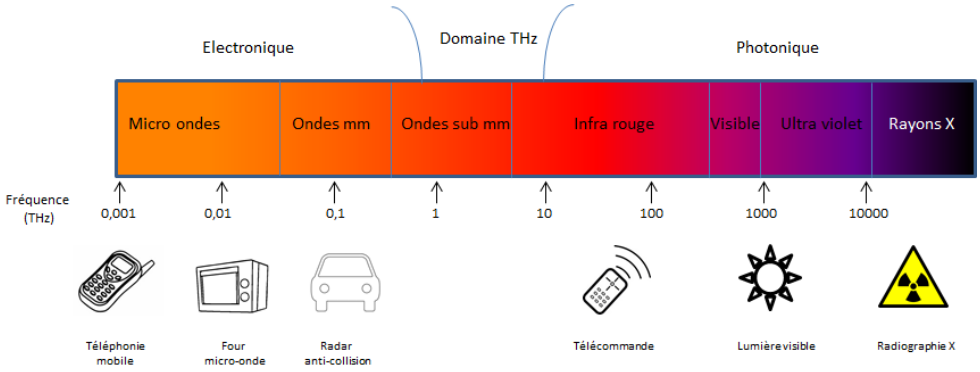


FIGURE 1 – Spectre électromagnétique de la lumière et exemple d'application.

Cette spectroscopie est très utilisée en astrophysique pour déterminer la composition moléculaire des gaz stellaires [1-3].

La relative bonne profondeur de pénétration des ondes THz à travers les matériaux isolants et non isolants en font un candidat idéal pour l'imagerie des couches internes des objets/matériaux observés avec une bonne résolution spatiale. La réflexion des ondes THz est complète sur les métaux et l'absorption est presque totale pour l'eau.

Pendant longtemps, le domaine THz a été ignoré et nommé le « fossé THz » du fait de la pauvreté des sources et des détecteurs THz disponibles avant l'avènement des lasers à très courtes durées d'impulsion, les lasers femto secondes. L'interaction non destructive et peu énergétique des ondes THz ouvre de nombreuses possibilités dans les domaines de la médecine et de la sécurité avec par exemple l'imagerie de cellules cancéreuses [4] ou de drogues et matériaux énergétiques [5]. Les ondes THz ont rencontré le grand public au sein de plusieurs aéroports (Munich, Moscou, Londres, Jérusalem...) avec les cabines déshabillant virtuellement les passagers.

La première étude publiée sur l'utilisation d'onde THz sur des matériaux du patrimoine est un acte de congrès de 2006 [6] portant sur l'analyse d'une peinture sur chevalet par imagerie et spectroscopie THz en transmission. L'année suivante, une deuxième étude porte sur l'analyse spectroscopique des pigments et des liants [7]. Depuis lors, les supports analysés se sont multipliés avec, par exemple, la dendrochronologie, la détection de dessins sous-jacents. La Figure 2 illustre les différents domaines d'utilisation de la spectroscopie THz sur les matériaux du patrimoine mobilier et immobilier au regard d'objectifs en science de la conservation.

1 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement du système est schématisé à la Figure 3, pour un échantillon possédant une interface en son sein, c'est-à-dire deux couches de nature différente. L'onde THz émise rencontre une première interface à la surface de l'échantillon. Selon la nature de ce dernier, une partie de cette onde est réfléchie pour être recueillie par l'antenne « réceptrice », tandis qu'une autre partie est transmise au

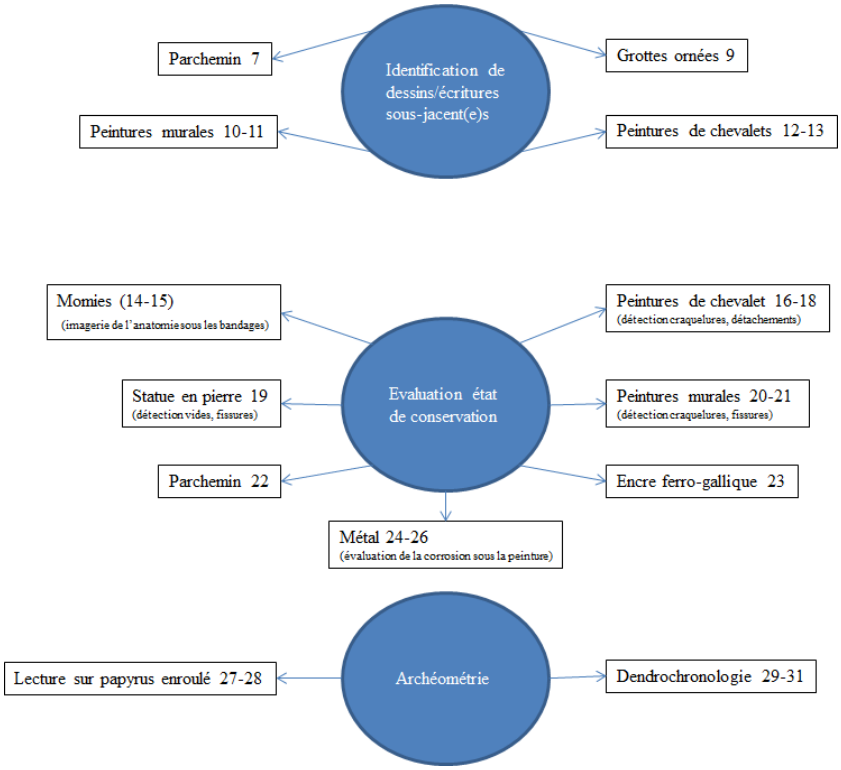


FIGURE 2 – Utilisation des THz dans le domaine des sciences de la conservation.

milieu. Ce retour de l'onde réfléchie à la surface se traduit par un pic. L'onde transmise, quant à elle, traverse le matériau, pour être réfléchie sur la deuxième interface. De la même façon que précédemment, une partie est réfléchie pour être recueillie par la « réceptrice » et une autre transmise. Enfin, une dernière réflexion aura lieu à la dernière interface, la sortie de l'échantillon.

La vitesse de l'onde THz est égale à la célérité de la lumière divisée par l'indice de réfraction du milieu. Cet indice est le coefficient de transmission de l'onde THz dans le milieu et est propre à chaque matériau. Il est utile ici d'introduire le terme d'épaisseur optique. L'épaisseur optique est un paramètre physique qui dépend de l'épaisseur de la couche considérée, mais également de l'indice de réfraction THz du milieu traversé. Ainsi les mesures de temps de vol peuvent être facilement converties en distance optique, d_o : un délai, t, de 1 ps correspond à une distance optique d'environ 300 µm ($d_o = c \times t$, avec c la vitesse de la lumière). Pour un milieu possédant un indice de réfraction, n, de 1,5, la distance réelle (d_0/n) devient alors de 200 µm ; la plupart des matériaux rencontrés jusqu'ici dans le domaine du patrimoine bâti possédant un indice compris entre un et deux.

Le pouvoir de résolution d'un tel système va être dicté par les lois de l'optique et est donc dépendant de la longueur d'onde utilisée (pour rappel, le domaine en longueur

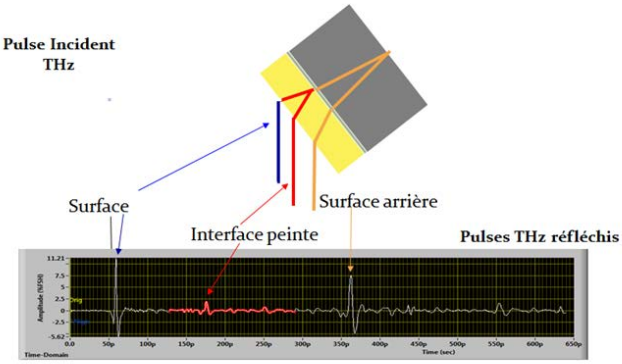


Figure 3 – Principe de fonctionnement du système.

des ondes THz est compris entre 30 µm et 3 mm) ; la distance minimale nécessaire pour séparer deux interfaces est par conséquent supérieure à la centaine de micromètres. Des techniques de traitement du signal avec par exemple, la filtration fréquentielle du signal puis sa déconvolution par une référence, améliorent cette résolution, jusqu'à une centaine de micromètres. La profondeur de pénétration des ondes THz dépend des matériaux analysés. Le système utilisé possède une fenêtre temporelle d'analyse de 320 ps, la profondeur observable ne pourra alors être supérieure à cinq centimètres (320 ps pour l'aller et retour de l'onde, donc 160 ps utiles, soit une distance dans l'air de 4,8 cm, l'indice de réfraction de l'air étant de 1).

2 Matériels et méthodes

2.1 Matériels

Le système mis au point en 2012 par le Laboratoire d'Optique Appliquée (CNRS-LOA) et le Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) dans le cadre du programme de recherche européen CHARISMA (n° 228330) est décrit à la Figure 4. Le cahier des charges du système imposait que le système :

- soit transportable dans une voiture ;
- ait une vitesse d'acquisition suffisante pour permettre l'imagerie ;
- soit opérationnel de façon nominale entre 0°C et 30°C ;
- ait une gamme de fréquence à minima entre 0,1 et 2 THz ;
- ait un rapport signal sur bruit au maximum de 60 dB afin de permettre des analyses spectroscopiques ;
- soit suffisamment versatile pour permettre des analyses en transmission et en réflexion avec la possibilité de déporter la source des antennes par l'utilisation de fibres optiques.

Après une étude du marché, il s'est avéré qu'aucun système commercial ne répondait aux critères exigés. Un prototype a donc été réalisé à partir de la source THz commercialisée par la société Picometrix (modèle T-Ray 4000), à laquelle sont adjointes

deux platines motorisées permettant une cartographie point par point en X et Y, pour un pas minimal de déplacement de 500 µm. Le système au complet pèse 60 kg et est transportable dans deux valises sur roulettes (60 × 50 × 30 cm chacune).

Depuis lors, plusieurs sociétés se sont engagées dans le développement de sources THz de « terrain » ayant une modulation de fréquence dans la gamme visée. Cependant le coût de tel système reste un frein à la grande diffusion de la technique.

L'onde émise par le système est une impulsion THz, dont la largeur de bande est d'environ deux THz. Les fréquences sont situées entre 20 GHz et 2,25 THz, avec un maximum d'émission vers 150 GHz. Dans la configuration utilisée sur le terrain, le point de mesure se présente sous la forme d'une ellipse de 1,7 × 1,9 mm.

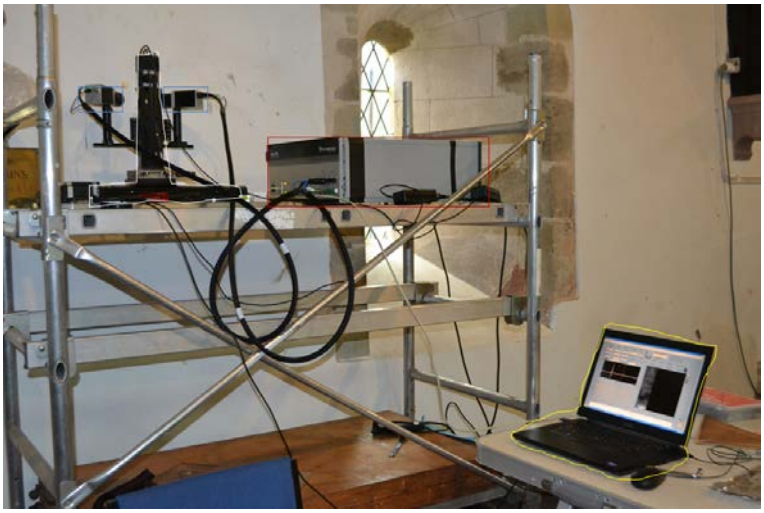


Figure 4 – Système THZ, Picometrix T-Ray 4000, ordinateur pour piloter le système (jaune), Laser femtoseconde (rouge), antennes (bleu), platine motorisée XY pour la cartographie point par point (blanc).

La course des platines motorisée est de 20 × 15 cm. Le temps imparti pour les analyses va dépendre de paramètres tels que le pas de déplacement, la vitesse de déplacement et surtout le nombre de spectre acquis par points de mesure. Un spectre moyen est calculé pour chaque point de mesure. Le temps d'analyse peut varier de 15 minutes à 6 heures. En configuration classique de terrain sur un échafaudage, le temps de mesure pour une surface de 300 cm^2 est environ de 3-4 heures. Les principales limites seront alors le temps d'analyse alloué et la topographie de l'objet. En effet, cette analyse repose sur l'optique, la distance à la surface doit donc être dans la profondeur de champs des optiques utilisées.

2.2 Méthodes

Les paramètres mesurés sont l'amplitude et la phase du champ électrique de l'onde THz émise en fonction de la durée – pour des durées très courtes – et avec une précision de l'ordre de quelques femtosecondes. Pour des durées si courtes, le montage dit en

« pompe-sonde » repose sur l'utilisation d'un laser femtoseconde. Celui-ci va exciter un semi-conducteur (Gallium Arsenide GaAs) et créer une paire électrons-trous, ce qui aura pour effet de produire un champ électromagnétique THz, dans une antenne dite alors « émettrice ». Pour la détection, une autre antenne sera soumise à un champ THz, qui induira une différence de potentiel mesurable. En employant l'impulsion laser pour les deux voies distinctes, la mesure « rapide » du champ électrique THz est alors possible.

Le système peut tout aussi bien servir en configuration réflective qu'en configuration transmissive (l'objet à analyser est alors placé entre les deux antennes). Dans l'usage courant du système sur le patrimoine bâti, seule la configuration réflective est utilisée. Dans cet article, nous nous intéresserons plus particulièrement aux résultats obtenus dans cette configuration.

L'imagerie THz permet de visualiser les différentes strates des œuvres, notamment les sous-couches, grâce à la réflexion différenciée en temps de l'onde THz émise. La position temporelle de l'écho dépend des propriétés optiques des matériaux rencontrés, de leur profondeur et de leur épaisseur [4]. Plus les couches sont fines, plus elles sont difficiles à détecter, avec une valeur minimale de 80 µm [5-6]. Par ailleurs, tout changement d'indice de réfraction implique une modification du signal THz et de son intensité, signalant ainsi le passage d'une interface à une autre. Les données issues d'un système THz s'apparente alors à un cube de données, ou les coordonnées des points sont données par la valeur que prend le signal en ce point et le délai à partir duquel ce signal est mesuré. L'utilisation des données dans l'espace des temps (THz TDI) permet d'avoir des informations sur la structuration physique de l'objet étudié, tandis que l'utilisation de l'espace des fréquences permet de faire de la spectroscopie THz.

L'imagerie temporelle peut se faire en 2D mais également en 3D avec une reconstruction des surfaces sur et dans l'objet.

Les cartographies 2D, appelées C-Scan peuvent se faire :

- en choisissant un temps fixe donc à une profondeur optique fixe dans l'échantillon ;
- ou en prenant une valeur particulière de l'onde réfléchie en ce point par exemple pour chaque pixel la valeur du maximum local. Chaque pixel de l'image résultante se situe alors à une profondeur optique différente dans l'échantillon.

Un exemple est donné sur la Figure 5a, avec un échantillon sans et avec un badigeon de plâtre (respectivement à gauche puis à droite sur la Figure 5a). La stratigraphie de l'échantillon est illustrée entre ces deux images. L'image de la Figure 5b) est un C-Scan où chaque pixel est le maximum local. La présence d'une couche de métal sous le badigeon de plâtre apparaît clairement sur la partie supérieure de l'éprouvette.

L'imagerie temporelle THz peut aussi permettre de visualiser les couches d'intérêt dans le matériau inspecté. Cependant, du fait de la longueur d'onde relativement grande des ondes THz, la résolution des systèmes est limitée par la diffraction sur des rugosités de l'ordre de grandeur de celle-ci [7]. En outre, le système présente des

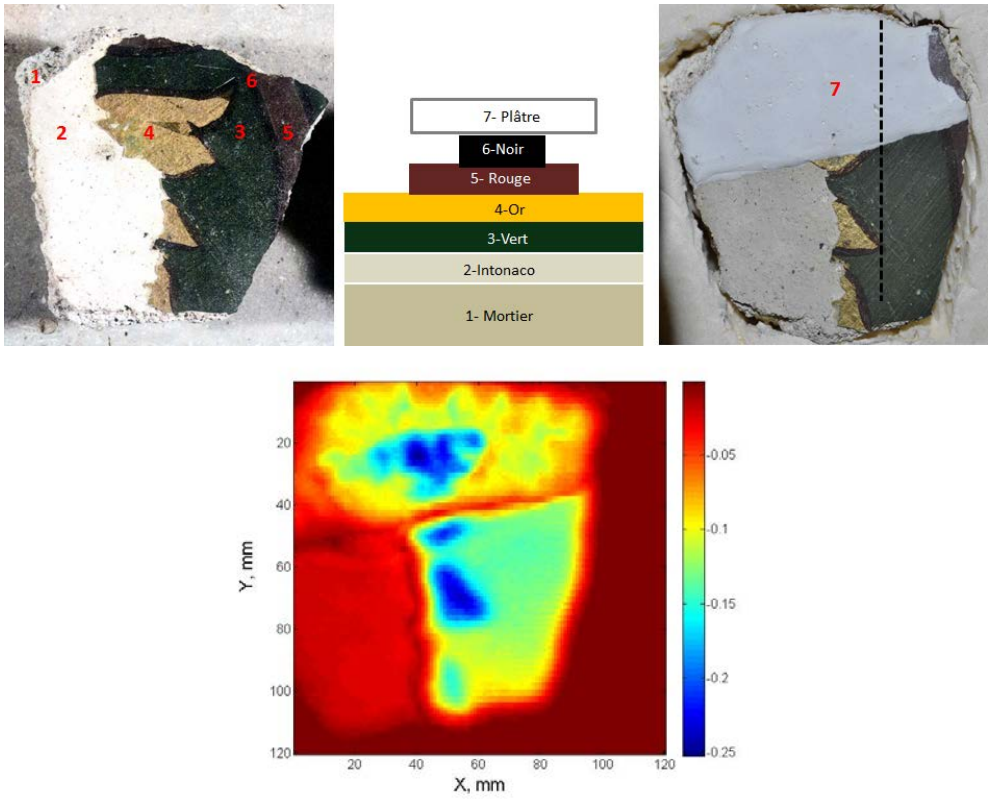


FIGURE 5 – (a) échantillon inspecté avant et après avoir été recouvert d'un badigeon de plâtre ; (b) C-Scan de l'échantillon une fois recouvert par le badigeon de plâtre avec pour chaque pixel la valeur maximale du signal.

limites pour imager une même interface recouverte par deux matériaux aux indices de réfraction très différents, comme illustrés sur la Figure 6, avec une coupe tomographique THz de l'échantillon (appelé B-scan) dans le sens de la hauteur selon la ligne représentée par le segment de droite en pointillé sur la Figure 5a. Une connaissance au préalable de la stratigraphie ou des mesures complémentaires sont nécessaires pour éliminer ce biais.

3 Cas d'études

Dans la perspective de la restauration d'une peinture murale de l'église St-Thomas (Salisbury en Angleterre), le maître d'ouvrage (le conseil de l'église) a souhaité compléter l'étude technique par des analyses scientifiques afin d'identifier de façon plus précise la composition sous-jacente. Cette peinture qui représente le Jugement dernier est située sur l'arc séparant le chœur de la nef. Elle est de facture assez récente et l'étude des sources documentaires révèle qu'elle pourrait masquer une peinture plus ancienne, réalisée au XV^{e} siècle. Celle-ci aurait été masquée par plusieurs couches de badigeon avant d'être dégagée, puis restaurée, ou plutôt totalement repeinte par

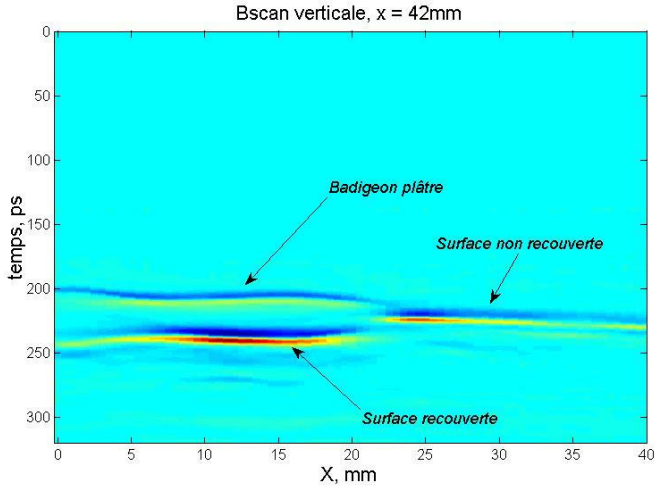


FIGURE 6 – Résultat imagerie THz-TDI pour l'échantillon de la Figure 5a ; B-scan obtenu en prenant les spectres temporels à X = 42 mm, pour une ordonnée fixe. Ce graphique représente la variation de l'amplitude du signal en fausse couleur en fonction du temps de vol à l'antenne réceptrice (en ordonnée) et de la position du point en X (en abscisse), X et Y étant les coordonnées spatiales de déplacement de la platine motorisée. La surface de l'échantillon et la face arrière de l'échantillon sont indiquées.

Clayton et Bell dans les années 1880. La peinture est dans un état de conservation satisfaisant malgré un encrassement généralisé, quelques pertes d'adhésion au substrat et quelques lacunes. La présence d'une couche picturale sous-jacente est visible sous les lacunes et semble confirmer la présence d'une composition antérieure (*cf.* Figure 7).

Des mesures ont été effectuées sur différents personnages, éléments architecturaux ou végétaux ; la partie senestre de l'auréole du Christ est particulièrement intéressante car elle contient de la feuille d'or, élément métallique dont la réflexion aux ondes THz est importante. Ainsi, l'image obtenue après traitement des données THz présente deux tracés à forte réflexion. La comparaison avec l'image visible permet de différencier une première zone correspondant au motif doré observé en surface. La seconde (Figure 8) située à environ 100 µm de profondeur semble correspondre à un tracé de même type avec un léger décalage (l'indice de réfraction est ici pris égale à 1,6, ce qui est la valeur moyenne pour un badigeon classiquement utilisée [20]).

Un prélèvement effectué dans cette région d'intérêt a permis d'effectuer une coupe stratigraphique (Figure 9) et de confirmer la présence d'une couche picturale sous-jacente. Cette dernière, réalisée sur une couche de badigeon de chaux, comporte une couche de préparation de couleur rose, une couche rouge composée d'ocre rouge et de minium et une feuille d'or située à environ 100 µm de profondeur, c'est-à-dire à la même profondeur que la couche présentant une forte réflexion aux ondes THz. Une couche de badigeon de chaux recouvre l'ensemble. La composition superficielle est composée d'une couche de couleur noire et d'une feuille d'or.



FIGURE 7 – (a) photographie du *Jugement dernier* (The Royal Commission of Historic) ; (b) détail de la surface avec traces visibles d'une couche sous-jacente (flèche blanche).

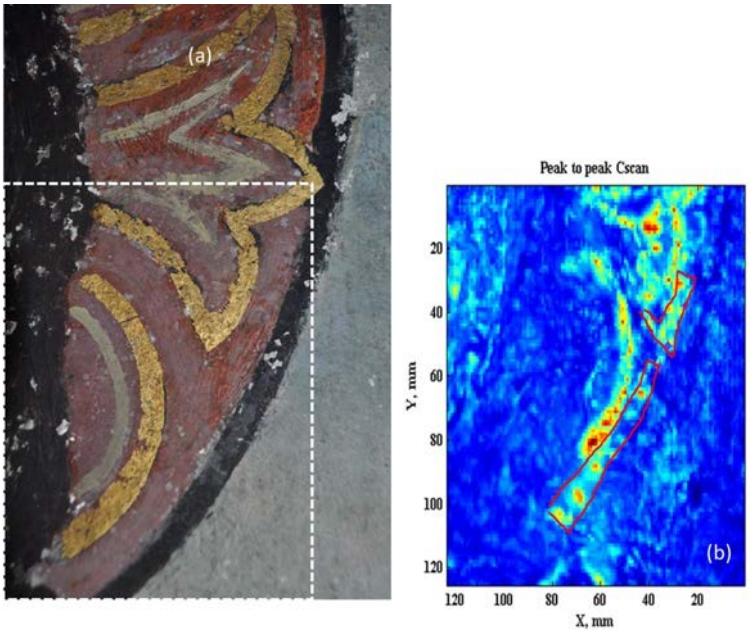


FIGURE 8 – (a) photographie de la section senestre de l'auréole de Jésus-Christ ; (b) superposition de la section senestre précédente avec l'imagerie pic à pic THz obtenue. La zone en rouge est significative d'une forte réflexion sous la surface.

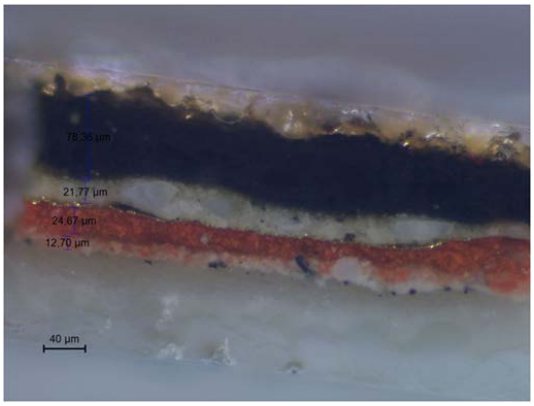


Figure 9 – Coupe stratigraphique d'un échantillon prélevée sur la zone visible Figure 8.

Cette étude a permis de vérifier de façon non-destructive l'existence d'une composition sous-jacente et la présence d'une feuille métallique. L'indice de réfraction THz utilisé est du bon ordre de grandeur.

Dans le cadre d'une large étude archéométrique, les peintures murales de la chapelle Saint-Jean-Baptiste, dite Chapelle des fresques, sise dans la chartreuse du Val-de-Bénédiction à Villeneuve-lès-Avignon, ont fait l'objet d'une grande campagne analytique en 2012. Les fresques ont été réalisées au cours du XIV^{e} siècle par Matteo Giovannetti.

Une des questions posées étaient de savoir s'il était possible de détecter par contrôle non destructif (CND) un dessin préparatoire, la sinopia. La Figure 10 illustre le mur Est de la chapelle et deux zones inspectées. La première, dans le cadre bleu (7 $\times$ 10 cm), contient un dessin figuratif, un dessin préparatoire devrait donc y être présent en sub-surface. La seconde, dans le cadre orange (6 $\times$ 9 cm), a été choisie dans le ciel, sans dessin figuratif, donc probablement sans sinopia.

Les figures 11a et 11b illustrent des B-scan des deux zones supposées avec et sans sinopia. Les différents B-scan réalisés dans la zone délimitée en bleu présentent une ligne continue (indiquée par la flèche jaune), à une profondeur d'environ 1 mm (en considérant un indice de réfraction de 1,6 [20]), tandis que cette ligne n'apparaît pas dans la zone délimitée en orange. Cette ligne traduit la présence d'une interface avec une réflectivité inférieure à celle de la surface. Cette propriété concorde avec les résultats de la réponse THz de la sinopia [32]. Ces données laissent à penser que cette interface est bien le dessin préparatoire recherché.

Enfin, sur l'intégralité des B-scan de cette zone, une interface mouvementée apparait à une profondeur d'environ un centimètre. Ce signal correspond très probablement à une réflexion du signal THz sur la pierre utilisée pour construire les murs. Cette morphologie est comparable à celle visible à l'œil nu sur les parties où l'enduit a disparu.



FIGURE 10 – Photographie du mur est de la chapelle Saint-Jean-Baptiste, Villeneuve-lès-Avignon. section inspectée par THz, Carré bleu : zone analysée dans la Figure 11a et carré orange : zone analysée de la Figure 11b. © photo B. Trichereau.

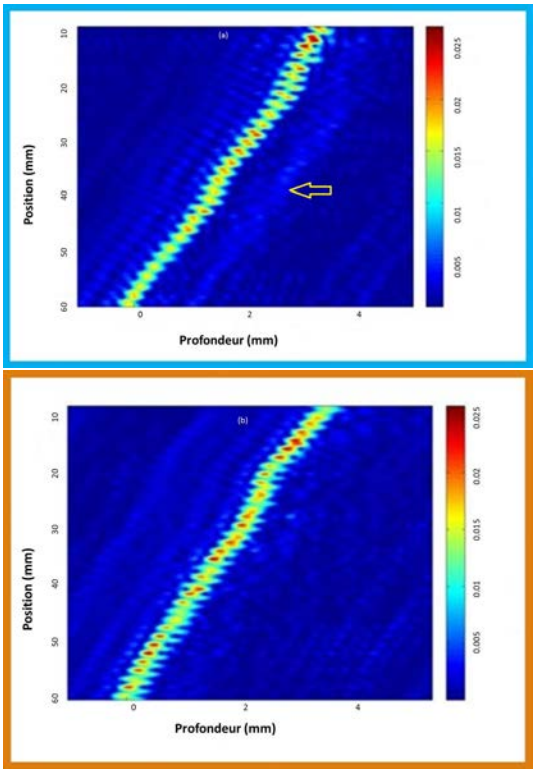


FIGURE 11 – B-scan de la section inspectée par THz dans la chapelle Saint-Jean-Baptiste. (a) B-scan issu de la zone du carré bleu dans la Figure 11a ; (b) B-scan issu de la zone du carré orange dans la Figure 11b.

Conclusion

Le système THz, non destructif, permet une visualisation de sous-couches du fait d'une réflexion différenciée en temps de l'onde THz émise. Le retard de l'écho dépend des propriétés optiques des matériaux rencontrés et de leur profondeur. L'imagerie temporelle THz permet donc une étude stratigraphique des objets multicouches. Cela est particulièrement utile pour l'étude des peintures murales.

À court et moyen terme les perspectives concernent essentiellement une mise au point d'une métrologie dédiée aux ondes THz à partir :

- d'une meilleure compréhension des mécanismes mis en jeu lors de l'interaction lumière – matière (rôle de la diffraction, minimisation des pertes par réfraction, impact de la rugosité) ;
- de la mise en place d'une stratégie de traitement des données prenant en compte l'aspect « *Big Data* » des données THz.

À plus long terme, la combinaison de l'imagerie THz avec d'autres techniques d'imagerie est à envisager. En effet une étude récente a démontré la complémentarité de l'imagerie THz avec l'holographie interférométrique et la thermographie infrarouge stimulée [33].

Références

[1] K. E. Peiponen, J. A. Zeitler and M. Kuwata-Gonokami, Terahertz Spectroscopy and Imaging, vol. 171, Springer Series in Optical Science, Springer Heidelberg New York Dordrecht London, 641 pages, 2013.

[2] L. Chusseau, J. Demaison, J.L. Coutaz, Optoélectronique térahertz, EDP Sciences. 240 pages, 2008.

[3] J. Labaune, E. Abraham, Le rayonnement térahertz pour l'analyse des matériaux du patrimoine culturel, Technique de l'ingénieur, RE 213, 28 pages, 2013.

[4] E. Pickwell-MacPherson, V. Wallace, Terahertz pulsed imaging – a potential medical imaging modality ? Photodiagnosis and Photodynamic Therapy. 6-2, 128-134, 2009.

[5] A. G. Davies, A. D. Burnett, W. Fan, E. H. Linfield, et J. E. Cunningham et al, Terahertz spectroscopy of explosives and drugs. Materials Today.11-3, 18-26, 2008.

[6] W. Köhler, U. Klotzbach, E. Beyer, S. Winnerl, M. Helm, F. Rutz, C. Jördens, M. Koch, H.Leitner, «Non-Destructive Investigation of Paintings with THz-Radiation», Proc. Europ. Conf. Non Destructive Testing, 1-7, 2006.

[7] K. Fukunaga, I. Hosako, «THz Spectroscopy For Analysis Of Paintings 2007». Annual Report – Conference On Electrical Insulation And Dielectric Phenomena, p. 715-718, 2007.

[8] K. Fukunaga, Y. Ogawa, S. Hayashi, Application of terahertz spectroscopy for character recognition in a medieval manuscript. IEICE Electron. Express, 5, 223-228, 2008.

[9] G. C. Walker, J. W. Bowen, J. B. Jackson, J. Labaune, G. Mourou, M. Menu, W. Matthews, Subsurface terahertz imaging through uneven surfaces : visualizing Neolithic wall paintings in Çatalhöyük, Optics express, 21- 7, 8126-8134, 2013.

[10] J. B. Jackson, M. Mourou, J.F. Whitaker, I.N. Duling III, S.L. Williamson, M. Menu, G.A. Mourou, Terahertz imaging for non-destructive evaluation of mural paintings. Optics Communications, 281-4, 527-532, 2008.

[11] K. Fukunaga, M. Picollo, «THz techniques as a complementary non-invasive diagnostic method for the study of medieval panel paintings», IEEE International Conference on Solid Dielectrics, Bologna, Italy, p. 493-496, 2013,

[12] E. Abraham, A. Younus, A. El Fatimy, J. C. Delagnes, E. Nguéma, et P. Mounaix, Broadband terahertz imaging of documents written with lead pencils. Optics Communications, 282-15, 3104-3107, 2009.

[13] A.J.L Adam, P.C.M. Planken, S. Meloni, J. Dik, Terahertz imaging of hidden paint layers on canvas. Opt. Express, 17, 3407–3416, 2009.

[14] F. Cesarani, M. C. Martina, A.Ferraris, R. Grilletto, R. Boano, E. Fiore Marochetti, A. M. Donadoni, G. Gandini 1Whole-body three-dimensional multidetector CT of 13 Egyptian human mummies. American Journal of Roentgenology, 180-3, 597-606, 2003.

[15] H. Hoffman, W.E. Torres, R.D. Ernst, Paleoradiology : Advanced CT in the evaluation of nine Egyptian mummies. Radiographics, 22, 377-385, 2002.

[16] A. Cosentino, C.L. Koch, Dandolo, A. Cristaudo, P. Uhd Jepsen, Diagnostics pre and post Conservation on a 14th Century Gilded Icon from Taormina, Sicily. Available online : http ://www.e-conservation.org/issue-3/49-Diagnostics-on-a-14th-Century-Gilded-Icon-from-Taormina (consultable depuis le 18/02/2016), site consulté le 25/07/2017.

[17] M. Picollo, K. Fukunaga, J. Labaune, Obtaining noninvasive stratigraphic details of panel paintings using terahertz time domain spectroscopy imaging system. J. Cult. Herit., 16, 73–80, 2015.

[18] J. Dong, J. B. Jackson, M. Melis, D. Giovannacci, G.C. Walker, A. Locquet, J.W. Bowen, D.S. Citrin, D.S., Terahertz frequency-wavelet domain deconvolution for stratigraphic and subsurface investigation of art painting. Opt. Express 24, 26972-26985, 2016.

[19] K. Krügener, M. Schwerdtfeger, S.F. Busch, A. Soltani, E. Castro-Camus, M. Koch, W. Viöl, Terahertz meets sculptural and architectural art : Evaluation and conservation of stone objects with T-ray technology. Sci. Rep, 5,14842, 1-12, 2015.

[20] G.C Walker, J. B. Jackson, D. Giovannacci, J. W. Bowen, B. Delandes, J. Labaune, G. Mourou, M. Menu, V. Detalle, «Terahertz analysis of stratified wall plaster at buildings of cultural importance across Europe». Proceedings of the SPIE 8790, Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV, Munich, Germany ; Volume 8790, p. 1-8, 2013.

[21] D. Giovannacci ; D. Martos-Levif ; G. C. Walker ; M. Menu and V. Detalle, «Terahertz applications in cultural heritage : case studies». Proceedings of the SPIE 9065, Fundamentals of Laser-Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013 (FLAMN 2013), St Petersbourg, Russia, Volume 9065, p. 906510-1-906510-8, 2013

[22] T. Bardon, R.K. May, P.F. Taday, M. Strlic, «Material characterization of historical parchment using terahertz time-domain spectroscopy». Proc. of 39th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), Tucson, AZ, USA, p. 1-2, 2014.

[23] T. Bardon, R.K. May, P.F. Taday, M. Strlic. Systematic study of terahertz time-domain spectra of historically informed black inks. Analyst, 138, 4859-4869, 2013.

[24] T. Kurabayashi, S. Sakai, K. Fujino, «Sub-terahertz imaging of painted steel». Proc. of the 35th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz (IRMMW-THz), Rome, Italy, p. 1-2, 2010.

[25] R.F. Anastasi, E.I. Madaras, «Terahertz NDE for under paint corrosion detection and evaluation». AIP Conf. Proc., 820, p. 515–522, 2006.

[26] H. Zhao, Hui Zhao, D. Wu, H. Zhan, Q. Sun K. Zhao. «Detection of iron corrosion by terahertz time-domain spectroscopy». Proceedings of the SPIE 9795, Selected Papers of the Photoelectronic Technology Committee Conferences, Hefei, Suzhou, and Harbin, China, p. 97953, 2015.

[27] J. Labaune, J.B. Jackson, S. Pagès-Camagna, I.N. Duling, M. Menu, G.A. Mourou, Papyrus imaging with terahertz time domain spectroscopy. Appl. Phys. A, 100, 607–612, 2010.

[28] G. C. Walker ; J. Labaune ; J. W. Bowen ; J.B. Jackson ; S. Hadjiloucas ; G. Mourou ; « Deconvolution : Imaging the unturned page». Proceedings of the 2011 36th International Conference on Infrared, Millimeter and Terahertz Waves (IRMMW-THz), Houston, TX, USA, p. 1-2, 2011.

[29] M. Koch S. Hunsche, P. Schuacher, M. C. Nuss, J. Feldmann, J. Fromm . THz-imaging : A new method for density mapping of wood. Wood Sci. Technol., 32, 421–427, 1998.

[30] R.M Groves, B. Pradarutti, E. Kouloumpi, W. Osten, G. Notni, 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging. NDT E Int., 42, 543–549, 2009

[31] J.B Jackson, M. Mourou, J. Labaune, J.F. Whitaker, I.N. Duling, S.L. Williamson, C. Lavier, M.Menu, G.A. Mourou, G.A.Terahertz pulse imaging for tree-ring analysis : A preliminary study for dendrochronology applications. Meas. Sci. Technol., 20-7, 075502, 1-10, 2009.

[32] K. Fukunaga, I. Hosako. Innovative non-invasive analysis techniques for cultural heritage using terahertz technology, Comptes Rendus Physique 11, 519–526,2010.

[33] D Giovannacci, V. Tornari, M. Andrianakis, Y. Mélinge, D. Brissaud, J. Wassermann, L. Cristofol « Mise au point d'une plateforme expérimentale CND de caractérisation de la structure interne de plâtre soumis au feu». RUGC 35es Rencontres universitaires de génie civil, Nantes, France, p. 249-252, 2017.