

# Analyses photothermiques face arrière sous excitation aléatoire et analyse paramétrique : application à la mesure de diffusivité thermique

Salim Brahim<sup>1</sup>, Jean-Luc Bodnar<sup>1\*</sup>, Philippe Grossel<sup>1</sup> et Philippe Hervé<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Energétique et d'Optique, UFR Sciences Exactes et Naturelles, BP 1039, 51687 Reims cedex 02

<sup>2</sup> Laboratoire d'Energétique et d'Economie d'Energie, Université de Paris 10, 92410 Ville d'Avray

\*(auteur correspondant : jl.bodnar@univ-reims.fr)

**Résumé :** L'objet du travail que nous présentons ici, est d'approcher de manière expérimentale, les possibilités de mesure de diffusivité thermique, sous contraintes énergétiques moindres, offertes par des analyses photothermiques aléatoires en face arrière effectuées avec ou sans contact avec l'échantillon étudié. Nous présentons d'abord le principe de la méthode aléatoire. Nous présentons ensuite les systèmes d'analyses, avec et sans contact avec l'échantillon étudié, mis en œuvre lors de notre étude. Nous montrons enfin, à l'aide de l'étude expérimentale d'un échantillon de verre et d'acier 304 L, que les méthodes photothermiques permettent dans un cas particulier, une bonne approximation du paramètre diffusivité thermique.

## Nomenclature

$a$	Diffusivité thermique, $m^2/s$	$p_e$	Nombre de paramètres d'entrée du modèle paramétrique
$a_n$	Coefficient du modèle paramétrique	$q_s$	Nombre de paramètres de sortie du modèle paramétrique
$b_n$	Coefficient du modèle paramétrique	$Q$	Densité d'énergie, $J/m^2$
$e$	Signal excitation	$\hat{s}$	Sortie estimée
$l$	Épaisseur de l'échantillon, $m$	$T$	Température, $K$
$k$	Conductivité thermique, $W/m K$	$TL$	Transformée de Laplace
$n$	Indice courant	$t$	Temps, $s$
$m$	Indice courant		
$p$	Variable de Laplace		

## 1. Introduction

La radiométrie photothermique est un mode de contrôle non destructif opérant à distance et sans contact. Son principe consiste à soumettre l'échantillon à analyser à un flux lumineux dont l'absorption produit une élévation locale de température au voisinage du point d'impact laser, puis à observer les variations d'émittance du matériau à l'aide d'une chaîne de détection optique infrarouge. Le signal photothermique ainsi obtenu dépend des propriétés thermophysiques du matériau analysé, ce qui permet alors de les caractériser [1-9]. Traditionnellement, pour identifier un système thermique ou pour effectuer des mesures de diffusivité thermique, une excitation impulsionnelle conjuguée à une détection continue est mise en œuvre [10-12]. Cette méthode, très performante, présente toutefois l'obligation, pour obtenir une excitation proche d'une fonction de Dirac, de déposer une énergie importante dans un laps de temps très court, ce qui n'autorise pas, par exemple, l'analyse de matériaux sensibles (matériaux biologiques, œuvres d'art, ...). Pour permettre l'étude de ces derniers types de matériaux et donc pour étendre le champ d'investigation de la radiométrie photothermique, de nouvelles études et de nouveaux modes d'analyse sont 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 paramétrique au mode de contrôle

utilisé. Le principal avantage de cette association est alors de donner accès à la réponse impulsionnelle des matériaux, tout en mettant en œuvre une densité d'excitation moindre et donc de permettre l'analyse de matériaux plus sensibles qu'avec la méthode flash [13]. L'idée d'associer une excitation aléatoire et une analyse paramétrique à la radiométrie photothermique face arrière est alors séduisante, puisque pouvant offrir des possibilités nouvelles en matière de mesure de diffusivité thermique. C'est pourquoi, nous avons entrepris une étude visant à approcher les possibilités de la méthode. Avant de développer une instrumentation complète, nous avons d'abord équipé le système d'analyse photothermique face avant SAMMIR de la faculté des Sciences de Reims, d'un système de mesure de température en face arrière utilisant un thermocouple K. Les résultats alors obtenus étant encourageants, nous avons ensuite remplacé ce thermocouple par une caméra de thermographie infrarouge visant la face arrière de l'échantillon étudié. L'objet de cet article est alors la présentation des résultats expérimentaux obtenus dans ce cadre. Nous présentons d'abord le principe de la méthode photothermique aléatoire. Nous présentons ensuite les échantillons étudiés, les conditions expérimentales et les dispositifs expérimentaux mis en œuvre lors de notre étude. Nous montrons enfin, à l'aide de l'étude expérimentale d'un échantillon de verre et d'acier 304L, que les deux méthodes permettent dans un cas particulier, une bonne approximation du paramètre diffusivité thermique.

## 2. Principe du contrôle photothermique aléatoire face arrière sous analyse paramétrique

Le principe d'un contrôle photothermique aléatoire face arrière sous analyse paramétrique, consiste à exciter le matériau à étudier, à l'aide d'un signal lumineux (laser) ayant un spectre temporel s'approchant d'un bruit blanc, puis à reconstruire la réponse impulsionnelle de l'échantillon par une analyse paramétrique de la mesure des variations de température induites par cette excitation, en face arrière de l'échantillon étudié [13]. La procédure expérimentale à suivre consiste donc d'abord, à soumettre l'échantillon étudié à un flux lumineux modulé de façon aléatoire. Elle consiste ensuite, à partir de la réponse thermique donnée par l'échantillon en face arrière, à bâtir un modèle de comportement paramétrique de l'expérience. Elle consiste enfin à calculer la réponse théorique de ce modèle face à une fonction delta de Dirac pour aboutir à la réponse impulsionnelle recherchée. La séquence d'excitation, proche d'un bruit blanc, mise en œuvre pour notre étude est de type binaire pseudo aléatoire (PRBS); cela essentiellement pour sa simplicité de mise en œuvre [13-15]. Le modèle de comportement utilisé pour l'étude, est de type Auto Régressif à Moyenne Ajustée (modèle ARMA). Il considère que le signal de sortie du filtre électronique, auquel est assimilé le système physique à identifier, est lié de façon linéaire aux différents états du signal d'entrée du filtre, aux différents paramètres intrinsèques du filtre, mais aussi aux différents états antérieurs du signal de sortie lui-même (1). Il est donc très complet, ce qui explique sa mise en œuvre [13-15]

$$\hat{s}(n) = \sum_{m=1}^{pe} a_m \hat{s}(n-m) + \sum_{m=0}^{qs} b_m e(n-m) \quad (1)$$

## 3. Les systèmes expérimentaux mis en œuvre lors de notre étude

Le premier système expérimental que nous avons mis en œuvre lors de notre étude, est une instrumentation dérivée du Système d'Analyse des Matériaux Minces par InfraRouge (SAMMIR) du Laboratoire d'Energétique et d'Optique de l'université de Reims Champagne Ardenne (figure 1). Ce système est d'abord composé d'une diode laser pouvant délivrer une puissance continue de 0.55 watt à une longueur d'onde de 0.81  $\mu\text{m}$ . Cette source lumineuse est associée à une optique de collimation et à une optique de focalisation. Le faisceau laser, une fois mis en forme, est plat, possède un diamètre caractéristique d'environ 500  $\mu\text{m}$  au

point de focalisation et de 32 mm au point de défocalisation maximal. Cette source laser est pilotée électroniquement en courant, afin de pouvoir délivrer des séquences binaires pseudo aléatoires de longueurs, préprogrammées, pouvant aller de 64 termes à 4096 termes par raison géométrique de 2. Ce système est ensuite composé d'une chaîne de mesure de température composée d'un thermocouple de type K de 0,5 mm de diamètre, placé à l'aplomb du centre de la tache laser et d'un amplificateur et compensateur de soudure froide de type Analog Device 594. Ce système comprend enfin une électronique d'acquisition et une informatique de pilotage et de traitement des signaux. L'informatique de traitement des signaux permet des analyses paramétriques et un post traitement des données.

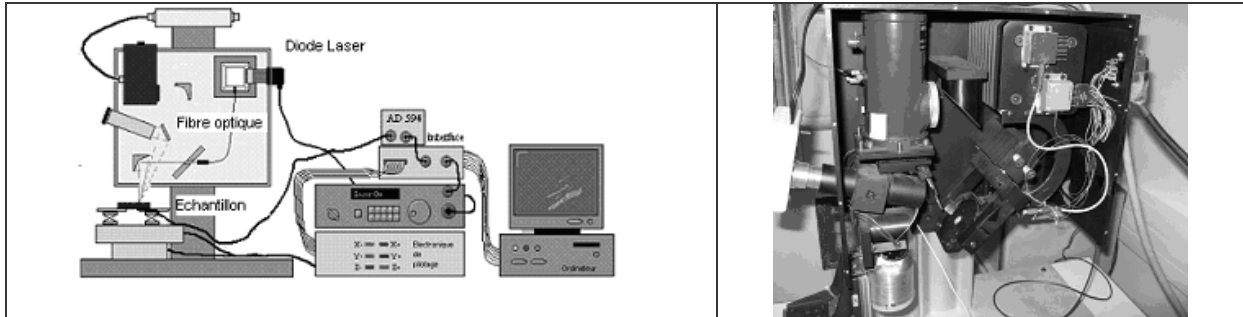


Figure 1: Le dispositif d'analyse photothermique aléatoire face arrière avec contact utilisé

Le second système que nous avons mis en œuvre pour notre étude est le système présenté sur la figure 2. Il utilise comme le premier toute la chaîne d'excitation du dispositif SAMMIR de la Faculté des Sciences de Reims. Il se différencie par contre du premier dispositif mis en œuvre, par le mode de mesure de la température de la face arrière de l'échantillon étudié. En effet, tant parce qu'elle permet une analyse sans contact, que parce qu'elle permet une analyse à plus haute fréquence que les thermocouples K (donc l'analyse de matériaux plus conducteurs), nous avons choisi d'utiliser, dans ce second temps, une caméra de thermographie infrarouge de type Cedis jade 3. Bien entendu, ce choix a entraîné la mise en place d'une électronique de synchronisation des chaînes d'acquisition et de détection.



Figure 2: Le dispositif d'analyse photothermique aléatoire face arrière sans contact utilisé

#### 4. Les échantillons analysés et les conditions expérimentales retenues pour l'étude

Les échantillons analysés dans cette étude sont de deux types : le premier est plutôt isolant afin de pouvoir permettre son analyse avec ce dispositif d'analyse photothermique aléatoire

avec contact. Il s'agit d'un disque de verre de 30 mm de diamètre et de 3,36 mm d'épaisseur recouvert sur l'une de ses faces par une fine couche de laque d'argent et sur l'autre face par une fine couche de peinture polyuréthane noire. Sa diffusivité, mesurée au LEMTA de Nancy avec un diffusivimètre flash, vaut :  $0,4810^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Le second échantillon que nous avons mis en œuvre pour la méthode sans contact est plus conducteur, puisque la méthode est potentiellement plus rapide que la première. Il s'agit d'un disque d'acier de type 304 L de 30 mm de diamètre et de 1,5 mm d'épaisseur recouvert sur chacune de ses faces d'une fine couche de peinture polyuréthane noire. Sa diffusivité est de  $4,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Les conditions expérimentales mises en œuvre au cours de l'étude avec contact sont l'utilisation d'un signal binaire pseudo aléatoire de 1024 termes (figure 3), d'une fréquence d'échantillonnage de 0,5 bits/s, d'un sur échantillonnage de 100 et d'un nombre de paramètres du modèle de comportement ARMA égal à 40 en entrée et à 40 en sortie (valeurs qui permettent une bonne reconstruction théorique de la réponse de l'échantillon étudié). Les conditions expérimentales mises en œuvre au cours de l'étude sans contact de l'échantillon d'acier 304 L sont l'utilisation d'un signal binaire pseudo aléatoire de 1024 termes, d'une fréquence d'échantillonnage de 10 bits/s, d'un sur échantillonnage de 40 et d'un nombre de paramètres du modèle de comportement ARMA égal à 40 en entrée et à 40 en sortie

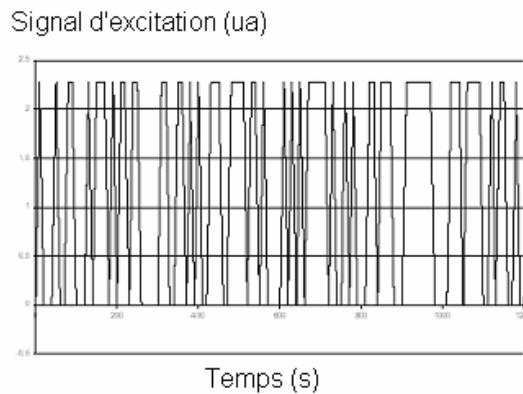


Figure 3 : Allure du signal d'excitation utilisé

## 5. Les résultats expérimentaux obtenus

Sur la figure 4, nous présentons d'abord un exemple de signal photothermique brut obtenu lors de nos études. Il s'agit, comme nous le pouvons le voir, d'une réponse aléatoire assez difficile à interpréter telle quelle.

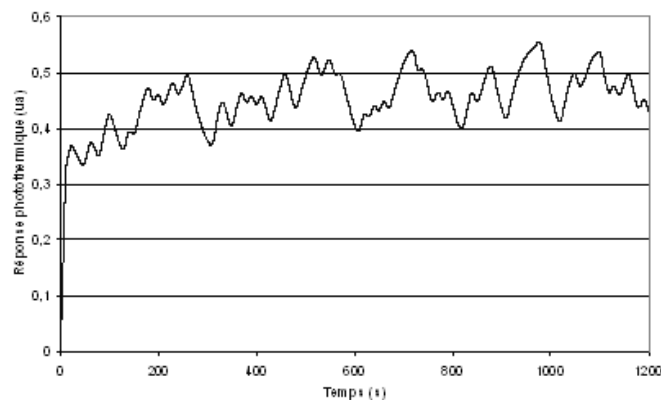


Figure 4 : Exemple de signal photothermique recueilli

Sur la figure 5, nous présentons ensuite un exemple de réponse impulsionnelle reconstruite par analyse paramétrique (courbe en traits pleins) Nous retrouvons l'allure

classique des réponses impulsionnelles obtenues par méthode flash face arrière. Afin d'aboutir à une mesure du paramètre diffusivité thermique, cette réponse impulsionnelle reconstruite est alors ajustée à l'aide d'un modèle thermique de l'expérimentation. Dans notre cas d'étude, nous avons mis en œuvre un modèle monocouche avec pertes en face avant et en face arrière de l'échantillon. Il a été développé à l'aide de la méthode des quadripôles thermiques (2, [16])

$$TL [T(t)] = Q / \{k (p/a)^{1/2} \operatorname{sh} [(p/a)^{1/2} l] + 2 h \operatorname{ch} [(p/a)^{1/2} l] + h^2 \{ \operatorname{sh} [(p/a)^{1/2} l] \} / \{k (p/a)^{1/2} \} \} \quad (2)$$

La méthode de minimisation utilisée est la méthode de *Box-Kanemasu* qui est une modification de la méthode de *Gauss-Newton* [17]. Le résultat de cet ajustement est présenté sur la figure 5 pour les mesures effectuées avec contact sur l'échantillon de verre. Elle montre que pour une valeur de diffusivité thermique de  $4,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ , les courbes théoriques (courbe en traits pointillés) et expérimentales (courbe en traits pleins) sont très proches. Cette valeur de diffusivité ainsi estimée, est très proche de celle de  $4,83 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  donnée par la mesure au diffusivimètre flash

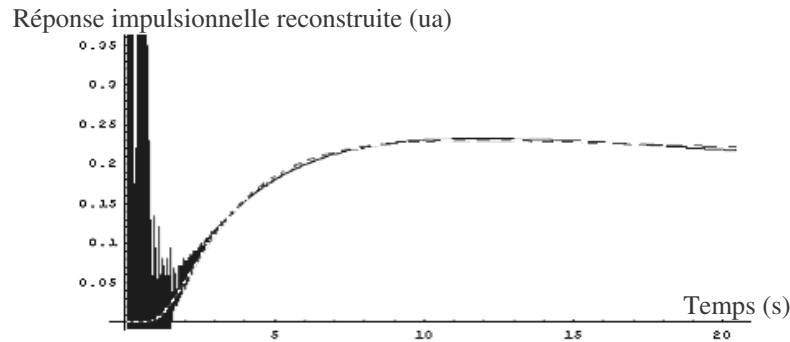


Figure 5 : Exemple de mesure de la diffusivité thermique d'un échantillon de verre par analyse photothermique aléatoire face arrière avec contact

Sur la figure 6, ce sont les résultats du même type d'ajustement effectué sur les mesures obtenues sans contact sur l'échantillon d'acier 304 L que nous présentons. Ils montrent que c'est pour une valeur de diffusivité thermique de  $4,09 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  que les courbes théorique (courbe en traits pointillés) et expérimentale (courbe en traits pleins) sont les plus proches. Cette valeur de diffusivité estimée, est là aussi, très proche de la valeur de référence de  $4,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Ces deux résultats expérimentaux montrent les possibilités de la méthode photothermique aléatoire face arrière en terme de mesure, sous contraintes énergétiques moindres, de diffusivité thermique.

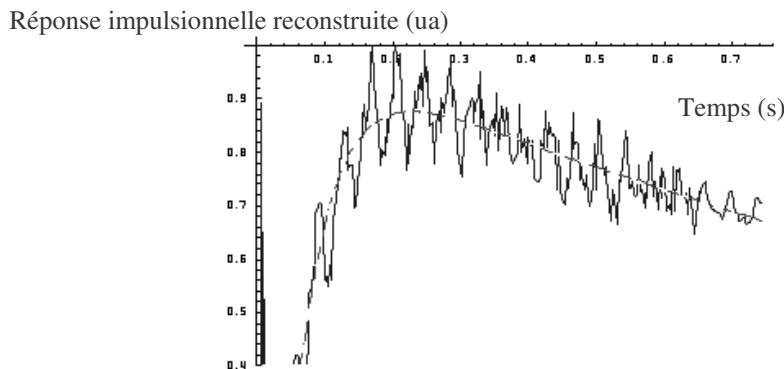


Figure 6 : Exemple de mesure du paramètre diffusivité par analyse photothermique aléatoire face arrière sans contact



## 6. Conclusion

Dans le travail que nous avons présenté ici, nous avons essayé d'approcher les possibilités de mesure de diffusivité thermique, sous contraintes énergétiques moindres, par analyse photothermique aléatoire face arrière, avec et sans contact.

Nous avons d'abord présenté le principe de la méthode photothermique aléatoire face arrière.

Nous avons ensuite présenté les échantillons étudiés, les conditions expérimentales et les dispositifs expérimentaux mis en œuvre lors de notre étude.

Nous avons enfin montré que les deux méthodes photothermiques mises en œuvre, avec contact et sans contact, permettent respectivement une approximation convenable de la diffusivité thermique d'un échantillon verre ou d'un échantillon d'acier 304 L.

Ces résultats expérimentaux obtenus sur des échantillons particuliers, sont encourageants puisque semblant ouvrir la voie à la caractérisation photothermique de matériaux sensibles. Ils demandent maintenant à être généralisé. Des études allant dans ce sens sont en cours.

## Références Bibliographiques

- [1] Actes des congrès IMPPP (International Meeting on Photoacoustic and Photothermal Phenomena, 1994 -> 2007).
- [2] Actes des congrès QIRT (Quantitative InfraRed Thermography, 1992 -> 2006).
- [3] A. Mandelis : Progress in Photothermal and Photoacoustic Sciences and Technology, Spie, 1997.
- [4] J.L. Bodnar M. Egée : Detection of wear cracks by photothermal radiometry Wear 93 590-592.
- [5] P. Fissier J.L. Bodnar : Analyse multifréquentielle par radiométrie photothermique : Application à la mesure de diffusivité thermique. Actes du congrès SFT 98 Marseille.
- [6] Oblin Sébastien Richard Pierre et Bodnar Jean-Luc : Thermographie infrarouge stimulée appliquée à la détection de défaut d'isolation dans le bâtiment Proc of Building systems and technologies for energy conservation LASI mai 2000.
- [7] F. Gesson O. Faugeroux J.L. Bodnar T. Mourillon : Mesure de l'épaisseur de revêtements du chrome par radiométrie photothermique impulsionnelle face avant. Actes CMOI 2003 Belfort.
- [8] J.L. Bodnar : thermographie infrarouge et radiométrie photothermique : Ecole Photomécanique du CNRS 7 juillet 2004 Saint Etienne.
- [9] J.L. Bodnar : Contrôle non destructif par techniques infrarouges. Journée de formation du colloque CMOI 2004, Saint Etienne.
- [10] W Parker, Flash method of determining thermal diffusivity, J Appl. Phys, 32, (9), 1961, 1679-1684
- [11] J. Hladik, Métrologie des propriétés thermophysiques des matériaux, Masson, 1990.
- [12] A. Degiovanni, Diffusivité et méthode flash, Revue générale de thermique, 185, 1977, pp 420-441
- [13] J.L. Bodnar : Contrôle non destructif par radiométrie photothermique aléatoire. Congrès thermogram' 2003, Senart.
- [14] J. Max Traitement du signal. Vol 1 and 2 1993.
- [15] J. Auvray Identification de processus. Techniques de l'ingénieur 1994 fiche r 306.
- [16] B. Hay, J.R. Flitz et J.C. Batsale : Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash, techniques de l'ingénieur, R2955, pp1 - 12
- [17] O. Faugeroux, Caractérisation thermophysique de revêtement de protection thermomécanique par méthode photothermique impulsionnelle, thèse de Doctorat, 14 décembre 2001, Perpignan