

## ETUDE DES DEFAUTS SURFACIQUES ET SUBSURFACIQUES DANS DES MATERIAUX PAR LA TECHNIQUE DE DEFLECTION PHOTOTHERMIQUE: THEORIE ET EXPERIENCE

Amina DHOUIB, Nouredine YACOUBI

*Institut préparatoire aux Etudes d'Ingénieurs Nabeul Tunisie*  
*dhoubamina82@yahoo.fr; noureddine.yacoubi@gmail.com*  
*(dhoubamina82@yahoo.fr)*

**Résumé :** La technique de Déflexion photothermique est largement utilisée pour l'étude des défauts dans les matériaux. Une haute résolution spatiale et une sensibilité élevée sont nécessaires pour les détecter. Afin d'améliorer le modèle théorique dans le cas d'un chauffage uniforme (un traitement unidimensionnelle), nous avons choisi de chauffer l'échantillon par une lampe à halogène. L'échantillon ayant des défauts surfacique et subsurfacique connus est d'abord recouvert d'une mince couche de graphite et placé dans l'air. L'échantillon, fixé sur un support vertical, est capable de se déplacer dans les directions x et y grâce à deux moteurs pas à pas. La mesure a montré un excellent accord entre les résultats théoriques et expérimentaux.

### Mots clés :

Technique de déflexion photothermique (PTD), défauts surfaciques et subsurfaciques, Onde thermique

### 1. Introduction

L'imagerie photothermique est bien connue comme l'une des techniques les plus efficaces pour le contrôle non destructif. Cette technique est basée sur la détection de l'onde thermique générée par le chauffage périodique d'un échantillon à l'aide d'une source de chaleur modulée. Une grande variété de méthodes pour l'étude non destructive de surface, des défauts en profondeur et des structures dans les solides ont été développées rapidement. Parmi ces méthodes on peut citer la méthode photoacoustique [1,2], la méthode de radiométrie photothermique [3], une méthode piézoélectrique [4] et la technique de déflexion photothermique (effet mirage) [5,6].

Dans ce travail, nous avons étudié des échantillons contenant des défauts surfaciques et de subsurfaciques et nous avons montré l'effet de ces défauts sur l'amplitude et la phase du signal photothermique obtenu. Pour ce faire, l'échantillon, recouvert d'une mince couche de graphite, est lentement déplacé perpendiculairement au faisceau pompe, le signal photothermique détecté est tracé en fonction de la distance de balayage. Afin d'établir l'efficacité de l'imagerie photothermique, nous comparons le modèle théorique avec les résultats expérimentaux.

Dans ce papier, nous commençons par présenter le modèle théorique basé sur la résolution des équations de la chaleur à une dimension pour un échantillon ayant un défaut surfacique, ces résultats seront utilisés pour dessiner les courbes théoriques de l'amplitude et la phase du signal en fonction du déplacement, puis nous allons présenter le dispositif expérimental qui a été utilisé, enfin, nous allons comparer les résultats théoriques avec ceux expérimentaux. Le meilleur accord entre les deux résultats permet donc de valider l'expérience et la théorie.

### 2. Théorie

Nous allons étudier la géométrie présentée dans la figure 1, où l'échantillon solide est recouvert d'une mince couche de graphite fixé sur un support.  $l_f$ ,  $l_c$ ,  $l_s$  et  $l_b$  sont respectivement les épaisseurs du fluide, du graphite, de l'échantillon et du support. Le fluide peut être soit de l'air ou de l'huile de paraffine. Dans notre cas, nous allons considérer l'air. L'ensemble du système des quatre couches est chauffé par un faisceau lumineux modulé d'intensité  $I=I_0(1+\cos\omega t)$ . L'absorption optique de la couche de graphite génère une onde thermique qui va se propager dans l'échantillon et le fluide environnant induisant un gradient de température, puis un gradient

d'indice de réfraction dans le fluide [7]. Comme présenté dans le dispositif expérimental, un faisceau laser sonde rasant la surface de l'échantillon et traversant le fluide est dévié.

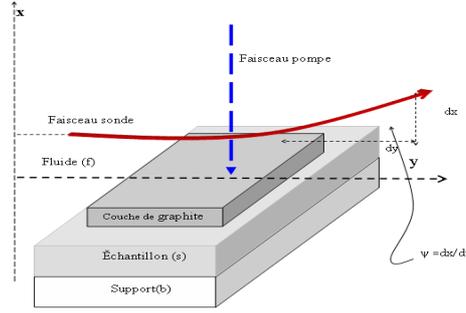


Figure1 : Modèle d'une couche sur un substrat

La déflexion du faisceau laser sonde est due aux variations périodiques de l'indice de réfraction du fluide au voisinage de l'échantillon donc due aux variations périodiques de la température à la surface de l'échantillon. Pour calculer cette déflexion nous devons déterminer la température sur la surface de l'échantillon  $T_0$ . Cette expression sera obtenue par la résolution des équations de la chaleur dans chaque milieu. Si nous supposons que seule la couche de graphite absorbe la lumière incidente avec le coefficient d'absorption  $\alpha$ , les équations de la chaleur pourraient être écrites ainsi : [8].

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} = \frac{1}{D_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad \text{si } 0 \leq x \leq l_f \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} = \frac{1}{D_c} \frac{\partial T_c}{\partial t} - A e^{\alpha x} (1 + e^{j\omega t}) \quad \text{si } -l_c \leq x \leq 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{1}{D_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} \quad \text{si } -l_c - l_s \leq x \leq -l_s \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} = \frac{1}{D_b} \frac{\partial T_b}{\partial t} \quad \text{si } -l_c - l_s - l_b \leq x \leq -l_c - l_s \quad (4)$$

$T_i$  et  $D_i$  sont, respectivement, la température et la diffusivité thermique du milieu  $i$ . Après la résolution de ces équations, nous obtenons les expressions de la température à la surface de l'échantillon écrite dans l'équation (5)

$$T_0 = \frac{E [(1-b)e^{-\sigma_s l_s} [(1-r)(1-c)e^{\sigma_c l_c} + (1+r)(1+c)e^{-\sigma_c l_c} - 2(1+rc)e^{-\alpha l_c}] - (1+b)e^{\sigma_s l_s} [(1-r)(1+c)e^{\sigma_c l_c} + (1+r)(1-c)e^{-\sigma_c l_c} - 2(1-rc)e^{-\alpha l_c}]}{[(1+b)e^{\sigma_s l_s} [(1+g)(1+c)e^{\sigma_c l_c} + (1-g)(1-c)e^{-\sigma_c l_c}] - (1-b)e^{-\sigma_s l_s} [(1+g)(1-c)e^{\sigma_c l_c} + (1-g)(1+c)e^{-\sigma_c l_c}]} \quad (5)$$

$$\sigma_i = (1+j) \sqrt{\frac{\pi f}{D_i}} \quad b = \frac{K_b \sigma_b}{K_s \sigma_s}, \quad c = \frac{K_c \sigma_c}{K_s \sigma_s}, \quad g = \frac{K_f \sigma_f}{K_c \sigma_c} \quad \text{et} \quad r = \frac{\alpha}{\sigma_c}$$

Nous allons commencer par l'étude théorique d'un échantillon avec une rainure rectangulaire à la surface. La géométrie de l'échantillon est présentée dans la figure 2.

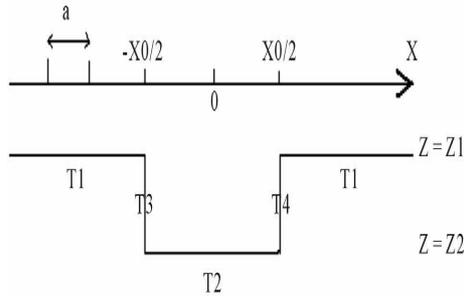


Figure2 : Géométrie d'un défaut rectangulaire surfacique

En utilisant les expressions des températures dans le programme Maple 9.5, nous pourrions tracer les courbes représentant les variations de l'amplitude et de la phase du signal photothermique à la surface de l'échantillon. Les figures 3 et 4 sont les courbes théoriques pour les deux cas suivants :  $a < x_0$  et  $a > x_0$  et à différentes fréquences de modulation.

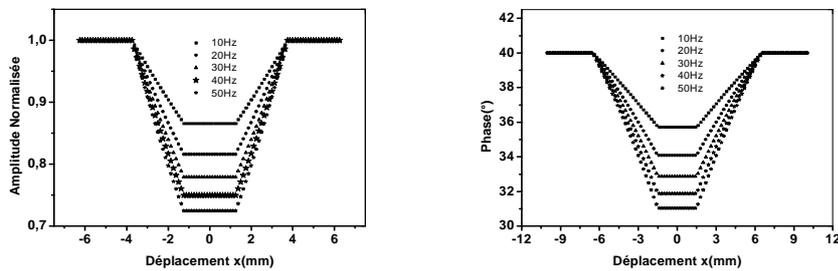


Figure 3 : Variations de l'amplitude et de la phase en fonction de x dans le cas où  $a > x_0$

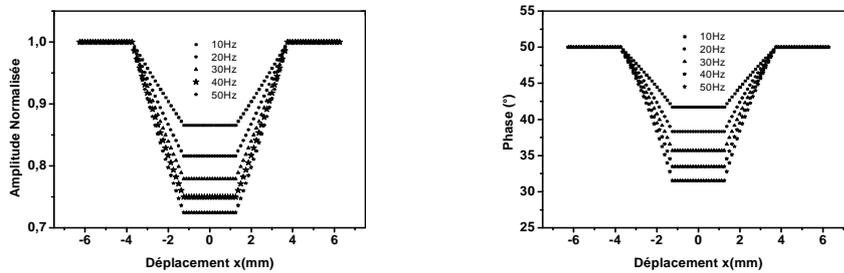


Figure 4 : Variations de l'amplitude et de la phase en fonction de x dans le cas où  $a < x_0$

### 3. Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est décrit par la figure 5. Dans notre cas, le faisceau pompe est une lampe à halogène (50 W de puissance) focalisée sur la surface de l'échantillon avec une lentille optique de focale 50 mm. La lumière est modulée en utilisant un hacheur mécanique (SR540). Le faisceau sonde laser (He-Ne) rasant la surface de l'échantillon sera dévié. La déflexion du faisceau laser sonde due aux variations périodiques de la température à la surface de l'échantillon est détectée par un photodétecteur de position formé de quatre quadrants (QD50T) relié à la détection synchrone (EG & G Model 5209) qui traduit la variation de positions du faisceau laser sur le photodétecteur par une différence du potentiel. La détection synchrone permet de mesurer l'amplitude et la phase du signal obtenu qu'on appelle signal photothermique. L'échantillon est fixé sur la table XY (deux moteurs pas à pas Newport MFA) commandée par un Motion Controller / Driver ESP300 universelle qui donne la possibilité de déplacement horizontal et vertical. Un programme en Labview effectue des mesures automatiques du signal photothermique. Le système fonctionne de telle façon qu'il mesure le signal en un point, puis se déplace vers l'autre. Un ordinateur est utilisé pour mémoriser l'amplitude et la phase du signal et de tracer leurs variations en fonction du déplacement.

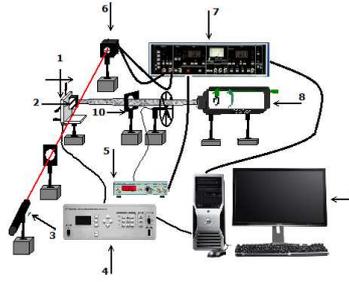


Figure 5 : Dispositif expérimental

#### 4. Résultats expérimentaux :

Dans un premier temps, nous avons étudié un défaut surfacique connu, constitué d'une rainure rectangulaire sur un échantillon de plexiglas. La forme du défaut est de 5 mm de largeur, qui est plus grande que la taille du faisceau pompe ( $a = 3$  mm), et une profondeur de  $150 \mu\text{m}$ . On peut observer dans la figure 6 le bon accord entre les courbes expérimentales et théoriques qui prouve la validité de notre modèle théorique.

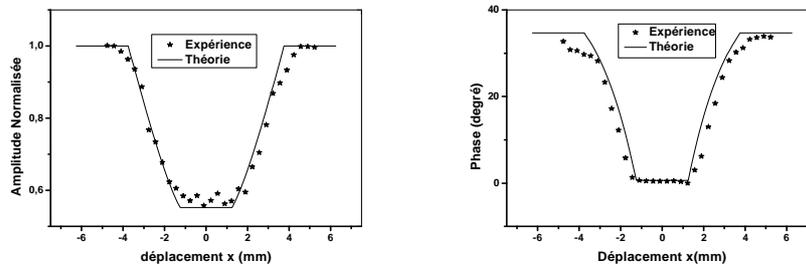


Figure 6 : Variations théoriques et expérimentales de l'amplitude et de la phase du signal en fonction du déplacement  $x$  pour un défaut surfacique en Plexiglas

Dans une deuxième étude, nous considérons deux échantillons d'aluminium ; le premier ayant un défaut de surface identique à la plaque de plexiglas précédent et le deuxième présentant un défaut en profondeur présenté dans la figure 7.

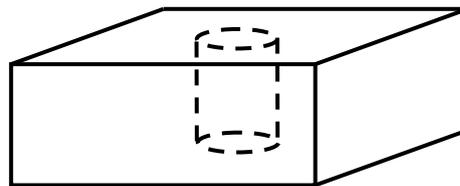


Figure 7 : Géométrie du défaut subsurfacique sur un échantillon d'Aluminium

Sur la figure 8 sont présentées les courbes théoriques et expérimentales du premier échantillon d'aluminium. En ce qui concerne le second échantillon d'aluminium, le défaut a été sculpté sur la face arrière de l'échantillon en gardant une épaisseur d'environ 100 microns par rapport à l'autre face. L'échantillon présente un défaut cylindrique d'environ 5 mm de diamètre. Le balayage est effectué dans une direction perpendiculaire à l'axe du trou cylindrique.

Dans la figure 9 sont présentées les variations théoriques et expérimentales de l'amplitude et de la phase. On remarque sur cette figure que l'amplitude du signal photothermique augmente lorsque le faisceau pompe passe au-dessus du défaut. L'augmentation de signal est due au fait que la diffusivité thermique est beaucoup plus lente dans une cavité remplie d'air que dans l'aluminium. En outre, dans ce cas, nous montrons le bon accord entre les

courbes expérimentales et théoriques pour que nous puissions considérer que notre modèle théorique est adapté à ce problème.

Le petit désaccord entre les courbes théoriques et expérimentales est dû à la géométrie du défaut qui n'est pas parfaitement rectangulaire.

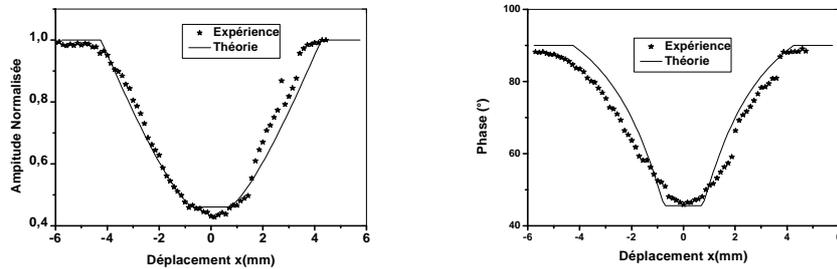


Figure 8 : Variations théoriques et expérimentales de l'amplitude et de la phase du signal en fonction du déplacement  $x$  pour un défaut surfacique en Aluminium

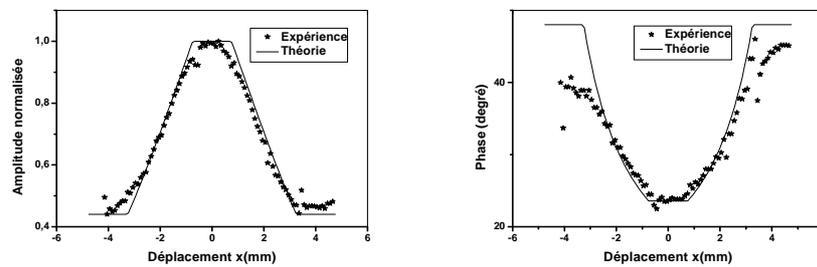


Figure 9 : Variations théoriques et expérimentales de l'amplitude et de la phase du signal en fonction du déplacement  $x$  pour un défaut subsurfacique en Aluminium

## Conclusion :

Dans ce travail, nous avons testé le modèle théorique unidimensionnel que nous avons développé dans le cas d'un chauffage uniforme. Nous avons examiné dans une première étude un défaut surfacique sur le plexiglas et l'aluminium puis un défaut subsurfacique de forme cylindrique sur l'aluminium. Le bon accord entre les courbes théoriques et expérimentales de l'amplitude et la phase du signal photothermique, prouve la validité de notre modèle théorique.

## Références :

- [1] A. Rosencwaig, "Photoacoustics and Photoacoustic Spectroscopy," Wiley Interscience, New York, 1980, pp. 170 and 295
- [2] Y. H. Wong, R. L. Thomas and G. F. Hawkins, "Subsurface Structures of Solids by Scanning Photoacoustic Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 35, No. 5, 1979, pp. 368-369
- [3] P. E. Nordal and S. O. Kanstad, "Photothermal Radiometry," *Physica Scripta*, Vol. 20, No. 5-6, 1979, p. 659.
- [4] A. Rosencwaig and G. Busse, "High-Resolution Photoacoustic Thermal-Wave Microscopy," *Applied Physics Letters*, Vol. 36, No. 9, 1980, pp. 725-727
- [5] A. C. Boccara, D. Fournier and J. Badoz, "Thermooptical Spectroscopy: Detection by the 'Mirage Effect'," *Applied Physics Letters*, Vol. 36, No. 2, 1980, pp. 130-132.
- [6] J. C. Murphy and C. Aamodt, "Photothermal Spectroscopy Using Optical Beam Probing: Mirage Effect," *Journal of Applied Physics*, Vol. 51, No. 9, 1980, pp. 4580-4588.
- [7] G. Imen, "Caractérisation Thermique et Optique des Matériaux Semi-Conducteurs par la Technique de Déflexion Photothermique," Ph.D. Thesis, Faculté des Sciences de Tunis Université el Manar, 2011.
- [8] T. Ghrib, N. Yacoubi and F. Saadallah, "Simultaneous Determination of Thermal Conductivity and Diffusivity of Solid Samples Using the 'Mirage Effect' Method," *Sensors and Actuators*, Vol. A135, No. 2, 2007, pp. 346-354.