

MESURE DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE DES MATERIAUX PAR ANALOGIE THERMIQUE – ELECTRIQUE DU DETECTEUR PYROELECTRIQUE

I. Mellouki* et N. Yacoubi

*Laboratoire Photopyroélectrique, IPEIN, BP 62 Merazka 8000, Nabeul – Tunisie.
mellouki_imene@voila.fr

RESUME : Une nouvelle méthode, basée sur l’analogie thermique - électrique du détecteur pyroélectrique et sa réponse en température expérimentale, a été introduite dans cet article, pour valoriser la diffusivité thermique des matériaux. Cette technique a été testée sur un échantillon de graphite, déposé par spray sur un détecteur pyroélectrique de type PVF₂. La valeur obtenue de la diffusivité thermique du graphite est de $1,12 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ qui se trouve en parfait accord avec celle trouvée par la technique photothermique effet mirage.

1. INTRODUCTION :

Plusieurs méthodes photothermiques telles que l’effet mirage [1] ou la technique photopyroélectrique [2], ont été mises au point pour évaluer la diffusivité thermique des matériaux. Dans ce travail, nous avons déterminé la diffusivité thermique des échantillons en se basant sur l’analogie thermique - électrique du détecteur pyroélectrique et sa réponse expérimentale en température en régime impulsionnel. Nous avons effectué une vérification expérimentale des résultats obtenus par effet mirage appliqué à un échantillon de graphite déposé par spray sur le film pyroélectrique.

2. ANALOGIE THERMIQUE – ELECTRIQUE DU DETECTEUR PYROELECTRIQUE EN REGIME IMPULSIONNEL :

Le rayonnement incident qui arrive sur le détecteur thermique, de capacité calorifique C_{th} , sera absorbé par la partie active de ce détecteur par un facteur ε et transformé en chaleur. L’élévation de température ainsi générée, constitue la réponse du détecteur thermique. Le détecteur est relié à un dissipateur thermique, maintenu à température constante T_0 , par une résistance thermique R_{th} . Le comportement d’un tel système est régi par l’équation suivante :

$$C_{th} \frac{d\theta(t)}{dt} + \frac{\theta(t)}{R_{th}} = \varepsilon \Phi(t) \quad (1)$$

Avec :

$\theta(t) = T(t) - T_0$: variation de la température du détecteur thermique à l’instant t , exprimée en K

ε : Facteur d’absorption de la partie active du détecteur

$\phi(t)$: Flux incident sur le détecteur à l’instant t , exprimé en W

C_{th} : capacité thermique du détecteur exprimée en JK^{-1}

R_{th} : résistance thermique du détecteur exprimée en W^{-1}K

La différence de température $\theta(t) = T(t) - T_0$ entre le détecteur à la température T et le support thermique maintenu à la température ambiante T_0 , est déduite du bilan global des transferts d’énergies au niveau du détecteur donnée par l’équation (1).

Pour intégrer cette équation différentielle, souvent exprimée en fonction de la constante de temps thermique du détecteur $\tau_{th} = R_{th}C_{th}$, il est utile de connaître la fonction du flux incident qui dans le cas de notre appareillage, est du type impulsionnelle.

L'impulsion de température $\theta(t)$ peut être modélisée par :

$$\theta(t) = A(e^{-\frac{t}{\tau_{th}}} - e^{-\frac{t}{T_{CH}}}) \quad (2)$$

A est une constante positive qui dépend du détecteur et T_{CH} représente la durée de chauffage tel que : $T_{CH} \ll \tau_{th}$. Malheureusement, nous ne pouvons pas utiliser cette expression théorique de la température pour obtenir la diffusivité thermique d'un constituant du détecteur car elle n'intervient pas dans la constante A de l'équation (2). L'absorption optique du matériau provoquera une variation thermique de la polarisation spontanée au niveau du détecteur pyroélectrique, donc une élévation instantanée de la température. Le courant pyroélectrique ainsi généré, s'exprime comme suit:

$$I_p(t) = S\Lambda \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3)$$

S : surface totale du détecteur pyroélectrique

Λ : est le coefficient pyroélectrique exprimé en $Cm^{-2}K^{-1}$.

En tenant compte des équations (1) et (3), le détecteur pyroélectrique est équivalent au réseau électrique suivant ($E(t) = \epsilon \Phi(t) R_{th}$)

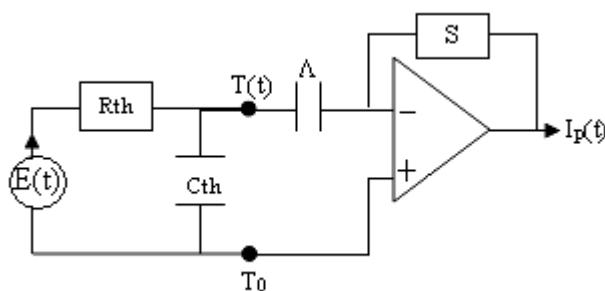
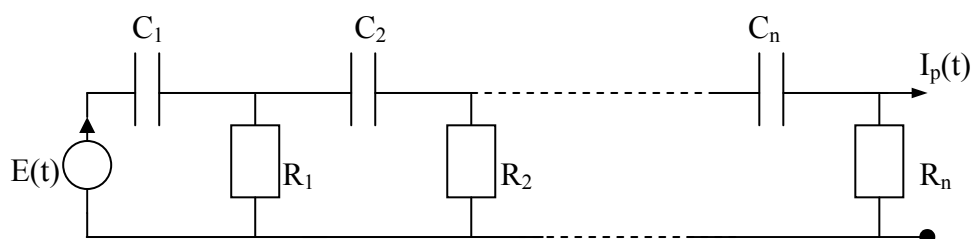


Figure 1. Analogie thermique – électrique du détecteur pyroélectrique

La fonction de transfert de ce montage électrique a pour module :

$$|H_0(f)| = \frac{S\Lambda f}{\sqrt{1 + \frac{f^2}{f_{th}^2}}} \quad \text{Avec} \quad f_{th} = \frac{1}{\tau_{th}}$$

D'après cette équation, ce détecteur pyroélectrique se comporte de point de vue électrique comme un filtre passe-haut d'ordre 1. Cependant, si le détecteur pyroélectrique est constitué d'une succession de n couches de différentes épaisseurs h_n et de diffusivité thermique D_n , alors il est assimilé à un filtre électrique passe-haut d'ordre n. Par ailleurs, tout empilement (i) du détecteur se comporte comme un filtre passe-haut d'ordre 1, constitué de la résistance thermique R_i et de la capacité thermique C_i . Le réseau électrique équivalent du détecteur pyroélectrique est :



T_0

Figure 2. Réseau électrique équivalent du détecteur pyroélectrique.

La fonction de transfert complexe de ce montage est $H_n(f)$ à la fréquence f , a pour module :

$$|H_n(f)| = \frac{f^n}{\prod_{i=1}^n \sqrt{(f^2 + f_i^2)}}$$

Et a pour phase :

$$\varphi_n(f) = n \frac{\pi}{2} - \sum_{i=1}^n \text{Arctg}\left(\frac{f}{f_i}\right) \quad \text{Où } f_i = \frac{1}{R_i C_i} = \frac{D_i}{h_i^2}$$

Le matériau pyroélectrique PVF_2 préalablement polarisé présente une capacité électrique propre C_p et une résistance électrique propre R_p . La variation de la tension aux bornes de l'élément pyroélectrique pour une résistance de charge très grande est analogue à celle de la température de l'échantillon.

$$V_s(t) = -\Delta S \theta(t) / C_p \quad (4)$$

Pour obtenir la variation de la température du matériau en fonction du temps, nous avons relevé la tension à la sortie d'un convertisseur de charge – tension d'un condensateur invariable C_c [3].

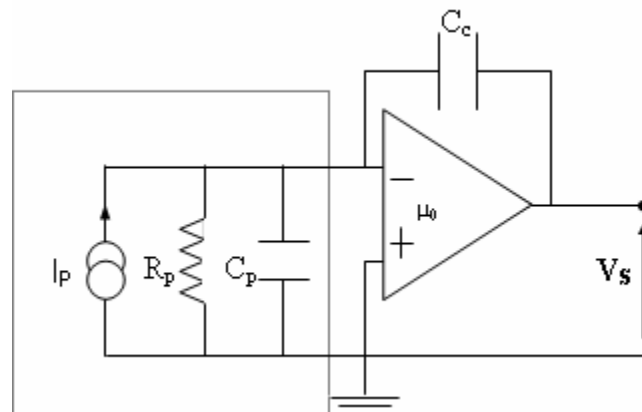


Figure 3. Montage du convertisseur de charge – tension.

L'évolution du courant pyroélectrique à travers le circuit donné par le montage précédent est :

$$I_p(t) = -C_c \frac{dV_s(t)}{dt}$$

D'après l'équation (4), la réponse en température est donnée par :

$$V_s(t) = -\Delta S C_{th}^{-1} C_c^{-1} E e^{-t/\tau_{th}}$$

3. REPONSE EXPERIMENTALE EN TEMPERATURE : DISPOSITIF EXPERIMENTAL

Le détecteur thermique utilisé dans notre cas est constitué d'un matériau pyroélectrique de type PVF_2 , d'épaisseur $25\mu m$ dont les deux faces sont métallisées en aluminium pour récupérer le signal

pyroélectrique. Sur la face avant du film pyroélectrique est déposé l'échantillon et l'ensemble est collé sur un dissipateur thermique en cuivre d'épaisseur 6mm, maintenu à la température T_0 . Dans ce cas, le détecteur se comporte comme un filtre passe-haut d'ordre 3, dont les caractéristiques sont rassemblées dans le tableau ci-dessous [4] :

Tableau 1. Caractéristique du détecteur pyroélectrique

	PVF ₂	Cuivre
D_i (m ² s ⁻¹)	5.410^{-8}	1.1610^{-4}
h_i (mm)	$25 \cdot 10^{-3}$	6
f_i (s ⁻¹)	86.42	3.22

La source d'excitation est un laser de longueur d'onde 532 nm et de puissance maximale égale à 3W, modulé à l'aide d'un chopper mécanique fonctionnant à la fréquence $f=20$ Hz. A la sortie du chopper, le faisceau laser est focalisé au moyen d'une lentille (de distance focale=50mm) au centre du détecteur pyroélectrique. Le convertisseur de charge – tension utilisé au cours de cette étude est à base d'amplificateur d'instrumentation de type AD620 dont l'impédance d'entrée est de l'ordre de $10^{10}\Omega$ et une capacité électrique C_c de valeur 1nF. La réponse en température expérimentale pour un échantillon de graphite d'épaisseur 110 μ m [5], est donnée par l'oscillogramme enregistré et mémorisé par un oscilloscope numérique à mémoire Tektronix de type TDS220 interfaçable à un PC par le biais de l'interface RS232.

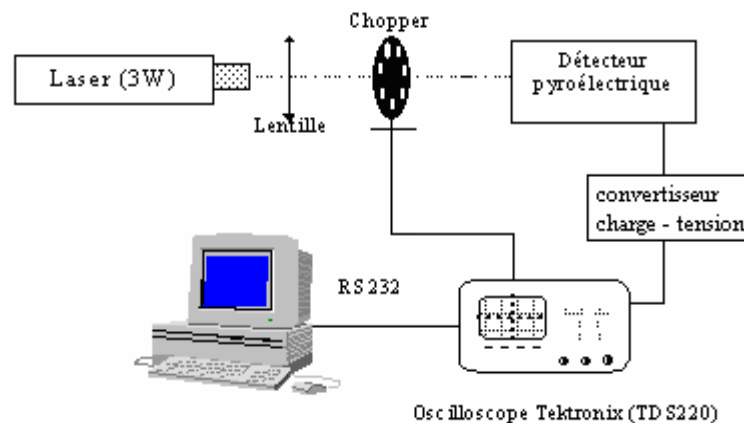


Figure 4. Dispositif expérimental de l'enregistrement de la réponse en température expérimentale du détecteur pyroélectrique en régime impulsionnel

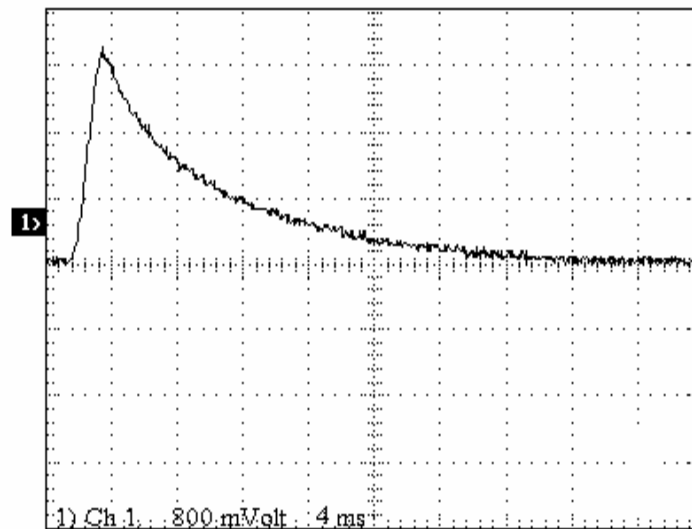


Figure 5. Signal en température pour une épaisseur du matériau pyroélectrique égale à $25\mu\text{m}$

D'après cet enregistrement, nous distinguons deux zones : la première, celle qui présente une zone de chauffage, caractérisée par la constante de temps de chauffage T_{ch} , et la deuxième où il y a la décroissance du signal donc le retour à l'équilibre thermique du détecteur, caractérisée par la constante de temps thermique τ_{th} . La normalisation du signal en température, nous a fourni une mesure de la constante de temps thermique τ_{th} du détecteur pyroélectrique. En effet, en prenant le logarithme népérien de la tension $V_s(t)$ normalisée dans la zone de décroissance, nous obtenons une droite dont la pente égale à $-1/\tau_{th}$, soit $\tau_{th}=7,2\text{ms}$. Bien évidemment, il existe d'autres méthodes pour déterminer la constante de temps thermique des détecteurs thermiques, telles que l'étude fréquentielle de la réponse du détecteur, connue sous le nom : technique photopyroélectrique.

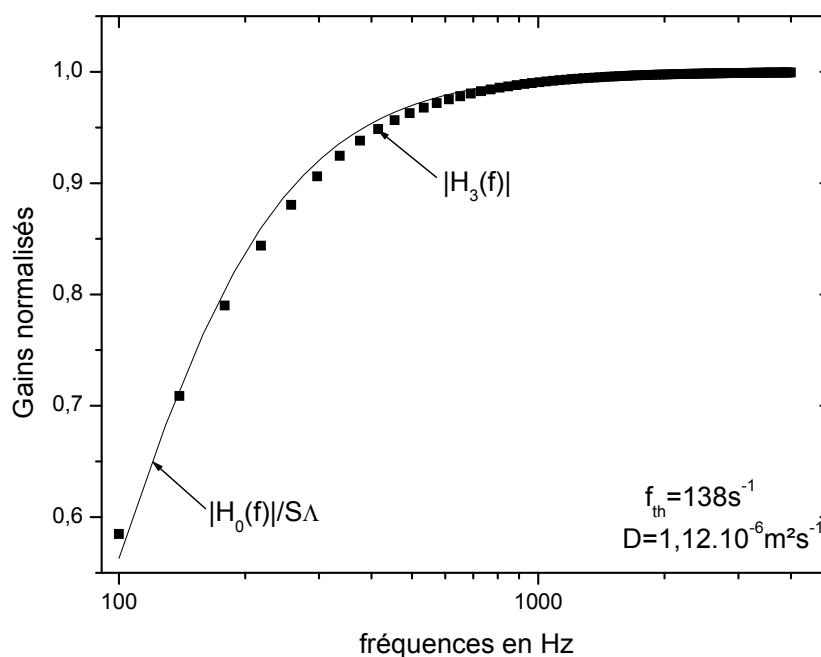


Figure 6. Gains normalisés des fonctions de transferts

La meilleure coïncidence des courbes théoriques des gains normalisés est obtenue pour une valeur $D=1,12 \cdot 10^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$ de la diffusivité thermique de l'échantillon de graphite. La valeur trouvée par la technique photothermique Effet Mirage est de $D=1,4510^{-6} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

4. CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons montré qu'il est possible de déterminer la diffusivité thermique des matériaux en adoptant l'analogie thermique – électrique du détecteur pyroélectrique. Dans un futur prochain, nous allons utiliser cette analogie pour étudier l'effet des épaisseurs des matériaux sur la constante de temps thermique du détecteur pyroélectrique ainsi que pour comparer l'étude fréquentielle à la technique photopyroélectrique.

5. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. F. Lepoutre et J.P Roger, 1987, *Revue Générale de Thermique*, n°301.
2. A. Mandelis, 1985, M. Zver, *J. Appl. Phys.* Vol. 57 p.4421.
3. R. Damaye, 1972, Amplificateurs Opérationnels et applications, *Radio*.
4. I. Mellouki, O. Touayar, T. Ktari, F. Saadallah, N. Yacoubi and J. Bastie, 2004, Study and realization of a trap pyroelectric detector for absolute high radiant powers and energies, *Meas. Sci. and Tech.*, IOP, 15:384-388.
5. I. Mellouki, *et al.*, 2003, Etalonnage électrique d'un détecteur pyroélectrique piège, communication par affiche, *Premières Journées de Nanotechnologie*, Soussse16-17/12/2003.