

## DETERMINATION DES PROPRIETES THERMIQUES DES METAUX PAR LA METHODE PHOTOPYROELECTRIQUE

N. Bennaji\*, I. Mellouki et N. Yacoubi  
UR Photopyroélectrique, IPEIN, BP 62, Merazaka 8000, Nabeul, Tunisie  
Bennajin@yahoo.fr, mellouki\_imene@voila.fr, nour.yacoubi@ipein.rnu.tn

### RESUME

Dans cet article, nous proposons une nouvelle méthode basée sur la technique photopyroélectrique (PPE) par chauffage électrique uniforme des échantillons qui permet la détermination de leurs propriétés thermiques. La meilleure coïncidence des courbes théorique et expérimentale a fourni une mesure simultanée de la conductivité et de la diffusivité thermique. Cette technique a été validée en utilisant des métaux tels que l'aluminium, le cuivre, le fer, l'inox et le zinc. Les valeurs des propriétés thermiques obtenues sont en parfait accord avec la bibliographie.

### NOMENCLATURE

$C_{th}$	capacité thermique de l'échantillon	(J K <sup>-1</sup> )
$c$	chaleur spécifique massique	(J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$\Lambda$	coefficient pyroélectrique	(Am <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> )
$k$	conductivité thermique	(Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
$D$	diffusivité thermique	(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
$\tau$	durée d'impulsions électriques	(s)
$f$	fréquence de modulation	(Hz)
$V$	tension	(V)
$Z$	impédance électrique de l'échantillon	(VA <sup>-1</sup> )
$I_e$	intensité du courant	(A)
$\ell$	épaisseur de la couche	(m)
$\mu$	la longueur de diffusion thermique	(m)
$x$	longueur	(m)
$v$	volume de l'échantillon	(m <sup>3</sup> )
$\rho$	masse volumique	(Kg m <sup>-3</sup> )
$\varepsilon$	permittivité diélectrique	
$\omega$	pulsation	(rad s <sup>-1</sup> )
$\varphi$	phase	(rad)
$t$	temps	(s)
$T$	température	(K)

### 1. INTRODUCTION

La méthode proposée est basée sur la technique photopyroélectrique PPE qui consiste à chauffer un échantillon déposé sur un film pyroélectrique de type PVDF par une forme d'énergie, dans notre cas de type électrique. Un courant pyroélectrique proportionnel aux taux de variations de la température

induite est alors généré. Une analyse théorique et pratique du signal photopyroélectrique permet de déterminer simultanément les propriétés thermiques de l'échantillon [1, 2].

## 2. MODELE THEORIQUE

L'expression de la température  $T_p(\omega)$  au niveau du film pyroélectrique PVDF est obtenue en résolvant les équations de la chaleur dans les différents milieux  $i$ : air, échantillon, feuille de Mylar, film PVDF et substrat comme le montre la figure 1 [3].

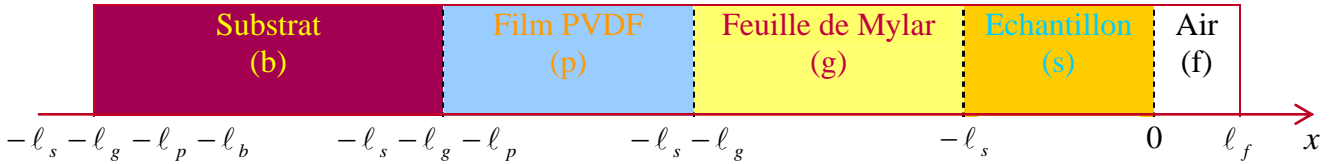


Figure 1 : Configuration du système étudié.

Le chauffage étant uniforme, alors l'hypothèse d'une représentation à une seule dimension est donc justifiée du système étudié. Les équations de la chaleur dans les différents milieux sont:

$$\frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} = \frac{1}{D_f} \frac{\partial T_f}{\partial t} \quad si \quad x \in [0, l_f] \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 T_s}{\partial x^2} = \frac{1}{D_s} \frac{\partial T_s}{\partial t} - \frac{Z I_e^2}{\nu k_s} (1 + e^{j\omega t}) \quad si \quad x \in [-l_s, 0] \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} = \frac{1}{D_g} \frac{\partial T_g}{\partial t} \quad si \quad x \in [-l_s - l_g, -l_s] \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 T_p}{\partial x^2} = \frac{1}{D_p} \frac{\partial T_p}{\partial t} \quad si \quad x \in [-l_s - l_g - l_p, -l_s - l_g] \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T_b}{\partial x^2} = \frac{1}{D_b} \frac{\partial T_b}{\partial t} \quad si \quad x \in [-l_s - l_g - l_p - l_b, -l_s - l_g - l_p] \quad (5)$$

Avec :  $D_i = \frac{k_i}{\rho_i c_i}$  et l'indice  $i$  est  $i=f, s, g, p$  et  $b$  qui sont respectivement air, échantillon, feuille de

Mylar, film PVDF et substrat.

Pour obtenir la solution du système d'équations précédents, nous avons utilisé dans ce cas la transformée de Laplace. Ainsi nous pouvons transformer notre système en équations différentielles ordinaires du second ordre. Pour l'échantillon nous aurons [4]:

$$\frac{\partial^2 T_s(x, \omega)}{\partial x^2} - \frac{j\omega}{D_s} T_s(x, \omega) = \frac{Z(\omega) I_e^2}{\nu k_s j\omega} (\exp(-j\omega\tau) - 1) \quad (6)$$

Le champ de température  $T_i(x, \omega)$  dans chaque milieu  $i$  s'écrit:

$$T_f(x, \omega) = C_1 \exp(-\sigma_f x) \exp(j\omega t) \quad si \quad x \in [0, l_f] \quad (7)$$

$$T_s(x, \omega) = \left[ C_2 \exp(\sigma_s x) + C_3 \exp(-\sigma_s x) + \frac{Z(\omega) I_e^2}{C_{th} \omega^2} (\exp(-j\omega\tau) - 1) \right] \exp(j\omega t) \text{ si } x \in [-\ell_s, 0] \quad (8)$$

$$T_g(x, \omega) = [C_4 \exp(\sigma_g (x + \ell_s)) + C_5 \exp(-\sigma_g (x + \ell_s))] \exp(j\omega t) \text{ si } x \in [-\ell_s - \ell_g, -\ell_s] \quad (9)$$

$$T_p(x, \omega) = [C_6 \exp(\sigma_p (x + \ell_s + \ell_g)) + C_7 \exp(-\sigma_p (x + \ell_s + \ell_g))] \exp(j\omega t) \text{ si } x \in [-\ell_s - \ell_g - \ell_p, -\ell_s - \ell_g] \quad (10)$$

$$T_b(x, \omega) = C_8 \exp(\sigma_p (x + \ell_s + \ell_g + \ell_p)) \exp(j\omega t) \text{ si } x \in [-\ell_s - \ell_g - \ell_p - \ell_b, -\ell_s - \ell_g - \ell_p] \quad (11)$$

$$\text{Avec } \sigma_i = \frac{1+i}{\mu_i} = (1+i)a_i, \quad a_i = \frac{1}{\mu_i} = \left( \frac{\pi f}{D_i} \right)^{1/2}.$$

Les constantes  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7$  et  $C_8$  sont complexes obtenues en appliquant les conditions de continuités du champ de température et du flux de chaleur aux différentes interfaces du détecteur  $x = 0, x = -\ell_s, x = -\ell_s - \ell_g$  et  $x = -\ell_s - \ell_g - \ell_p$ .

En résolvant ce système d'équations, on obtient l'expression de la température  $T_p(x, \omega)$  au niveau du détecteur pyroélectrique.

$$T_p(x, \omega) = \frac{-2H(\omega) \left( (b_{bp} + 1) e^{\sigma_p \ell_p} e^{\sigma_p (x + \ell_s + \ell_g)} - (b_{bp} - 1) e^{-\sigma_p \ell_p} e^{-\sigma_p (x + \ell_s + \ell_g)} \right) \times \left( 2 - ((b_{sf} + 1) e^{\sigma_s \ell_s} - (b_{sf} - 1) e^{-\sigma_s \ell_s}) \right)}{(b_{sf} + 1) \left\{ (b_{gs} + 1) \left[ (b_{bp} + 1)(b_{pg} + 1) e^{\sigma_p \ell_p} + (b_{bp} - 1)(b_{pg} - 1) e^{-\sigma_p \ell_p} \right] e^{+\sigma_s \ell_s} \right\} + (b_{gs} - 1) \left[ (b_{bp} + 1)(b_{pg} - 1) e^{\sigma_p \ell_p} + (b_{bp} - 1)(b_{pg} + 1) e^{-\sigma_p \ell_p} \right] e^{-\sigma_s \ell_s}} + (b_{sf} - 1) \left\{ (b_{gs} - 1) \left[ (b_{bp} + 1)(b_{pg} + 1) e^{\sigma_p \ell_p} + (b_{bp} - 1)(b_{pg} - 1) e^{-\sigma_p \ell_p} \right] e^{+\sigma_s \ell_s} \right\} + (b_{gs} + 1) \left[ (b_{bp} + 1)(b_{pg} - 1) e^{\sigma_p \ell_p} + (b_{bp} - 1)(b_{pg} + 1) e^{-\sigma_p \ell_p} \right] e^{-\sigma_s \ell_s}} \quad (12)$$

$$\text{Avec } H(\omega) = \frac{Z(\omega) I_e^2}{C_{th} \omega^2} (\exp(-j\omega\tau) - 1) \text{ et } b_{ij} = \frac{k_i \sigma_i}{k_j \sigma_j} \text{ est, par définition, le coefficient de transport}$$

thermique. La valeur moyenne spatiale de la température au niveau du détecteur pyroélectrique est donné par:

$$\langle T_p(\omega) \rangle = \frac{1}{\ell_p} \int_{-\ell_s - \ell_g - \ell_p}^{-\ell_s - \ell_g} T_p(\omega, x) dx \quad (13)$$

L'équation (Eq.13) permet également de retrouver l'expression de la réponse en tension aux bornes du détecteur pyroélectrique [5, 6].

$$\langle V_p(\omega) \rangle = \frac{\Lambda \ell_p}{\varepsilon} \langle T_p(\omega) \rangle \quad (14)$$

Ce signal photopyroélectrique (Eq. 14) est une fonction complexe qui se met sous la forme

$\langle V_p(\omega) \rangle = \left| \langle V_p(\omega) \rangle \right| \exp(j\varphi(\omega))$  qui est en fonction de la racine carrée de la fréquence de modulation et des propriétés thermiques des constituants au détecteur pyroélectrique.

#### 4. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le schéma du détecteur pyroélectrique est donné par la figure 2. L'échantillon est en bon contact thermique avec une feuille de Mylar d'épaisseur 125µm qui permet de court-circuiter de point électrique. Pour minimiser toute éventuelle vibration, l'échantillon est fixé sur un support en Plexiglas par deux lames en cuivre. Ces lames jouent aussi le rôle d'électrodes du chauffage électrique. Le film pyroélectrique PVDF d'épaisseur 25µm est collé sur le dissipateur thermique en cuivre d'épaisseur 6mm. Le signal photopyroélectrique est récupéré à l'aide de deux fils conducteurs [7].

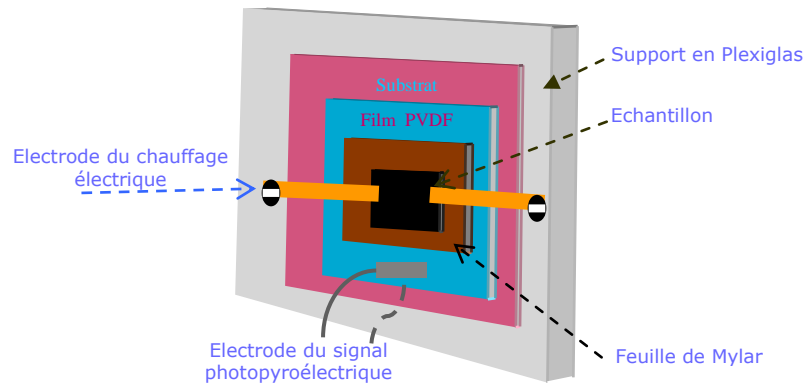


Figure 2 : Schéma du détecteur pyroélectrique.

Dans notre modèle théorique, nous avons utilisé les propriétés thermiques rassemblées au tableau 1 pour le substrat en cuivre, film PVDF, la feuille de Mylar et le fluide d'air [8, 9].

Table 1 : Propriétés thermiques utilisées dans le modèle.

Echantillon	Diffusivité thermique dans la littérature ( $m^2 s^{-1}$ )	Conductivité thermique dans la littérature ( $Wm^{-1}K^{-1}$ )
Air	$2 \cdot 10^{-5}$	0,025
Feuille de Mylar	$150 \cdot 10^{-4}$	0,04
Film PVDF	$6,3 \cdot 10^{-8}$	0,13
Cuivre	$4 \cdot 10^{-4}$	390

Un schéma simplifié du dispositif expérimental utilisé pour le système photopyroélectrique est donné par la figure 3. Ce dispositif est composé essentiellement d'un détecteur pyroélectrique, installé dans une cellule photopyroélectrique qui joue le rôle d'une cage de Faraday, et chauffé à l'aide d'une énergie électrique fournie par un générateur d'impulsion. Le courant photopyroélectrique ainsi généré est amplifié et convertit en tension à l'aide d'un convertisseur courant-tension. Le signal photopyroélectrique est mesuré au moyen d'une détection synchrone de type «EG & G 5210» relié via le bus RS232 à micro-ordinateur qui enregistre l'amplitude et la phase du signal photopyroélectrique en fonction de la fréquence de modulation.

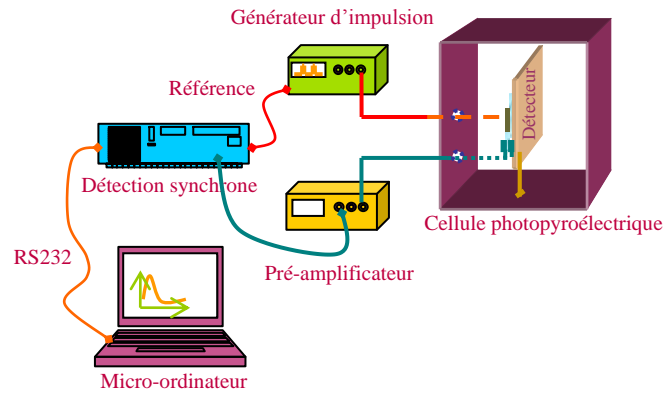


Figure 3 : Schéma synoptique du dispositif expérimental pour la technique photopyroélectrique.

### 5. RESULTATS EXPERIMENTAUX

Nous avons utilisé des logiciels tels que le Microcal Origin et Maple pour le traçage des courbes théoriques et expérimentales de la phase et de l'amplitude du signal photopyroélectrique. Les courbes de figures 4, 5, 6, 7 et 8 représentent les variations théorique et expérimentale respectivement de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique en fonction de la racine carrée de la fréquence de modulation pour un échantillon d'aluminium d'épaisseur 0,85mm, de cuivre d'épaisseur 1,6mm, de fer d'épaisseur 0,7mm, d'inox d'épaisseur 0,6mm et de zinc d'épaisseur 1,4mm.

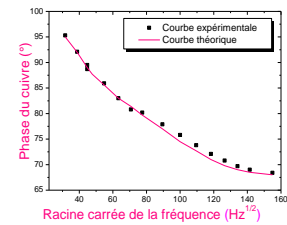
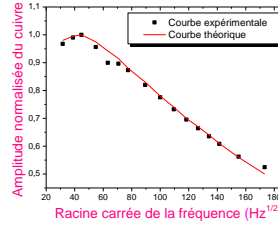
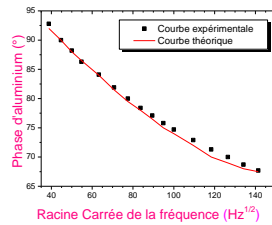
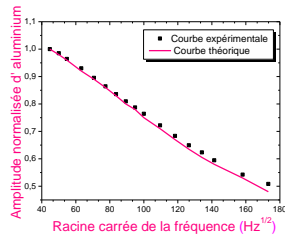


Figure 4 : Courbes de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique de l'aluminium.

Figure 5 : Courbes de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique du cuivre.

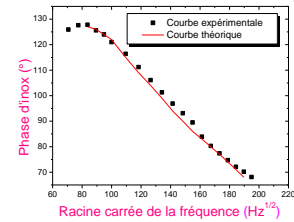
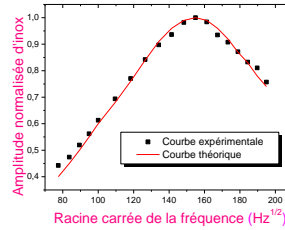
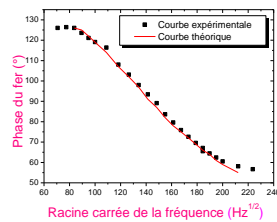
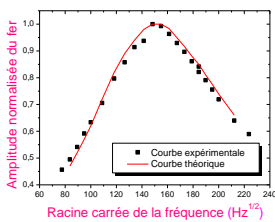


Figure 6 : Courbes de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique du fer.

Figure 7 : Courbes de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique de l'inox.

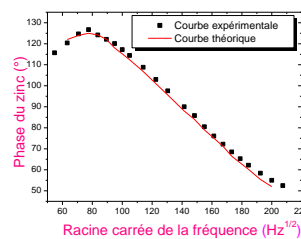
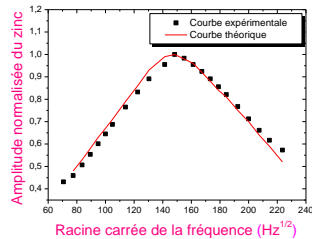


Figure 8 : Courbes de l'amplitude et de la phase du signal photopyroélectrique du zinc.

Le tableau 2 résume les différentes valeurs de la conductivité thermique et la diffusivité thermique de ces métaux obtenues par notre modèle.

Table 2 : Propriétés thermiques de métaux.

Métaux	Valeurs expérimentales		Valeurs bibliographiques [10]	
	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Diffusivité thermique (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )	Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	Diffusivité thermique (m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> )
Aluminium	240	1,1 10 <sup>-4</sup>	237	9,7 10 <sup>-5</sup>
Cuivre	395	1,2 10 <sup>-4</sup>	390	11,6 10 <sup>-5</sup>
Zinc	114	5 10 <sup>-5</sup>	116	4,08 10 <sup>-5</sup>
Fer	82	210 <sup>-5</sup>	80	2,3 10 <sup>-5</sup>
Inox	24	8 10 <sup>-6</sup>	26	7,46 10 <sup>-6</sup>

## 6. CONCLUSION

La méthode photopyroélectrique qui est une méthode de contrôle non destructive qui permet de mesurer la conductivité thermique et la diffusivité thermique des métaux avec une meilleure précision en utilisant le chauffage électrique. Les valeurs obtenues de l'aluminium, du cuivre, du fer, du zinc et de l'inox sont en parfait accord avec ceux trouvées en bibliographique [10]. Dans un futur proche, nous allons appliquer cette méthode à des échantillons semi-conducteurs afin de déterminer leurs propriétés thermiques et éventuellement leurs impédances électriques en fonction de la fréquence.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. S. Delenclos, 2006, *Etude des propriétés thermiques et optiques d'un composite polymere/cristal liquide soumis à un champ*, Université du Littoral - Côte d'Opale
2. B. Z. Azmi et al., 2004, *Normalisation procedure in thermal wave approach of thermal diffusivity measurement of solids using pyroelectric sensor*, *Infrared Physics & Technology* 45 315-321
3. A. Mandelis, M.M. Zver, 1985, *J. Appl. Phys.* 57 (9) 4421
4. I. Mellouki, 2004, *Elaboration et caractérisation d'un détecteur pyroélectrique piège pour les mesures absolues des rayonnements optiques*, thèse de doctorat, Université de Tunis El Manar, Faculté des Sciences de Tunis, p 108
5. S. Delenclos, M. Chirtoc, A.H. Sahraoui, C. Kolinsky, J.M. Buisine, 2001, *Anal. Sci.* 17 161
6. J. E. de Albuquerque, C. Giacomantonio, A. G. White, et P. Meredith, 2005, *Determination of thermal and optical parameters of melanins by photopyroelectric spectroscopy*, *Applied physics letters* 87, 061920
7. B. Andriyevsky, Z. Czaplá, M. Romanyuk, O. Myshchysyn, 2000, *Phys. Stat. Solidi A* 177 575
8. F. Kreith et W. Zblack, *Basic Heat transfer*, institute de technologie, *Harper and row Publishers*, New york
9. W.R Blevin et J. Geist, 1974, *Influence of black coating and pyroelectric detectors*, *App. Opt.* vol.13(15), (1171)
10. I. Noels, 2007, *Conductivité thermique des éléments*, *Massachusetts Institute of Technology*.