

---

# Mise au point d'une plateforme expérimentale CND de caractérisation de la structure interne de plâtre soumis au feu

**D. Giovannacci<sup>1</sup>, V. Tornari<sup>2</sup>, M. Andrianakis<sup>2</sup>, Y. Mélinge<sup>3</sup>,  
D. Brissaud<sup>1</sup>, J. Wassermann<sup>3</sup>, L. Cristofol<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> LRMH, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Ministère de la Culture et de la Communication, 29 rue de Paris, 77 420 Champ-sur-Marne, France

Sorbonne Universités, Centre de Recherche sur la Conservation (CRC, USR 3224), Muséum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture et de la Communication, CNRS; CP21, 36 rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris, France ([david.giovannacci@u-cergy.fr](mailto:david.giovannacci@u-cergy.fr), [didier.brissaud@u-cergy.fr](mailto:didier.brissaud@u-cergy.fr))

<sup>2</sup> Institute of Electronic structure and Laser - Foundation for Research and Technology Hellas, N. Plastira 100, Voutes, Crete, Greece ([vivitor@iesl.forth.gr](mailto:vivitor@iesl.forth.gr), [mandrian@iesl.forth.gr](mailto:mandrian@iesl.forth.gr))

<sup>3</sup> L2MGC, Laboratoire de Mécanique et Matériaux du Génie Civil – EA 4114, Université de Cergy-Pontoise – 5 Mail Gay Lussac, Neuville sur Oise – 95031 Cergy-Pontoise Cedex ([yannick.melinge@u-cergy.fr](mailto:yannick.melinge@u-cergy.fr), [jerome.wassermann@u-cergy.fr](mailto:jerome.wassermann@u-cergy.fr), [lilian.cristofol@u-cergy.fr](mailto:lilian.cristofol@u-cergy.fr))

---

*RÉSUMÉ.* Dans cet article, l'étude du comportement de panneaux à base de sulfate de calcium soumis à une élévation thermique de type incendie est menée expérimentalement dans un contexte THCM au moyen de différentes techniques et notamment des méthodes non invasives et non destructives. La complémentarité des approches permet d'améliorer l'état des connaissances et de fiabiliser une plateforme CND

*ABSTRACT.* The present paper consists in the THCM behavior study of plaster boards submitted to thermal loading like fire event. Several experimental methodologies are used and more especially those who are non invasives and non destructives. Results delivered from DHSPI, SIRT and THz are compared to those already highlighted previously with invasives and destructives methods.

*MOTS-CLÉS:* Contrôle non destructif, plâtre, imagerie THz, Holographie interférométrique, Imagerie infrarouges.

*KEY WORDS:* Non destructive control, plaster, THz Imagery, Interferometric holography, IR imagery.

---

## 1. Introduction

Dans cet article, nous présentons un ensemble de travaux qui nous conduit aujourd'hui à la mise en œuvre d'une plateforme CND. La version présentée et modifiable a été utilisée pour améliorer la compréhension du comportement d'éléments de structure plans chauffés sur une face entre la température ambiante et 1000°C selon un protocole de chauffe imposé. Les travaux expérimentaux sont réalisés dans une logique THCM multicritères et les données recueillies constituent une banque de données pour enrichir la pertinence de calculs numériques de résistance thermique et au feu en particulier. L'exemple de panneaux à base de sulfate de calcium est retenu dans cette étude pour son potentiel protection passive en cas d'incendie (exploitation du processus de déshydratation), le caractère isolant et la fragilité mécanique qui donne lieu à des scénarios d'endommagements transposables assez riches d'enseignements pour des configurations plus complexes. Dans le cas basique d'un mélange d'hémihydrate naturel et d'eau, le milieu poreux résultant est homogène et perméable macroscopiquement. L'élévation de la température conduit en général à cinq changements de phases caractéristiques (quatre endothermiques, un exothermique avec ou sans transfert de masse) et polymorphes qui accentuent la dégradation mécanique de la structure par l'émergence d'un réseau de fissures, [ROJ 13a], [ROJ 13b], [MEL 11]. L'amélioration des méthodologies expérimentales et de l'état des connaissances permet d'être de plus en plus exigeant en remplaçant petit à petit les techniques invasives et perturbatrices par des méthodologies non invasives. La combinaison des jeux de données permet alors de conforter les interprétations déjà formulées et de calibrer s'il est besoin les nouveaux.

Depuis une vingtaine d'années, le Contrôle Non Destructif (CND) est au cœur des préoccupations R&D en instrumentation. La miniaturisation grandissante des capteurs (CCD, ICCD), des sources excitatrices (lasers, tubes à rayons X) et des supports informatiques favorisent cet essor. Ainsi, trois techniques non destructives ont pu bénéficier de ce bond technologique, l'holographie interférométrique de speckle (DHSPi), la thermographie infrarouges stimulée (SIRT) et l'imagerie Tétra-Hertz (Thz). Dans le monde civil, l'holographie interférométrique de speckle (DHSPi) et la thermographie infrarouges stimulée (SIRT) sont principalement des techniques du contrôle en qualité industrielle, tandis que l'utilisation de l'imagerie Thz a été initiée pour la sécurité aéroportuaire. Ces trois techniques proposées permettent *a priori* d'obtenir des informations sur la structure des objets étudiés en utilisant les propriétés d'interaction d'une onde excitatrice avec l'objet. Le DHSPi repose sur l'interférométrie holographique de speckle en utilisant les propriétés de cohérence des faisceaux lasers. Une source laser éclaire à la fois un plan de référence (R) et la surface de l'objet d'étude (O). Les faisceaux réfléchis par ces deux éléments interfèrent sur la matrice CCD d'une caméra. Les déplacements de la surface de l'objet suivant la direction d'observation modifient la figure d'interférence obtenue, avec une précision sur le déplacement d'une demi-longueur d'onde de la source laser utilisée. Les images obtenues se présentent sous la forme d'une succession de franges d'interférence, dont la forme et la fréquence permettra directement de renseigner les mouvements en surface et en profondeur de l'échantillon ([TOR07], [TOR13]). La SIRT repose sur la mesure de la propagation de chaleur dans l'objet irradié par une source de chaleur ponctuelle (un laser) ou surfacique (des lampes céramiques). La mesure est faite par l'intermédiaire d'une caméra thermique infrarouges. Le signal photo thermique enregistré dépend de nombreux paramètres physiques, comme la conductivité, l'émissivité, la diffusivité, la température, la chaleur spécifique, ... eux-mêmes conditionnés par certaines propriétés de l'objet observé, comme la topographie, la présence de délamination, de fissures, de l'état structurel du matériau, la teneur en eau, les réactions chimiques, ... Par exemple, la présence d'une poche d'air sous la surface se traduit par un point chaud en surface ([TIT01], [TOR16]). L'analyse de la cinétique du retour à l'équilibre après sollicitation permet de renseigner la profondeur de la perturbation, avec une résolution de l'ordre de la longueur d'onde de l'excitatrice. Les ondes THz sont des ondes sub-millimétriques, situées entre les ondes infrarouges et les micro-ondes. Théoriquement, ces ondes possèdent les propriétés des ondes « électroniques » et des ondes d'optique classique, à savoir :

- une interaction onde-matière non intrusive et non destructive du fait de la faible valeur de l'énergie déposée par le rayonnement,
- la possibilité de faire de la spectroscopie d'identification/différenciation des molécules (existence d'une signature THz des molécules dans le domaine d'énergie de rotation-vibration),
- la relative bonne profondeur de pénétration des ondes à travers les matériaux isolants et non-isolants (à noter que les métaux sont parfaitement réfléchissants pour les ondes THz et que l'eau est absorbante),
- la possibilité de réaliser des images.

Le principe de fonctionnement du système peut être présenté comme suit. L'existence d'une interface ou discontinuité au sein d'un échantillon sollicité par une onde Thz conduit à une onde réfléchi et une onde

transmise. Une part de l'énergie de l'onde incidente est absorbée. Selon la nature de l'échantillon, l'onde réfléchie est recueillie par l'antenne « réceptrice » et est traduite par un signal plus ou moins explicite. La propagation de l'onde transmise peut être à nouveau décomposée selon le même schéma en fonction des discontinuités successives qui compose la structure du matériau. L'antenne réceptrice reçoit au cours du temps les réflexions. Enfin, pour un échantillon d'épaisseur fixée, le dernier pic détectable en réflexion représente la « sortie » de l'échantillon. Le système permet donc de visualiser les différentes strates des œuvres, notamment les sous-couches, grâce à la réflexion différenciée en temps, de l'onde THz émise pour une résolution en profondeur de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde utilisée, soit 100  $\mu\text{m}$  ([PEI13], [WAL13]).

Les informations obtenues par ces trois techniques sont donc pleinement complémentaires de par leur résolution, le temps de traitement de l'information et les surfaces inspectées. En effet, la SIRT permet immédiatement d'avoir une image à l'échelle métrique des défauts de l'échantillon avec une résolution millimétrique, tandis que le DHSPI sur la même zone, permet d'avoir des informations sub micrométriques mais avec un délai plus long. Néanmoins, l'information obtenue par ces deux systèmes traduit les effets en surface d'une ou de perturbations interne, mais ne permet pas de localiser la position de la perturbation. Un même effet en surface peut être obtenu pour une grosse perturbation très profonde (quelques cm), ou une petite perturbation en sub-surface (quelques mm). Le système d'imagerie Thz permet de visualiser directement ces interfaces et d'en connaître la position.

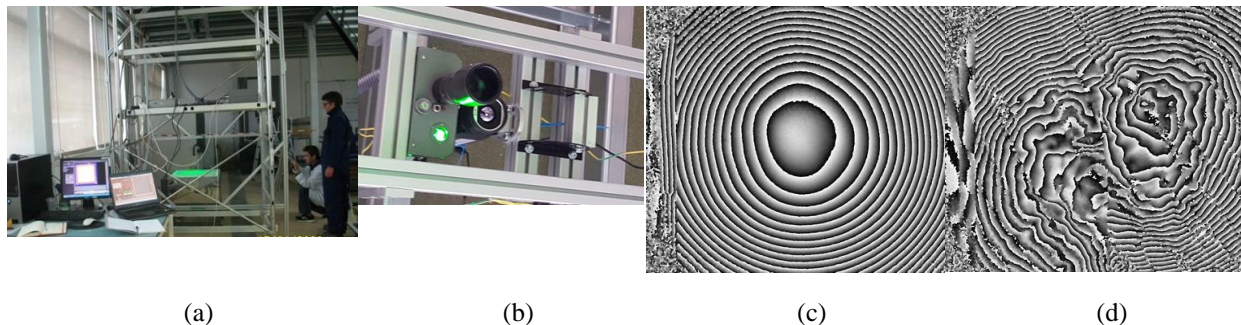
## 2. Moyens expérimentaux

### 2.1. Four et éprouvettes

La stimulation thermique est fournie par un four électrique dont les propriétés sont identiques à celles déjà présentées dans [ROJ 13a]. Les échantillons sont des plans de 550x550  $\text{mm}^2$  et d'épaisseur constante. Le protocole de préparation et la cure sont également présentés en détail dans [ROJ 13a].

### 2.2. DHSPI

Le laser utilisé est un laser Nd:YAG Elforlight G4 avec une puissance de 250 mW à 532 nm, à grande cohérence spatiale et temporelle. Le détecteur CDD est un capteur Basler A102f avec une résolution de 1392 x 1040 pixels, pour une taille de pixel de 6,45  $\mu\text{m}$  x 6,45  $\mu\text{m}$  en très haute résolution. La résolution spatiale du système est de l'ordre de 266 nm ( $\lambda/2$ , avec  $\lambda$  la longueur d'onde de l'excitatrice). Le dispositif est visible figure 1-b, sur la gauche. Les franges d'interférence obtenues sont les résultats de la moyenne de 5 mesures toutes les 10 secondes. Une illustration de résultats obtenus est présentée sur les figures 1-c et 1-d.



**Figure 1.** Plateforme CND, composée (a) par un four radiant électrique horizontal fermé par l'échantillon à caractériser et la structure de positionnement des instruments de mesure. (b) : détail des imageurs DHSPI et IR. Exemple de résultats obtenus à l'aide du DHSPI. Variations des franges d'interférence au cours d'une chauffe à 5°C/min sur une plaque de gypse (ech 7) à différents instants de la chauffe, (c)  $t = 370$  s, (d)  $t = 2020$  s

### 2.3. IR

La caméra thermique employée est un microbolomètre Flir (Modèle A655SC) de 640x480 pixels de résolution (16bits, 50Hz) et de bande spectrale comprise entre 7,5 et 14 $\mu\text{m}$ . Le pilotage est réalisé au moyen du logiciel Research IR, Flir. Une illustration de résultats obtenus est présentée sur la figure 2-c.

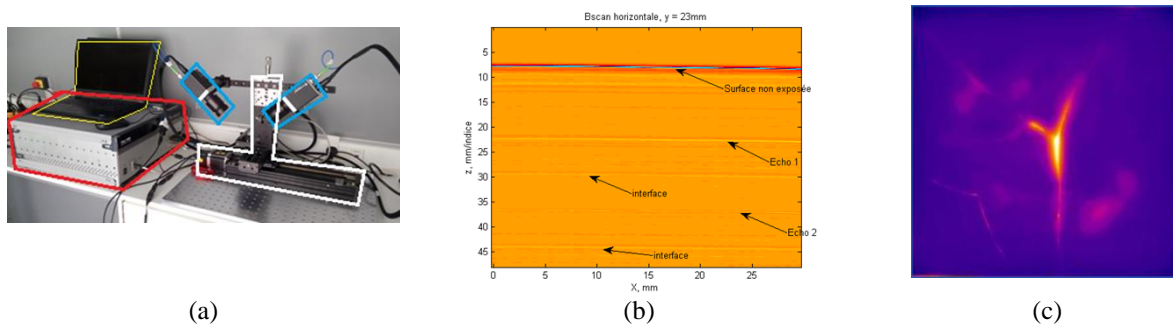
### 2.4. THz

Le système est constitué de la source THz Picometrix (modèle T-ray 4000), à laquelle sont adjointes deux platines motorisées permettant une cartographie point par points en X et Y, pour un pas minimum de déplacement de 500  $\mu\text{m}$ , figure 2. Les paramètres mesurés sont l'amplitude et la phase du champ électrique de

l'onde THz émise en fonction du temps, pour des temps très courts et avec une précision de l'ordre de quelques femto secondes. Il est possible d'obtenir des cartographies des échantillons de types différents :

- Un profil tomographique THz, appelé également « B-scan ». La visualisation des résultats est faite en conservant l'intégralité du signal temporel et en accumulant les signaux pour toute une ligne (x ou y constant). Une illustration d'un B-scan est présentée sur la figure 2-b,

A partir de l'extraction d'une matrice à trois dimensions de la matrice de données : une reconstitution en 3D est réalisée en sélectionnant sur le signal en temps, les extrema locaux traduisant un changement d'indice et donc l'apparition d'une interface entre deux matériaux.



**Figure 2.** (a) Système THz, Picometrix T-Ray 4000 et système de pilotage, laser femto seconde (rouge), antennes (bleu), platine motorisée XY pour la cartographie point par point (blanc). (b) Bscan obtenu sur une plaque de plâtre soumise à un feu standard après 2h d'exposition. (c) Visualisation de la face non exposée d'une plaque de plâtre soumise à un feu standard après 2h d'exposition.

### 3. Résultats-Discussion-Conclusion

Pour différents scénarios de chauffés imposés sur une face des échantillons plans, la combinaison des résultats obtenus au moyen des méthodes non invasives avec ceux déjà obtenus avec des méthodes invasives permet de fiabiliser la plateforme et permet une meilleure interprétation du comportement THCM multi échelle de ces matériaux à changements de phases utilisés en protection passive. Cette étude a bénéficié du soutien du LABEX Patrimex, du programme européen IPERION CH ("Integrated Platform for the European Research Infrastructure on Cultural Heritage", grant n°: 654028) et de la Mission Internationale de la Recherche de l'Université de Cergy Pontoise.

### 4. Bibliographie

- [ROJ 13a] A. ROJO : « Etude de la structuration et du comportement du gypse sous condition incendie ». Thèse de l'INSA de Rennes, 2013.
- [ROJ 13b] ROJO A., MELINGE Y., GUILLOU O.: "Kinetics of internal structure evolution in gypsum board exposed to standard fire", *Journal of Fire Sciences*, 31(5), pp 395-409, 2013.
- [MEL 11] MELINGE Y., NGUYEN K.S., DAIGUEBONNE C., GUILLOU O., FRESLON S., LANOS C. : "One-Dimensional-Time Study of the Dehydration of Plasterboards Under Standard Fire Condition (ISO 834): Thermo-Chemical Analysis", *Journal of Fire Sciences*, Volume 29 Issue 4, pp. 299 – 316, 2011.
- [PEI13] K. E. PEIPONEN, J. A. ZEITLER AND M. KUWATA-GONOKAMI, *Terahertz Spectroscopy and Imaging*, 171, Springer Series in Optical Science, Springer Heidelberg New York Dordrecht London (2013).
- [TIT01] D. J. TITMAN, Applications of thermography in non-destructive testing of structures, *NDT & E International*, **34**(2), pp. 149–154 (2001).
- [TOR 07] V. TORNARI, Laser Interference-Based Techniques and Applications in Structural Inspection of Works of Art, *Analytical and Bioanalytical Chemistry*; **387**, pp 761-80 (2007).
- [TOR 13] V. TORNARI, E. BERNIKOLA, E. TSIRANIDOU, K. HATZIGIANNAKIS, M.ANDRIANAKIS, V. DETALLE, J.L. BODNAR, Micro-mapping of defect structural micro-morphology in the documentation of wallpainting wallpaintings, *International journal of heritage in the digital era*, **1** (2) (2013)
- [TOR16] V. TORNARI, M. ANDRIANAKIS, K. HATZIGIANNAKIS, K. KOSMA, V. DETALLE, E. BOURGUIGNON, D. GIOVANNACCI, D. BRISSAUD., Complimentarity of digital holographic speckle pattern interferometry and simulated infrared thermography for Cultural Heritage structural diagnostic research, *International Journal of Engineering Research&Science*, **2**(11), pp. 129–141 (2016).
- [WAL13] G.C WALKER, B. JACKSON, D. GIOVANNACCI, J.W. BOWEN, B. DELANDES, J. LABAUNE, G.A MOUROU, M. MENU, V. DETALLE Terahertz analysis of stratified wall plaster at buildings of cultural importances accross Europe, *SPIE Optical Metrology*, 13-16 May 2013, Munich, Proc. SPIE 8790, Optics for Arts, Architecture, and Archaeology IV, 87900H, 8 pages.