

Détermination de l'indice d'extinction d'échantillons de polyéthylène haute densité (PEHD) soumis à une excitation périodique de température au voisinage de l'ambiance

N'GUESSAN Y. et SAKO M.
N'GUESSAN K. et GBAHA P.

RÉSUMÉ

Cet article présente une méthode de détermination de l'indice d'extinction de lames semi-transparentes non diffusantes de polyéthylène haute densité (PEHD), soumises sur une de leurs faces à une excitation périodique de température. La comparaison en modules et en phases des valeurs calculées de luminance avec celles mesurées sur des échantillons de polyéthylène haute densité (PEHD), d'épaisseurs 3 mm et 5 mm, soumis à une excitation périodique de température autour de l'ambiance, sous la forme de 7 sinusoides de fréquences comprises entre 0,78 mHz et 50 mHz, permet de calculer l'émissivité apparente nécessaire à la détermination des paramètres thermophysiques (indice de réfraction, indice d'extinction) de la plupart des polymères.

Les résultats obtenus de la présente étude montrent que l'indice de réfraction influe peu sur l'émissivité apparente. Par contre, l'indice d'extinction en dépend fortement, comme le montre l'étude de sensibilité menée de l'émissivité apparente à l'indice d'extinction. L'indice d'extinction a pu être déterminé à partir du module ou de la phase de cette émissivité apparente. Les précisions obtenues sont excellentes.

Mots clés : Détection synchrone, émissivité, mesure, modélisation, rayonnement, radiométrie, corps noir, indice de réfraction, indice d'extinction, sensibilité.

ABSTRACT

This report shows a way of determining the extinction index of non-scattering semitransparent media, which one of the faces is submissive to a periodic temperature.

The comparison in amplitudes and phases of the computed values of thermal intensity and those measured on 3 mm and 5 mm thickness polyethylen samples, modulated around room temperature on the form of seven amount sinusoids, with frequencies ranging between 0.78 mHz and 50 mHz, allows to calculate apparent emissivity, which is required for the determination of thermal characteristics (refraction index, extinction index) of most of polymers.

The present results show that the refraction index has little influence on apparent emissivity. On the other hand, the extinction index strongly depends on apparent emissivity, as the sensitivity study of apparent emissivity to extinction index shows it.

The extinction index could be given from the amplitudes or the phases of this apparent emissivity. The statistical accuracy is excellent.

Key words : Synchrone detection, emissivity, measurement, modelling, radiation, radiometry, black body, refraction index, extinction index, sensitivity.

Nomenclature

- d épaisseur de l'échantillon
- λ longueur d'onde
- f fréquence de modulation
- n indice de réfraction
- t temps
- ρ facteur de réflexion
- τ facteur de transmission
- χ indice d'extinction
- κ coefficient volumique d'absorption
- α diffusivité thermique
- ϵ émissivité
- x profondeur dans l'échantillon
- θ température
- σ écart-type
- P puissance du bruit
- S variation relative de l'émissivité apparente
- Bi nombre de Biot
- ϕ phase de la température
- L luminance monochromatique
- λ luminance réduite

- U signal infrarouge
- ref relatif à la référence, d'émissivité
- moy relatif à la valeur moyenne
- av relatif à la face avant
- nu relatif à l'échantillon nu
- pn relatif à l'échantillon recouvert de peinture noire
- 10 relatif à l'interface lame-air
- 125 relatif à l'interface lame-support
- MST matériau semi-transparent
- PEHD polyéthylène haute densité
- D* détectivité réduite du détecteur pyroélectrique

N'GUESSAN Yao et SAKO Mohamed
Laboratoire de Froid & Thermique
INP-HB B.P. 1093 Yamoussoukro, CÔTE D'IVOIRE
Tél. (225) 30 64 66 85 - 30 64 66 66 - Fax. (225) 30 64 66 80
Emails : yao2000m@yahoo.fr - sakomk@yahoo.fr

N'GUESSAN Kotchi et GBAHA Prosper
Laboratoire d'énergies nouvelles et renouvelables
INP-HB B.P. 1093 Yamoussoukro, CÔTE D'IVOIRE
Tél. (225) 30 64 10 76 - 30 64 66 66 - Fax. (225) 30 64 66 60
Emails : kotching@yahoo.fr - pgbaha@yahoo.fr

INTRODUCTION

Très récemment, nous avons utilisé un modèle non couplé de luminance en régime sinusoïdal pour calculer le flux émis par des lames semi-transparentes non diffusantes, soumises sur une des faces à une excitation périodique de température [1].

Ensuite, nous avons montré qu'à partir d'une étude expérimentale menée sur des échantillons de PEHD, d'épaisseurs 3 mm et 5 mm, modulés à différentes fréquences autour de l'ambiance, il était possible de faire coïncider les modules et les phases des valeurs mesurées et calculées de luminance, avec une bonne précision.

Cet article présente la continuité de ces travaux, pour arriver à la détermination de l'indice d'extinction des mêmes lames, soumises aux mêmes conditions d'excitation de température ; paramètre présent dans la plupart des modèles thermiques.

I. RAPPEL DU MODÈLE UTILISÉ

On considère une lame semi-transparente non diffusante (d'indices n et χ), d'épaisseur d très supérieure à la longueur d'onde d'émission λ , optiquement isotrope et homogène, placée sur un support opaque (figure 1).

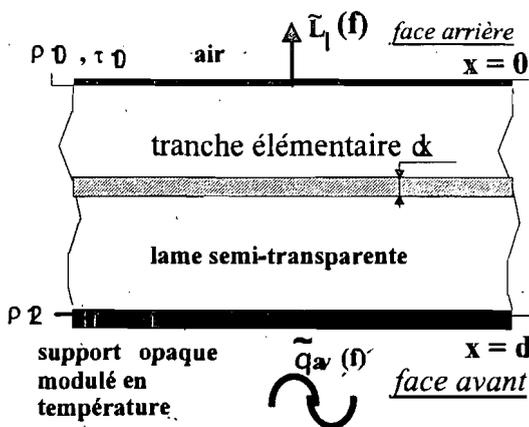


Fig. 1 : Lame semi-transparente modulée en température

La lame étant semi-transparente, le flux émis provient aussi bien de la surface que des couches internes. La lame peut être décomposée en tranches élémentaires. La température d'une tranche peut s'écrire comme une fonction du temps et de la profondeur x de la lame :

$$\theta(x, t) = \theta_{\text{moy}} + \Delta\theta(x) \cdot \sin[2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi(x)] \quad (1)$$

Chaque tranche élémentaire émet un flux modulé synchrone avec sa température, et on appelle sa contribution à la luminance monochromatique de la lame. Pour de faibles amplitudes de modulation, est

une fonction linéaire de la température. Sous incidence normale et en tenant compte des réflexions multiples au sein du matériau, la valeur instantanée de cette contribution peut être calculée à l'aide d'une méthode de tracé de rayon [2], ou à partir de l'équation de transfert radiatif. La quantité s'exprime donc par

$$d\tilde{L}_\lambda(x, f) = \kappa \cdot A \cdot B(x) \cdot \tilde{L}_\lambda[\theta(x, f)] dx \quad (2)$$

avec $\kappa = \frac{4\pi\chi}{\lambda}$, $A = \frac{\tau_{10}}{1 - \rho_{10} \cdot \rho_{12} \cdot \exp(-2 \cdot \kappa \cdot d)}$

et $B(x) = \exp(-\kappa \cdot x) + \rho_{12} \cdot \exp(-\kappa \cdot (2 \cdot d - x))$

ρ_{10} et τ_{10} sont les facteurs de réflexion et de transmission à l'interface lame-air, et ρ_{12} est le facteur de réflexion à l'interface lame-support.

Aux températures proches de l'ambiance, les transferts thermiques radiatifs sont négligeables devant les transferts conductifs. Les températures $\theta(x, f)$ sont donc calculées à partir d'un modèle monodimensionnel purement conductif. La luminance monochromatique de la lame s'obtient en intégrant sur l'épaisseur d les luminances élémentaires, et en y ajoutant la contribution du support opaque de température $\tilde{\theta}_{av}(f)$, soit finalement :

$$\tilde{L}_\lambda(f) = (1 - \rho_{12}) A \cdot \exp(-\kappa \cdot d) \cdot \tilde{L}_\lambda(\tilde{\theta}_{av}(f)) + \int_0^d d\tilde{L}_\lambda(x, f) \cdot dx \quad (3)$$

D'après ce modèle, la luminance $\tilde{L}_\lambda(f)$ de la lame dépend, en particulier, de l'indice d'extinction χ du MST.

II. RAPPEL DU DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

Ce dispositif est destiné à mesurer la luminance et la température en face avant d'un échantillon semi-transparent et d'une référence opaque d'émissivité connue, pour différentes fréquences de modulation, autour de la température ambiante.

Un système de détection infrarouge (figure 2) mesure le flux monochromatique issu d'un échantillon.

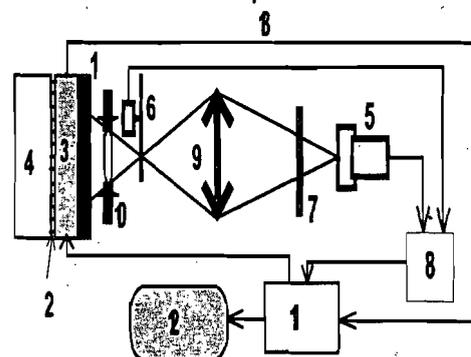


Fig. 2 : Système de détection infrarouge

1 : échantillon 2 : Peltier 3 : plaque avant 4 : dissipateur 5 : détecteur 6 : hacheur 7 : filtre 8 : voltmètre vectoriel 9 : lentille 10 : diaphragme 11 : système d'acquisition et de contrôle 12 : micro-ordinateur 13 : thermocouple

Ce système est composé d'un détecteur infrarouge HgCdTe ($D^* = 2 \times 10^{10} \text{ cm.Hz}^{1/2}.W^{-1}$) associé à un hacheur mécanique fonctionnant à 2300 Hz, un filtre interférentiel passe-bande ($10,6 \mu\text{m} \pm 180 \text{ nm}$) et un voltmètre vectoriel. Une lentille de ZnSe et un diaphragme permettent de viser un disque de diamètre 36 mm sur l'échantillon ($44 \text{ mm} \times 44 \text{ mm}$).

Le signal infrarouge $U(t)$ recueilli à l'extrémité de la chaîne de mesure est la somme de plusieurs composantes : 7 composantes significatives dont on cherche à déterminer l'amplitude et la phase, un bruit très basse fréquence dû aux variations lentes de température ambiante qui influent sur le flux réfléchi par l'échantillon ou émis par le hacheur, des fluctuations de courte durée (parasites électriques) et un bruit blanc constitué essentiellement du bruit de fond du détecteur. La figure 3a présente un signal infrarouge $U(t)$ typique et son spectre d'amplitude $\|\tilde{U}(f)\|$ (figure 3b).

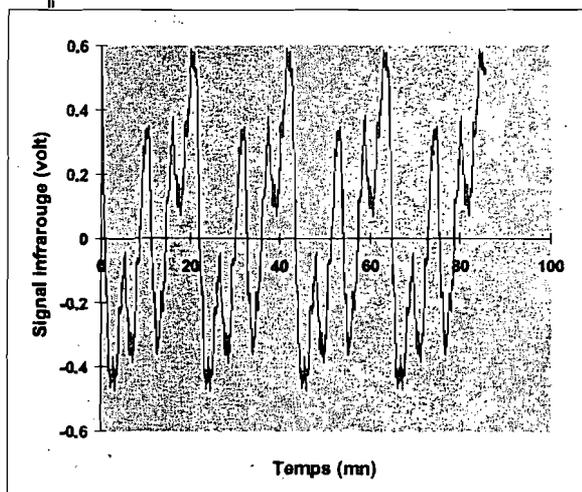


Fig. 3a : Allure du signal infrarouge mesuré

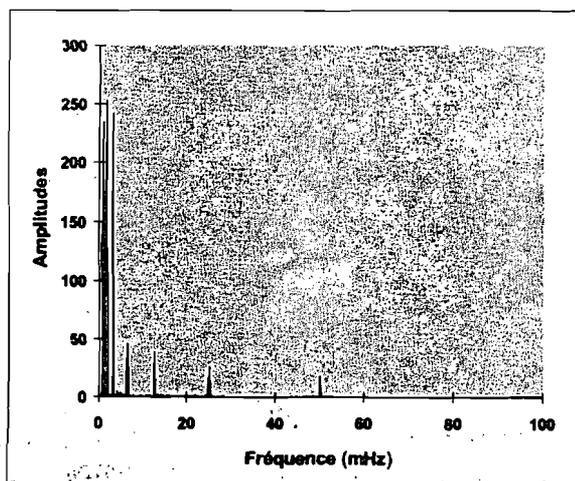


Fig. 3b : Spectre d'amplitude du signal mesuré

Le signal sortant de la chaîne de mesure est de la forme d'une tension, exprimée par :

$$U(t) = U_{\text{moy}} + \sum_{i=1}^7 U_i \cdot \cos(2\pi \cdot 2^{i-1} \cdot f_0 \cdot t) \quad (4)$$

Avec U_{moy} la valeur moyenne de la tension d'excitation et U_i l'amplitude de la tension pour la fréquence $f_i = 2^{i-1} \cdot f_0$.

Les valeurs de U_i ont été choisies de façon à conserver un rapport signal/bruit du même ordre de grandeur dans la gamme de fréquences étudiées.

La température $\theta_{\text{av}}(t)$ est mesurée par un thermocouple placé au milieu de la plaque qui supporte l'échantillon. L'amplitude crête à crête de température est de l'ordre de 10°C .

Le traitement des données consiste d'abord à calculer la luminance du corps noir $L_{\Delta\lambda}^\circ(t)$ correspondant à la température mesurée $\theta_{\text{av}}(t)$ et à la bande de longueur d'onde $\Delta\lambda$ considérée. Après redressement des signaux $L_{\Delta\lambda}^\circ(t)$ et $U(t)$, leurs différentes composantes fréquentielles $\tilde{L}_{\Delta\lambda}^\circ(f)$ et $\tilde{U}(f)$ sont obtenues par transformation de Fourier. Pour chacune des 7 fréquences de modulation, la tension mesurée en sortie de la chaîne de mesure est de la forme suivante :

$$\tilde{U}(f_i) = \tilde{A}(f_i) \tilde{L}_{\Delta\lambda}(f_i) \quad (5)$$

où $\tilde{A}(f_i)$ représente la fonction de réponse en fréquence de la chaîne de mesure et $\tilde{L}_{\Delta\lambda}(f_i)$ la luminance complexe de la lame.

Enfin, on calcule les luminances réduites, que l'on définit par :

$$\tilde{I}(f_i) = \tilde{U}(f_i) / \tilde{L}_{\Delta\lambda}^\circ(\theta_{\text{av}}(f_i)) \quad (6)$$

Ces luminances réduites permettent de calculer l'émissivité de l'échantillon, nécessaire à la détermination de l'indice d'extinction. En effet, afin de permettre la comparaison mesure-modèle, on introduit la notion d'émissivité monochromatique apparente

complexe $\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}(f)$ de la lame semi-transparente, qui est le rapport de sa luminance apparente complexe

$\tilde{L}_{\Delta\lambda}(f)$, à celle d'un corps noir pris comme référence à la température de surface en face arrière $\tilde{L}_{\Delta\lambda}^\circ(\theta_{\text{av}}(f))$ [1]. Elle est définie par l'expression :

$$\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}(f) = \frac{\tilde{L}_{\Delta\lambda}(f)}{\tilde{L}_{\Delta\lambda}^\circ(\theta_{\text{av}}(f))} \quad (7)$$

Compte tenu de la définition adoptée pour l'émissivité et du fait de la contribution des couches

internes de la lame à l'émissivité, les valeurs d'émissivité apparente peuvent être supérieure à l'unité.

La comparaison des luminances réduites ainsi obtenues sur l'échantillon « nu » (c'est-à-dire échantillon sans revêtement) et sur le même échantillon recouvert d'un revêtement thermiquement mince et opaque de peinture noire (indice « pn »), d'émissivité ϵ_{ref} connue, permet de calculer l'émissivité apparente, à chaque fréquence de modulation (f), par la formule :

$$\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}(f_i) = \epsilon_{ref} \cdot \frac{\tilde{I}_n(f_i)}{\tilde{I}_p(f_i)} \quad (8)$$

Compte tenu du temps mis pour le revêtement de l'échantillon, les mesures de luminances réduites sont effectuées à plusieurs jours d'intervalle. Pour tenir compte des dérives instrumentales d'une série de mesures à l'autre, il a été nécessaire de corriger l'émissivité apparente, par la relation :

$$\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}(f_i) = \frac{(\tilde{I}_n(f_i))_2}{(\tilde{I}_p(f_i))_2} \cdot \frac{(\tilde{I}_{ref}(f_i))_1}{(\tilde{I}_{ref}(f_i))_2} \quad (9)$$

Le terme $\frac{(\tilde{I}_p(f_i))_2}{(\tilde{I}_{ref}(f_i))_2}$ représente la fonction

d'amortissement complexe, permettant ainsi de corriger les dérives instrumentales. Les indices 1 et 2 correspondent aux séries de mesures effectuées à des périodes différentes.

III. DÉTERMINATION DE L'INDICE D'EXTINCTION

Pour un matériau de propriétés thermophysiques données, l'émissivité apparente complexe dépend *a priori* des valeurs d'indices de réfraction et d'extinction. La plupart des polymères ont un indice de réfraction compris entre 1,3 et 1,7 [3], nous avons donc considéré cette gamme pour la présente étude.

Dans le cas étudié ici (lame de PEHD de quelques millimètres d'épaisseur), l'indice de réfraction influe peu sur l'émissivité apparente, comme le montrent les figures 4a (modules) et 4b (phases), pour un échantillon de PEHD d'épaisseur 3 mm ($\chi_\lambda = 4,9 \times 10^{-4}$).

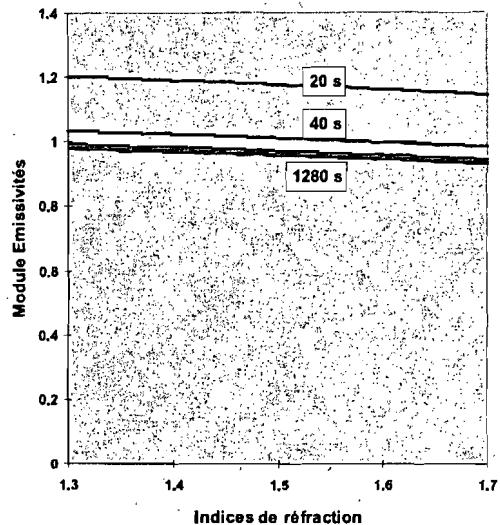


Fig. 4a : Influence de l'indice de réfraction sur le module de l'émissivité apparente complexe, pour plusieurs périodes de modulation (PEHD d'épaisseur 3 mm, $\chi_\lambda = 4,9 \times 10^{-4}$)

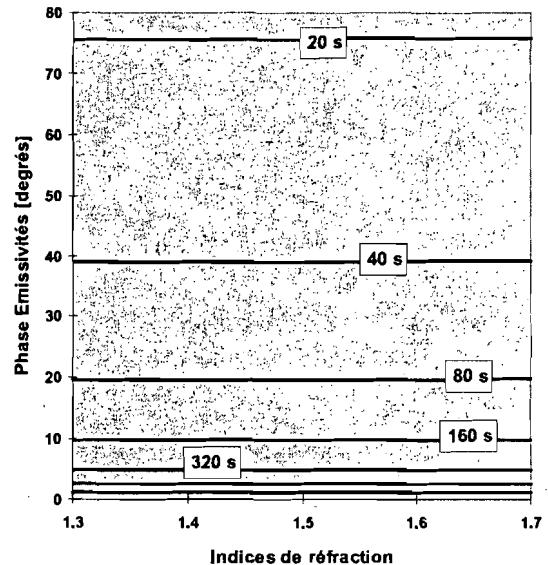


Fig. 4b : Influence de l'indice de réfraction sur la phase de l'émissivité apparente complexe, pour plusieurs périodes de modulation (PEHD d'épaisseur 3 mm, $\chi_\lambda = 4,9 \times 10^{-4}$)

Par contre, l'émissivité apparente du PEHD (en module et en phase) dépend fortement de l'indice d'extinction. Il est donc possible de mesurer l'indice d'extinction d'une lame semi-transparente à partir de son émissivité apparente complexe. Les figures 5a et 5b présentent, à titre d'exemple, le module et la phase de l'émissivité d'une lame semi-transparente de PEHD d'épaisseur 3 mm ($n_1 = 1,5$), en fonction de son indice d'extinction.

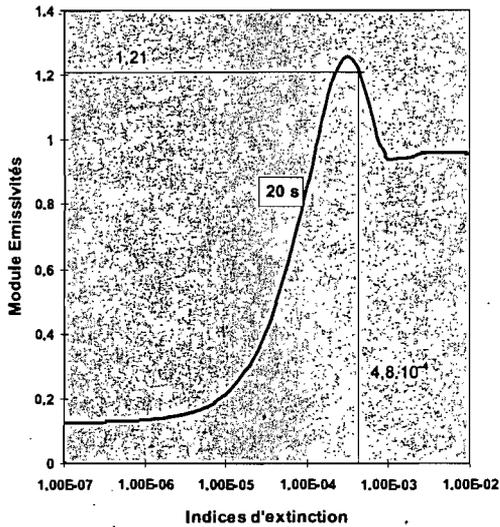


Fig. 5a : Détermination de l'indice d'extinction à partir du module de l'émissivité mesurée (PEHD 3 mm, $n_1 = 1,5$)

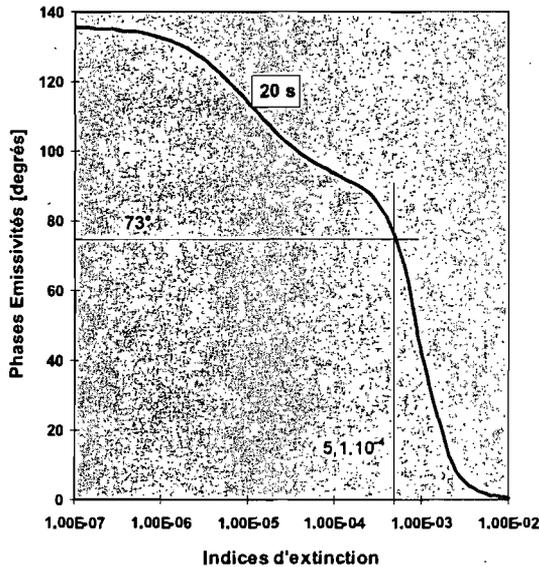


Fig. 5b : Détermination de l'indice d'extinction à partir de la phase de l'émissivité mesurée (PEHD 3 mm, $n_1 = 1,5$)

Ces courbes ont été calculées à l'aide du modèle décrit au paragraphe 1, pour une fréquence de modulation de 50 mHz (période de modulation de 20 secondes) et une épaisseur de PEHD de 3 mm. Les paramètres thermophysiques (diffusivité thermique α et nombre de Biot Bi) injectés dans le modèle sont ceux identifiés à partir de la fonction de transfert mesurée (équation 9), soit $\alpha = 0,25 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ et $Bi = 0,065$.

En utilisant les courbes d'émissivité, on peut déterminer l'indice d'extinction du matériau à partir

soit du module, soit de la phase. A titre d'exemple, le module de l'émissivité mesurée pour une fréquence de modulation de 50 mHz (période de 20 secondes) est (voir tableau 1) :

$$\|\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}\| = 1,21 \pm 0,05$$

Sa phase exprimée en degrés est :

$$\varphi(\tilde{\epsilon}_{\Delta\lambda}) = 73^\circ \pm 2^\circ.$$

La valeur correspondant à la phase mesurée de l'indice d'extinction est unique :

$$\chi_{\Delta\lambda} = 5,1 \cdot 10^{-4} \pm 0,4 \cdot 10^{-4}$$

Deux valeurs de $\chi_{\Delta\lambda}$ correspondent au module, mais une seule est compatible avec la courbe de phase, donnant :

$$\chi_{\Delta\lambda} = 4,8 \cdot 10^{-4} \pm 0,6 \cdot 10^{-4}.$$

Cette valeur est également en accord avec les mesures en transmission, soit :

$$\chi_{\Delta\lambda} = 4,9 \cdot 10^{-4} \pm 0,4 \cdot 10^{-4}.$$

On voit donc sur cet exemple qu'il est possible, à partir de la mesure de l'émissivité apparente complexe pour une fréquence de modulation donnée, de déterminer l'indice d'extinction d'une lame semi-transparente, et que la précision est comparable à celle des mesures en transmission.

Fréquence (mHz)	0,78	1,56	3,12	6,25	12,5	25	50
Modules émissivité	0,958	0,959	0,967	0,967	0,995	1,055	1,208
Précisions	$\pm 0,02$	$\pm 0,01$	$\pm 0,03$	$\pm 0,05$	$\pm 0,06$	$\pm 0,06$	$\pm 0,05$
Phases émissivité	1,29°	2,75°	5,22°	9,61°	19,83°	38,35°	73,35°
Précisions	$\pm 0,95^\circ$	$\pm 0,56^\circ$	$\pm 1,49^\circ$	$\pm 2,83^\circ$	$\pm 3,44^\circ$	$\pm 3,00^\circ$	$\pm 2,34^\circ$

Tableau 1 : Modules et phases des émissivités apparentes mesurées (PEHD 3 mm)

A partir de l'émissivité relative aux 6 autres fréquences de modulation, on obtient la même valeur d'indice d'extinction, aux incertitudes de mesures près (figures 6a et 6b). La précision sur l'indice d'extinction dépend fortement de la fréquence de modulation.

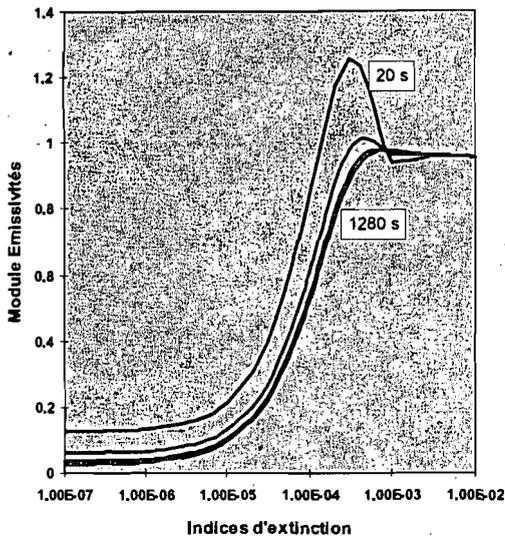


Fig.6a: Influence de l'indice d'extinction sur le module de l'émissivité apparente pour plusieurs périodes de modulation (PEHD 3 mm, $n_i = 1,5$)

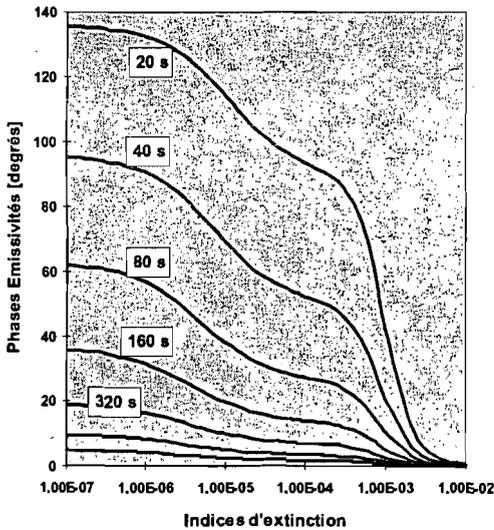


Fig.6b: Influence de l'indice d'extinction sur la phase de l'émissivité apparente pour plusieurs périodes (ou fréquences) de modulation (PEHD 3 mm, $n_i = 1,5$)

On note que le module de l'émissivité dépend fortement de l'indice d'extinction, quelle que soit la fréquence (période) de modulation. Cependant, pour les plus hautes fréquences : 25 et 50 mHz (soit les basses périodes : 20 et 40 secondes), l'indice d'extinction n'est pas une fonction unique de ce module. Par ailleurs, la zone de sensibilité de cet indice au module est limitée à la plage allant de 10^{-5} à 10^{-3} . Pour les indices d'extinction supérieurs à 10^{-3} , l'émissivité apparente complexe tend vers l'émissivité classique d'une surface opaque d'indice de réfraction 1,5 (module 0,96 et phase 0°).

Sur les courbes de phase, on note d'une part que l'indice d'extinction est toujours une fonction univoque de l'émissivité, et d'autre part que la sensibilité de

la phase à l'indice augmente avec la fréquence de modulation.

Les courbes des figures 7a et 7b permettent de préciser les domaines de sensibilité de l'émissivité à l'indice d'extinction.

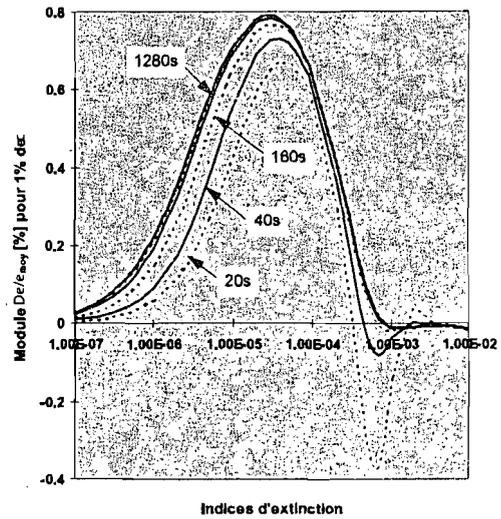


Fig.7a: Sensibilité de l'émissivité apparente complexe aux modules de l'indice d'extinction, pour plusieurs fréquences de modulation (PEHD 3mm, $n_i = 1,5$)

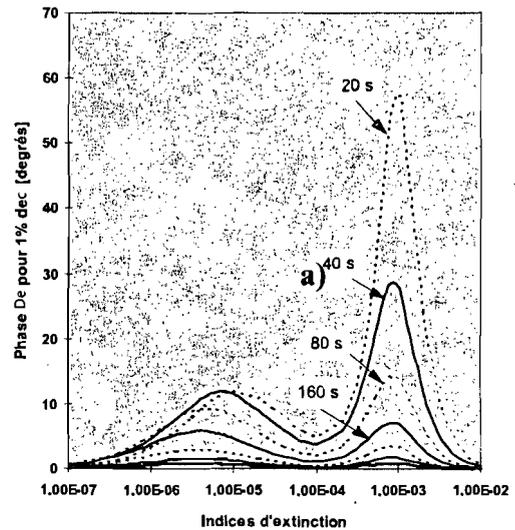


Fig.7b: Sensibilité de l'émissivité apparente complexe aux phases de l'indice d'extinction, pour plusieurs fréquences de modulation (PEHD 3mm, $n_i = 1,5$)

La précision que l'on peut atteindre sur l'indice d'extinction dépend en premier lieu de la précision des mesures d'émissivité. Si ces mesures sont soumises à un bruit de mesure, de puissance $P = 2 \cdot \sigma^2$, on montre [4] que les incertitudes sur le module et sur la phase de l'émissivité apparente sont liées. En notant ΔM et $\Delta \phi$ les incertitudes absolues au risque 0,05 du module et de la phase, on peut écrire :

$$\begin{cases} M = 2.\sigma \\ \Delta\varphi = \frac{2.\sigma}{M} = \frac{M}{M} \end{cases} \quad (10)$$

(Δ est exprimé en radians)

Par suite, les incertitudes relatives sur l'indice d'extinction, selon que l'on le détermine via le module ou via la phase de l'émissivité apparente, s'écrivent :

- via le module de l'émissivité :

$$\left(\frac{\Delta\chi}{\chi}\right)_M = \frac{M}{M} \cdot \frac{1}{S_M} \quad (11)$$

- via la phase de l'émissivité :

$$\left(\frac{\Delta\chi}{\chi}\right)_\varphi = \frac{M}{M} \cdot \frac{1}{S_\varphi} \cdot \frac{180}{100.\pi} \quad (12)$$

Le tableau 2 regroupe les valeurs des incertitudes relatives obtenues pour les 7 fréquences de modulation considérées et pour des indices d'extinction de 5.10^{-4} (indice du PEHD), 10^{-4} et 10^{-3} (indices entourant celui du PEHD). Les autres entrées du modèle correspondent à celles d'une lame de PEHD d'épaisseur 3 mm sur support d'or et à température ambiante [5]. Les incertitudes ont été calculées à partir des équations (11) et (12), sur la base d'une incertitude relative sur M , $\frac{\Delta M}{M}$, égale à 1% (les incertitudes relatives M expérimentales sont de quelques pour-cents).

Fréquences [mHz] (Périodes [s])	$\chi = 10^{-4}$		$\chi = 5.10^{-4}$	
	Module (%)	Phase (%)	Module (%)	Phase (%)
0,78 (1280)	1,54	57,00	9,10	57,30
1,56 (640)	1,54	57,00	9,10	28,60
3,12 (320)	1,54	57,00	10,00	19,10
6,25 (160)	1,54	57,00	10,00	9,55
12,50 (80)	1,56	28,70	12,50	5,21
25 (40)	1,61	14,30	-50,00	2,86
50 (20)	1,72	11,50	-3,60	1,91

Fréquences [mHz] (Périodes [s])	$\chi = 10^{-3}$	
	Module (%)	Phase (%)
0,78 (1280)	>100	57,30
1,56 (640)	>100	28,60
3,12 (320)	>100	19,10
6,25 (160)	>100	8,19
12,50 (80)	-50,00	4,10
25 (40)	-25,00	2,12
50 (20)	-6,25	0,99

Tableau 2 : Incertitudes relatives sur l'indice d'extinction pour 1% de variation du module de l'émissivité apparente (PEHD 3 mm)

On peut noter tout d'abord que seules les mesures à hautes fréquences, c'est-à-dire des périodes inférieures à 80 secondes, sont exploitables via la phase. Aux basses fréquences, les incertitudes deviennent prohibitives. On note également que le choix entre une exploitation du module de l'émissivité et une exploitation de sa phase dépend de la valeur de l'indice d'extinction. Ainsi, pour une fréquence de 50 mHz (période de 20 secondes) et pour une valeur d'indice d'extinction égale à 5.10^{-4} , l'incertitude relative obtenue sur cet indice est plus faible via la phase (1,9%) que via le module (3,6%). C'est le cas pour un matériau d'indice 10^{-3} : les incertitudes valent 1% (phase) et 6% (module). Par contre, pour un matériau d'indice 10^{-4} , c'est l'inverse: 11,5% (phase) contre 1,7% (module).

La présente étude a été menée à température ambiante, c'est-à-dire dans des conditions de température telles que les transferts thermiques radiatifs au sein de la lame semi-transparente peuvent être négligés devant les transferts thermiques conductifs. Pour des températures moyennes plus élevées, les transferts thermiques conductifs et radiatifs peuvent être du même ordre de grandeur [5], et sont alors couplés.

La première conséquence d'une élévation de la température moyenne est donc que le modèle de luminance monochromatique présenté au paragraphe 1 n'est plus adapté. Les mesures de luminance ne peuvent alors être identifiées qu'à un modèle couplé [6], ce qui ne présente toutefois pas de difficulté majeure.

La deuxième conséquence est que la température moyenne en face arrière de la lame, qui intervient dans son émissivité apparente complexe, n'est plus mesurable. Lorsque les transferts thermiques sont purement conductifs, cette température est la même pour l'échantillon nu et pour celui recouvert d'un revêtement opaque. Elle peut donc être obtenue par une simple mesure de luminance sur l'échantillon opacifié, ce qui a été fait au paragraphe 2. En revanche, lorsque le rayonnement intervient de façon significative, la fonction de transfert thermique de la lame dépend des conditions aux limites radiatives en face arrière. Comme on ne connaît pas *a priori* les propriétés radiatives du matériau, la température en face arrière de la lame nue ne peut être déduite directement de celle de la lame opacifiée. L'émissivité apparente complexe rapportée à la face arrière n'est donc pas mesurable, mais celle ramenée à la face avant reste accessible. On l'obtient par le rapport de luminances réduites de la lame nue et d'une surface de référence thermiquement mince, opaque et d'émissivité connue.

Si l'on est dans une situation où l'hypothèse de milieu gris est acceptable, cette émissivité, mesurée en rayonnement monochromatique ou en rayonnement total pour différentes fréquences de modulation, peut être comparée à un modèle de luminance couplé. Les paramètres identifiés sont alors la diffusivité thermique, le nombre de Biot relatif aux pertes convectives et le coefficient d'extinction «gris» du matériau.

Enfin, si le matériau étudié n'est pas gris, ses propriétés thermophysiques ne peuvent pas être déduites d'une simple mesure multifréquentielle d'émissivité monochromatique ou totale. En revanche, elles doivent pouvoir être déduites de mesures d'émissivité spectrales, par identification à un modèle couplé de luminance spectrale. Compte tenu des faibles fréquences de modulation thermique mises en jeu, ces mesures sont sans doute réalisables à l'aide d'un spectromètre à transformée de Fourier.

CONCLUSIONS

Les résultats présentés dans cette étude montrent qu'il est possible, via le module ou bien via la phase, de déterminer l'indice d'extinction d'une lame semi-transparente à partir de mesures de luminance en

régime modulé. Cependant, la sensibilité de la méthode dépend d'un grand nombre de paramètres, qui sont liés d'une part au matériau étudié (diffusivité thermique, épaisseur, indices), et d'autre part aux conditions expérimentales (nature du support, fréquences et amplitudes de modulation, température moyenne). La radiométrie périodique ne peut donc être un outil de détermination d'indice d'extinction que si elle est précédée d'une étude de sensibilité menée au cas par cas.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **N'GUESSAN Y. et AII.** *Validation expérimentale d'un modèle de luminance non couplé sur des échantillons de polyéthylène haute densité (PEHD) soumis à une excitation périodique de température au voisinage de l'ambiance.* Revue CAMES, série A, Sciences et Médecine, Vol. 03, 2005.
2. **N'GUESSAN Y., MATTEI S., ESPECEL D., GEHIN E.** *Vers une caractérisation radiative des matériaux semi-transparents à la température ambiante.* Colloque interuniversitaire Franco-Québécois, TOULOUSE, pp. 227-232, 14-16 Juin 1993.
3. **GEHIN E.** *Etude des propriétés d'émission de couches planes semi-transparentes dans l'infrarouge.* Thèse de Doctorat de l'Université Paris VI, Octobre 1991.
4. **SEFERIS J. C.** *Refractive Indices of Polymers.* Univ. Of Washington, Depart. Of Chemic. Ingen., pp. VI/451 - VI/461.
5. **N'GUESSAN Y.** *Contribution à l'étude des propriétés radiatives des matériaux opaques ou semi-transparents, à température ambiante, par une méthode radiométrique en régime modulé.* (Annexe 1) Thèse de Doctorat. Univ. Paris XII - Val de Marne. 1996.
6. **KUNC T.** *Etude du transfert couplé conduction - rayonnement. Application à la détermination de la conductivité phonique des verres à hautes températures par identification paramétrique.* Univ. De Poitiers. 1984.