

Contrôle non destructif par thermographie photothermique aléatoire face avant

Jean-Luc Bodnar, Jean-Charles Candoré, Jean-Louis Nicolas, Didier Caron, Philippe Grossel

GRESPI/ECATHERM, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02
(Auteur correspondant : jl.bodnar@univ-reims.fr)

Résumé

La thermographie photothermique est une méthode de contrôle non destructif qui trouve de nombreuses applications dans le domaine du contrôle et de la caractérisation des matériaux minces. Classiquement mise en œuvre sous excitation sinusoïdale ou sous analyse flash (créneau), nous avons cherché dans notre laboratoire, à l'image de ce que nous avons fait en radiométrie photothermique ponctuelle, à la mettre en œuvre sous excitation aléatoire. Cette dernière technique semble permettre en effet, par rapport aux précédentes, le contrôle de matériaux plus fragiles ainsi que l'accès aux analyses multifréquentielles étendues. Après avoir rappelé le principe de la thermographie photothermique aléatoire et présenté un exemple de dispositif expérimental, nous montrons que la méthode permet sous contraintes énergétiques moindres, d'une part la détection de déplacements situés dans une fresque et d'autre part, celle d'un défaut situé dans un bloc de plâtre tout en n'induisant qu'une faible élévation de température.

Nomenclature

a_m	Coefficients de sortie du filtre paramétrique	q	Ordre d'entrée du filtre paramétrique
b_m	Coefficients d'entrée du filtre paramétrique	RH (f)	Réponse harmonique
$e(t)$	Signal d'excitation, W/m^2	RI (t)	Réponse impulsionnelle, °C
f	Fréquence, Hz	S (t)	Réponse photothermique, °C
n	Temps discret	$\hat{s}(n)$	Signal de sortie estimé du filtre paramétrique
m	Indice courant	t	temps, s
p	Ordre de sortie du filtre paramétrique	δ	Fonction Delta de Dirac

1. Introduction

Le problème du contrôle non destructif des matériaux est depuis longtemps un sujet qui intéresse les industriels. On peut mesurer l'importance de ce problème au nombre d'études réalisées et à la diversité des techniques proposées. On peut citer les radiographies X et γ , les ultrasons, les courants de Foucault, le ressuage, la magnétoscopie et les techniques optiques. La thermographie photothermique infrarouge est l'une de ces dernières techniques optiques. Son principe est relativement simple. Il consiste à soumettre l'échantillon à analyser à un flux de photons dont l'absorption produit une élévation locale de température au voisinage du point d'impact lumineux, puis à observer les variations d'émissions du matériau à l'aide d'une caméra de thermographie infrarouge. Les phénomènes thermophysiques mis principalement en œuvre par cette méthode de contrôle sont la conduction et le rayonnement thermique. Le signal photothermique recueilli par le radiomètre infrarouge dépend donc des paramètres gouvernant ces phénomènes physiques (conductivité thermique, diffusivité thermique, ...), mais aussi de tous les paramètres pouvant être corrélés à ces derniers (présence de délaminage, présence de fissure, ...). La méthode offre donc aux ingénieurs un moyen de caractérisation de ces différents paramètres [1–3]. Le principe de cette méthode fait qu'elle est non destructive, sans contact, modulable, facilement personnalisable en fonction des besoins et enfin qu'elle permet l'étude des 100 premiers micromètres des matériaux (ce qui n'est pas toujours possible avec les autres méthodes de contrôle non destructif). Il fait aussi que la méthode est limitée à l'étude des matériaux minces (jusqu'à quelques centimètres d'épaisseur) et qu'elle peut être dépendante des propriétés radiatives de surface. Jusqu'à présent, pour contrôler des échantillons par thermographie photothermique infrarouge, deux modes d'analyses sont, en raison de leurs aptitudes bien connues, plutôt mis en œuvre; L'un, sous

excitation sinusoïdale et détection synchrone, l'autre sous excitation pulsée et détection continue. Dans le premier cas, la méthode permet en effet, d'obtenir un très bon rapport signal sur bruit ainsi que l'accès à deux paramètres caractéristiques : l'amplitude et la phase du signal photothermique. Dans le second cas, la méthode permet d'obtenir une réponse très riche en informations, car donnant accès à la réponse impulsionnelle du matériau. Ces deux méthodes présentent toutefois des inconvénients qui limitent leur domaine d'application. Dans le cas de l'excitation sinusoïdale, il s'agit essentiellement de la lenteur d'analyse qui permet difficilement une analyse industrielle. Dans le deuxième cas, il s'agit de l'obligation, pour obtenir une excitation proche d'une fonction de Dirac, de déposer une énergie importante pendant un court laps de temps ce qui n'autorise pas l'analyse de matériaux sensibles (matériaux biologiques, œuvres d'art, ...). Pour étendre le champ d'investigation de la thermographie photothermique, de nouvelles études et de nouveaux modes d'analyse sont donc encore à développer. Depuis quelques années, grâce à l'informatisation de plus en plus poussée des instrumentations et au développement des méthodes de traitement du signal, apparaissent dans de nombreux domaines de la physique, de nouvelles méthodes d'analyse, complémentaires de celles traditionnellement utilisées (analyse de Fourier et analyse flash). L'une d'entre elles, consiste à associer une excitation aléatoire et une analyse corrélatoire ou paramétrique au mode de contrôle utilisé. Le principal avantage de cette association, par rapport aux techniques classiques, est alors de donner accès aux réponses impulsionnelle et harmonique multifréquentielle des matériaux, tout en mettant en œuvre une densité d'excitation moindre. L'idée d'associer une excitation aléatoire et une analyse corrélatoire ou paramétrique à la radiométrie photothermique est alors séduisante, puisque pouvant offrir des possibilités nouvelles en matière de contrôle non destructif. C'est pourquoi, depuis plusieurs années, nous nous sommes intéressés à cette association. Dans un premier temps, nous avons mis en œuvre une excitation localisée et une détection ponctuelle (système SAMMIR) et montré que la méthode permettait bien, sous contraintes énergétiques moindres, d'effectuer des actions de contrôle non destructif et de métrologie thermique [4-5]. Toutefois, l'instrument utilisé pour ces études était plutôt un instrument de laboratoire, difficilement utilisable sur site. Comme à terme, nous souhaitons pouvoir développer des actions de contrôle « in situ » et ce, de façon industrielle, nous avons cherché à développer un nouvel outil d'analyse photothermique, portable, permettant une analyse étendue, et surtout une mise sous contrainte thermique la plus faible possible. C'est le nouvel outil de contrôle non destructif que nous avons réalisé dans ce cadre que nous présentons ici. Nous présentons d'abord le principe d'une analyse photothermique aléatoire. Nous présentons ensuite, à notre sens, les atouts de cette méthode de contrôle. Nous présentons alors le dispositif expérimental réalisé pour l'étude. Nous montrons enfin que la méthode permet d'une part, l'analyse non destructive et sous contraintes énergétiques moindres d'une fresque murale et d'autre part la détection d'un défaut situé dans un bloc de plâtre tout en n'induisant qu'une faible élévation de température.

2. Principe de la thermographie photothermique aléatoire

Le principe de la thermographie photothermique aléatoire consiste à exciter le matériau à étudier à l'aide d'un signal s'approchant d'un bruit blanc, puis à reconstruire la réponse impulsionnelle et/ou la réponse harmonique de l'échantillon par une analyse corrélatoire (analyse statistique), ou par une analyse paramétrique de la réponse photothermique obtenue (étude d'un modèle de comportement). Le premier type d'analyse, l'analyse corrélatoire, consiste à calculer la réponse impulsionnelle du matériau étudié à partir du produit d'inter corrélation entre la réponse photothermique du système étudié $s(t)$ et la séquence d'excitation $e(t)$ utilisée. La réponse harmonique photothermique multifréquentielle du matériau est ensuite calculée par transformée de Fourier de cette réponse impulsionnelle (figure 1).

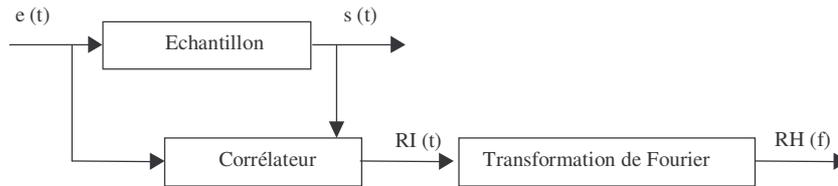


Figure 1 : Principe d'une analyse corrélatoire

Le principe du second mode d'analyse, l'analyse paramétrique, consiste à reconstruire théoriquement les réponses impulsionnelle et harmonique du système physique étudié, à partir d'un modèle de comportement paramétrique, le plus souvent de type ARMA (Auto Régressif à Moyenne Ajustée) de ce dernier; Ce modèle étant bâti à partir de l'analyse de la réponse photothermique de l'échantillon étudié face à une sollicitation énergétique la plus blanche possible (figure 2)

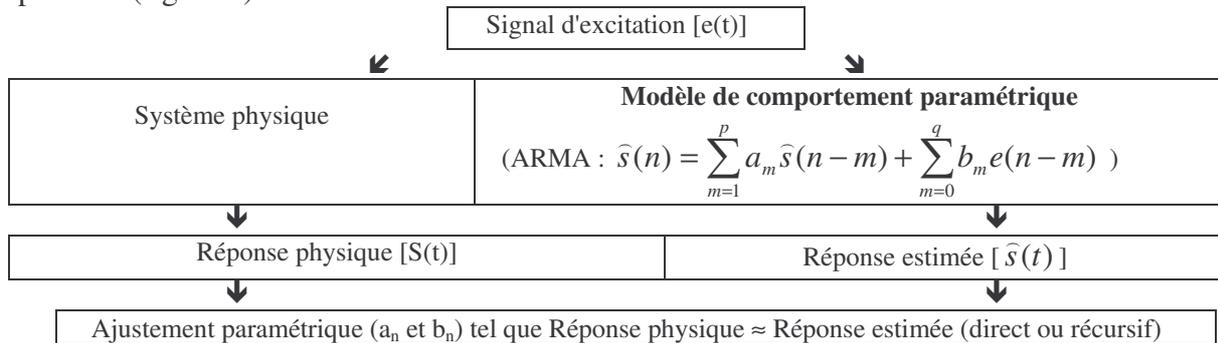


Figure 2 : Principe de la construction d'un modèle de comportement par analyse paramétrique

La construction de la réponse impulsionnelle se fait alors en calculant la réponse du modèle de comportement face à une impulsion de Dirac. La construction de la réponse harmonique se fait quant à elle, comme précédemment, en calculant la transformée de Fourier de cette réponse impulsionnelle (figure 3).

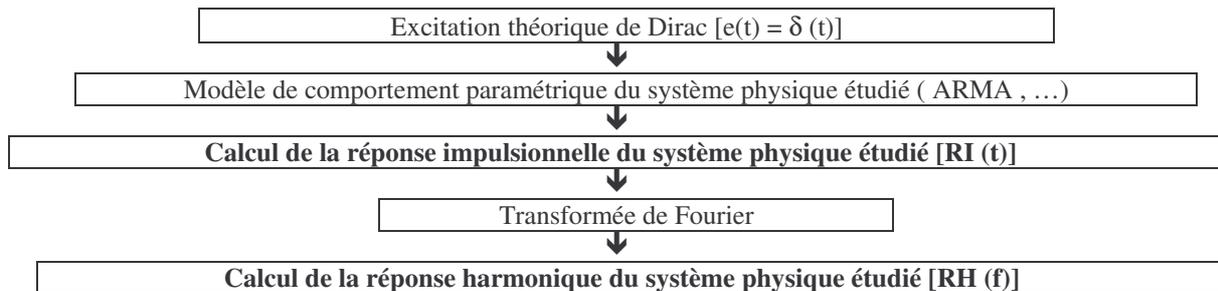


Figure 3 : Principe de l'identification paramétrique d'un système physique

Enfin pour construire le bruit blanc nécessaire à ces deux modes d'analyses, pour dans le premier cas, simplifier le calcul de corrélation et dans le second cas pour bâtir un modèle de comportement le plus fin possible, nous avons fait appel aux procédures proposées par J.Auvray [6]. Ce dernier propose trois façons différentes d'approcher ce signal théorique : soit construire un signal binaire pseudo aléatoire, soit construire un signal gaussien large bande ou bien construire un signal à balayage de fréquence.

3. Applications potentielles de la thermographie photothermique aléatoire

Comme nous l'avons vu, la thermographie photothermique aléatoire a comme principaux avantages de permettre des analyses non destructives, effectuées sous contraintes énergétiques

instantanées moindres (l'énergie totale déposée peut aussi être importante ce qui est un atout) et de donner accès à trois types de signaux photothermiques : la réponse aléatoire brute (analysable pas déconvolution directe), la réponse impulsionnelle et la réponse harmonique du matériau analysé (analysables par les outils de dépouillements développés pour les analyses flash et harmonique). Ces spécificités font que la méthode semble être bien adaptée aux applications suivantes :

- * Le contrôle non destructif d'échantillons fragiles tels que des œuvres d'art, des matériaux biologiques, des parois d'habitations peintes ou recouvertes de papier peint, ...

- * Le contrôle tomographique d'échantillon via des analyses multi fréquentielle ou temporelle.

- * La mesure précise, du fait de la perturbation énergétique moindre engendrée par l'instrument de mesure, de propriétés thermophysiques, via l'analyse de l'un des trois types de signaux fournis par la méthode.

- * La caractérisation in situ des matériaux ou de processus industriels (l'analyse aléatoire pouvant être effectuée en addition d'une sollicitation déjà existante).

Par ailleurs, la faible densité de puissance déposée lors de l'analyse photothermique fait que l'instrument ne nécessite qu'une faible puissance d'alimentation (une simple prise électrique classique 220 volts / 16 ampères suffit) pour aboutir au recueil de la réponse photothermique du matériau analysé (alors que par exemple, une analyse flash demande le plus souvent un dispositif d'alimentation électrique plus complexe et plus gourmand en énergie). Il est donc potentiellement très portable. Enfin, le fait de pouvoir moduler en puissance, la puissance lumineuse déposée, fait que la méthode aléatoire permet aussi de moduler la plage spectrale dans laquelle est déposée l'excitation (en chauffant plus ou moins le filament des lampes excitatrices) et donc d'essayer de travailler dans une bande spectrale d'absorption du matériau analysé.

4. Présentation d'un système de thermographie photothermique aléatoire : Le système SAMMTHIR du laboratoire

Le système de thermographie photothermique aléatoire que nous avons développé au laboratoire est le système SAMMTHIR (Système d'Analyse des Matériaux Minces par THERmographie InfraRouge). Il est composé d'une optique d'excitation, d'une optique de détection et enfin, d'une électronique et d'une informatique de pilotage de l'instrumentation. La source d'excitation est un couple (de façon à rendre le dépôt d'énergie plus homogène) de radiants à halogènes. Cette source d'excitation est modulée de façon pseudo aléatoire à l'aide d'une électronique et d'une informatique de pilotage. Le système de détection est constitué d'une caméra de thermographie infrarouge qui fonctionne de façon synchrone avec le système d'excitation aléatoire. La reconstruction par analyse corrélatoire ou paramétrique des réponses impulsionnelles et harmoniques multi fréquentielles est effectuée dans un module de post traitement des données. Enfin, un module de dépouillement des réponses impulsionnelles et harmoniques multifréquentielles complète le tout (figure 4).



Figure 4 : Le dispositif expérimental mis en œuvre pour l'étude

5. Exemples de résultats expérimentaux obtenus

Le premier exemple de résultat que nous présentons ici, concerne l'étude d'une fresque murale, c'est-à-dire un échantillon potentiellement fragile (l'une des cibles privilégiées de la variante aléatoire de la thermographie photothermique). Cette fresque a été réalisée selon la technique des primitifs Italiens par Gabriela Szatanik, restauratrice professionnelle du patrimoine et contient 4 inclusions de plastazote (figure 5). L'objectif de l'étude était alors de vérifier que la thermographie photothermique aléatoire permettait bien de développer des actions de contrôle non destructif et donc la détection de ces défauts. Les conditions expérimentales mises en œuvre au cours de l'étude, sont : une excitation de type binaire pseudo aléatoire de 256 termes, une fréquence d'échantillonnage de 0,1 bit/s, un sur échantillonnage de 1, un modèle de comportement de type ARMA, un nombre de paramètres d'entrée et de sortie de ce modèle égaux à 10. Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 5. Sur cette figure, nous avons tracé, en codage fausses couleurs, pour chaque pixel de l'image, l'aire contenue sous la réponse photothermique impulsionnelle reconstruite par analyse paramétrique (de façon à regrouper sur une même image synthétique toutes les informations fournies, à chaque instant, par la réponse impulsionnelle) Cette figure, du fait de l'effet de barrière thermique joué par les défauts, fait clairement apparaître une signature infrarouge plus importante à leur endroit. Elle confirme donc bien que la thermographie photothermique aléatoire peut être un nouvel outil de contrôle non destructif.

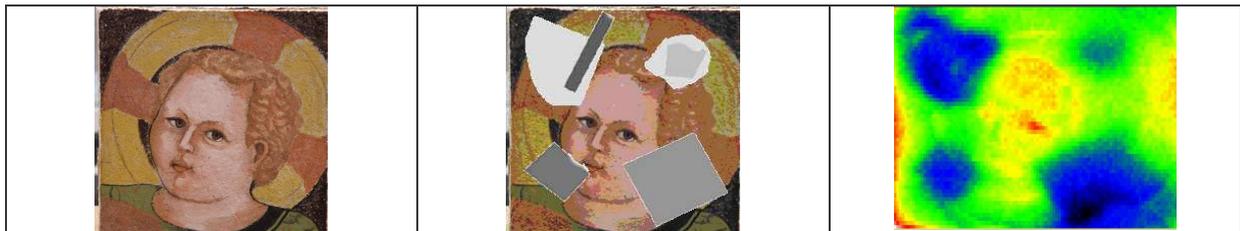


Figure 5 : La mini fresque étudiée (à gauche), la position des défauts internes (au centre) et un exemple de résultats photothermique aléatoire obtenu (à droite)

Le second exemple de résultat que nous présentons ici concerne une approche quantitative de la perturbation thermique engendrée par l'analyse thermographique aléatoire. Pour cela, nous avons étudié un bloc de plâtre de 15 cm de longueur, de 12 cm de largeur et de 2,3 cm d'épaisseur, contenant un manque de matière de 6,6 cm * 6,2 cm de côté situé à 8 mm sous la surface en partie centrale. Les conditions expérimentales retenues pour l'étude, sont une excitation de type binaire pseudo aléatoire de 128 termes, une puissance électrique excitatrice de 15 W (c'est la valeur la plus basse permise par notre instrumentation), une période d'excitation de 1 s. Un exemple de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 6. Elle représente l'évolution temporelle de la signature photothermique brute (ce qui est suffisant ici) de points situés à la surface de l'échantillon étudié, pour l'un situé à l'aplomb du défaut et pour l'autre à l'aplomb d'une partie saine. Elle fait d'abord apparaître, des courbes disjointes ce qui confirme les possibilités de la méthode aléatoire en matière de détection de défaut. Elle fait ensuite apparaître une élévation maximale de température de 1,56 °C ce qui est relativement faible et en tous cas acceptable par le restaurateur de patrimoine pour développer une analyse de peinture murale. Elle fait enfin apparaître un contraste maximal de 0,33 °C, pour une valeur équivalente au bruit des caméras bolométriques du marché d'environ 0,05 °C, ce qui là aussi est acceptable. Afin de comparer ce résultat avec celui que donne une analyse flash classique, nous avons ensuite étudié le même échantillon en le soumettant à l'excitation la plus courte et la plus intense possible (Proche d'une fonction Delta de Dirac) que permet notre instrumentation. Nous avons alors éclairé l'échantillon étudié avec une puissance électrique de 1000 W pendant une durée de 1 seconde. Un exemple

de résultat obtenu dans ce cadre est présenté sur la figure 6. Elle représente là aussi, l'évolution temporelle de la signature photothermique de points situés à la surface de l'échantillon étudié, pour l'un situé à l'aplomb du défaut et pour l'autre à l'aplomb d'une partie saine. Elle montre que l'élévation de température engendrée par l'expérience induit une élévation de température d'environ $1,35^{\circ}\text{C}$, soit une variation du même ordre de grandeur que dans le cas précédent. Mais elle montre aussi que la méthode « flash » dans les conditions où nous l'avons mise en œuvre ne permet tout simplement pas la détection du défaut.

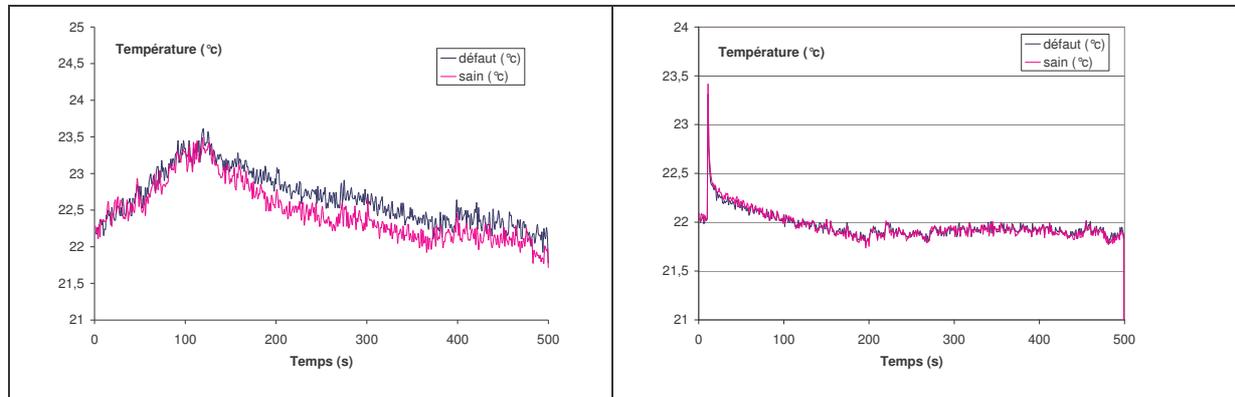


Figure 6 : Détection d'un défaut situé dans un bloc de plâtre par thermographie photothermique aléatoire (à gauche) et pulsée (à droite)

6. Conclusion

Les progrès récents de l'optique, de l'électronique, de l'informatique et des techniques de traitement du signal conduisent à développer de nouvelles méthodes de contrôle non destructif. Parmi celles-ci, nous avons proposé dans ce travail, la thermographie photothermique aléatoire. Après avoir présenté dans une première étape le principe de cette méthode. Nous avons présenté dans une seconde étape, ce qui nous paraissait être, à nos yeux, les principaux atouts de cette méthode. Dans une troisième étape, nous avons présenté le dispositif de thermographie photothermique aléatoire développé au laboratoire et que nous avons mis en œuvre pour l'étude. Nous avons enfin montré que la méthode permet sous contraintes énergétiques moindres, d'une part la détection d'un déplacement dans une fresque et d'autre part celle d'un défaut situé dans un bloc de plâtre tout en n'induisant qu'une faible élévation de température. Il serait maintenant intéressant d'une part, d'étudier les possibilités de la méthode en matière d'analyse in situ de matériaux fragiles (œuvres d'arts, matériaux biologiques, ...) et d'autre part en matière de métrologie thermique. Des études allant dans ce sens sont en cours.

Références Bibliographiques

- [1] Maldague Xavier : Theory and practice of infrared technology for non destructive testing
- [2] V.P. Vavilov : Non destructive testing handbook : thermal / infrared testing.
- [3] J.L. Bodnar : le contrôle optique des matériaux par methods optiques infrarouges, livre Méthodes et techniques optiques pour l'industrie, collectif d'auteurs, ISBN 978-2-918241-00-3, nov 2009.
- [4] Jean Luc Bodnar : Le contrôle optique des matériaux par radiométrie photothermique aléatoire infrarouge, Revue de l'électricité et de l'électronique, n°2, février 2007, pp 68-74
- [5] S. Brahim, J.L. Bodnar et P. Gossel : Thermal diffusivity measurement by photothermal radiometry under random excitation and parametric analysis, Proceeding of 15th International Conference on Photoacoustic and Photothermal Phenomena , Leuven, 19-23 July 2009
- [6] J. Auvray Identification de processus. Techniques de l'ingénieur 1994 fiche r 306.