

# MESURE DES PROPRIETES RADIATIVES INFRAROUGES DE LIQUIDES SEMI-TRANSPARENTS . CALCUL DU FACTEUR D'ABSORPTION ENERGETIQUE

J. Hameury, V. Scoarnec, B. Hay, J.-R. Filtz  
Laboratoire National de Métrologie et d'Essais (LNE)  
Division Métrologie Thermique et Optique  
29 Avenue Roger Hennequin  
78197 Trappes Cedex

## Résumé

Le LNE a développé une méthode de mesure des propriétés radiatives infrarouges de liquides volatiles. Le paramètre recherché est le facteur d'absorption du liquide pour un rayonnement produit par une source thermique (20 °C à 1200 °C). Le LNE disposait déjà d'un réflectomètre (réflexion directionnelle hémisphérique spectrale) et d'un spectromètre IRTF (transmission spectrale). Une cellule étanche avec des hublots a été construite et utilisée lors des mesures pour contenir le liquide. Des modèles optiques ont été établis pour calculer les caractéristiques radiatives propres du liquide à partir des paramètres mesurés (réflexion et transmission) avec la présence des hublots. Des mesures ont été réalisées sur de l'eau et de l'éthanol. Les résultats pour l'eau ont été validés par des comparaisons à des données publiées.

## Abstract

LNE developed a method to measure the infrared radiative properties of volatile liquids. The required parameter is the absorption of the liquid for a radiation produced by a thermal source (20 °C to 1200 °C). A reflectometer (measurement of the spectral hemispherical directional reflection) and an IRTF spectrometer (measurement of the spectral transmission) were already used by LNE to characterize solid materials. A tight cell, with two windows, was used to contain the liquid during the measurements. Optical models were established to calculate the radiative properties of the liquid from the parameters (reflection and transmission) measured with the presence of the windows. Measurements were performed on pure water and ethanol. The results for water were validated by comparison to published data.

## 1. Introduction

Le LNE réalise couramment des mesures des propriétés radiatives infrarouges (facteurs de réflexion, facteurs de

transmission, émissivités) de matériaux solides. Des besoins en caractérisation radiative de matériaux liquides sont apparus récemment, notamment pour la modélisation d'incendies d'installations industrielles. Certains liquides à caractériser étant très volatiles (éthanol, solvants), le LNE a dû adapter ses méthodes de mesure. Pendant les mesures, le liquide est confiné dans une cellule étanche entre deux hublots semi-transparentes. La présence des hublots ne permet pas la mesure directe des caractéristiques radiatives du liquide. Des modèles de calcul ont donc été établis pour calculer les caractéristiques spectrales des liquides à partir des paramètres mesurés (réflexion quasi-normale hémisphérique spectrale et transmission régulière spectrale) sur la cellule remplie de liquide.

## 2. Moyens et configurations de mesure

### 2.1. Cellule étanche

La figure 1 présente schématiquement la cellule étanche. La cellule est constituée d'un corps, de deux brides et de deux fenêtres. Deux corps ont été réalisés afin de générer différentes épaisseurs de liquide. Des mesures peuvent également être faites en utilisant un joint placé entre les fenêtres pour avoir une faible épaisseur de liquide. Les épaisseurs de liquides qui ont été caractérisées sont 1,3 mm, 7,0 mm et 21,0 mm.

Les fenêtres utilisées sont en fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) d'épaisseur 2,0 mm et en séléniure de zinc ( $\text{ZnSe}$ ) d'épaisseur 3,0 mm. Les courbes de transmission régulière spectrale et de réflexion quasi-normale spectrale des fenêtres sont présentées sur la figure 2.

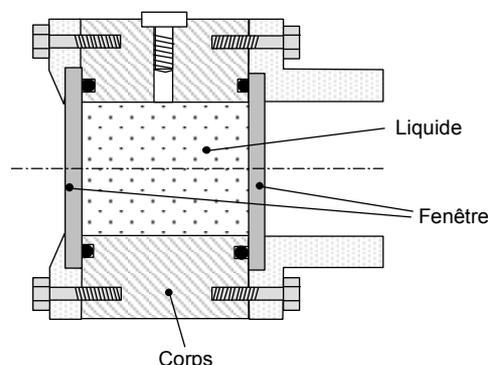


Figure 1 : Schéma de la cellule étanche

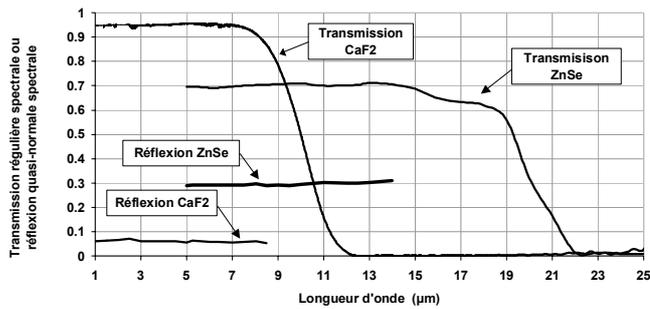


Figure 2 : Facteur de transmission spectral et facteur de réflexion spectral des fenêtres.

Les fenêtres ne sont pas traitées anti-reflets afin de simplifier l'établissement des modèles optiques. La présence de traitements de surface interférentiels compliquerait fortement ces modèles. Le  $\text{CaF}_2$  a une transmission relativement élevée et un facteur d'absorption pouvant être supposé nul pour les longueurs d'onde inférieures à  $7,5 \mu\text{m}$ . Le  $\text{ZnSe}$  a un facteur de transmission spectral relativement faible et un facteur de réflexion spectral relativement élevé, cela est dû à l'indice de réfraction élevé du matériau (de l'ordre de 2,44). Le  $\text{ZnSe}$  est cependant non absorbant ou très peu absorbant pour les longueurs d'onde inférieures à  $15 \mu\text{m}$ . Les valeurs spectrales des indices de réfraction du  $\text{CaF}_2$  et du  $\text{ZnSe}$  ont été trouvées dans les références bibliographiques [1], [2] et [3].

## 2.2. Paramètres et moyens de mesure utilisés

Les paramètres qui ont été mesurés sont le facteur de réflexion quasi-normal hémisphérique spectral et le facteur de transmission régulier spectral.

Le facteur de réflexion quasi-normal hémisphérique spectral a été mesuré en utilisant une installation conçue et mise au point au LNE. Le principe de mesure et les caractéristiques métrologiques de l'installation sont présentées dans la référence [4].

Le facteur de transmission spectral régulier a été mesuré en utilisant un spectromètre à transformée de Fourier ("FTIR") modèle EQUINOX 55 de marque Bruker.

## 2.3. Conditions de mesure

Le facteur de réflexion directionnel hémisphérique spectral a été mesuré pour la direction d'incidence définie par l'angle  $12^\circ$  par rapport à la normale à la surface de l'éprouvette. Lors des mesures, le faisceau incident était focalisé sur la face externe de la fenêtre. Des mesures ont été réalisées d'une part dans la bande spectrale  $0,7$  à  $7,5 \mu\text{m}$  en utilisant les fenêtres en  $\text{CaF}_2$  et d'autre part dans la bande spectrale  $5$  à  $14 \mu\text{m}$  en utilisant les fenêtres en  $\text{ZnSe}$ . Les longueurs d'onde ont été sélectionnées au moyen d'un monochromateur à réseau pour les longueurs d'onde comprises entre  $0,7 \mu\text{m}$  et  $2,5 \mu\text{m}$  et au moyen de filtres interférentiels pour les longueurs d'onde supérieures à  $2,5 \mu\text{m}$ . Les facteurs de réflexion ont été mesurés pour une épaisseur de liquide égale à  $21 \text{ mm}$ . Cette configuration permet, dans les bandes spectrales de transparence du produit, de ne pas prendre en compte la réflexion sur la

fenêtre située en face arrière. En effet, le faisceau réfléchi spéculairement sur la deuxième fenêtre revient en dehors du champ de mesure du réflectomètre en raison du décalage dû à l'angle d'incidence et à la distance entre les fenêtres.

Les facteurs de transmission régulière spectrale ont été mesurés pour la direction normale (perpendiculaire) aux fenêtres. Les fenêtres en  $\text{CaF}_2$  ont été utilisées pour la bande spectrale  $1$  à  $7,5 \mu\text{m}$  et les fenêtres en  $\text{ZnSe}$  ont été utilisées pour la bande spectrale  $5$  à  $22 \mu\text{m}$ . Les mesures ont été réalisées pour les 3 épaisseurs ( $1,3 \text{ mm}$ ,  $7,0 \text{ mm}$  et  $21,0 \text{ mm}$ ) possibles de liquide.

## 3. Résultats expérimentaux

Des mesures ont été réalisées sur de l'eau pure et sur de l'éthanol pur. Bien que n'étant pas un liquide très volatil, l'eau a été choisie en raison de la disponibilité de données numériques dans la bibliographie (réflexion spectrale, indice de réfraction spectral, coefficient d'absorption spectral, émissivité spectrale).

Les figures 3 et 4 présentent les courbes des transmissions spectrales mesurées aux courtes longueurs d'onde. Pour les grandes longueurs d'onde les transmissions spectrales obtenues sont équivalentes à la transmission minimum détectable par le spectromètre.

La figure 5 présente les courbes de réflexion quasi-normale hémisphérique spectrale mesurée sur l'eau. Les niveaux de réflexion obtenus dépendent surtout du niveau de réflexion des fenêtres utilisées.

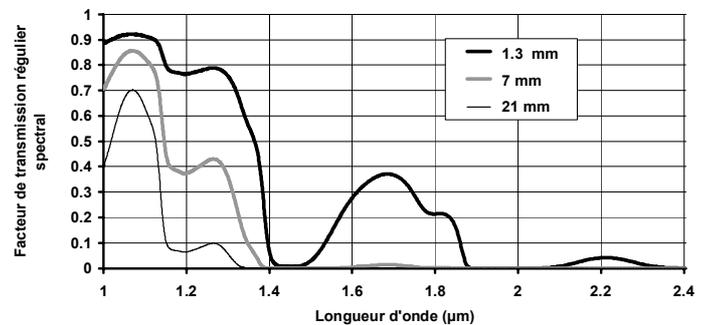


Figure 3 : Transmission spectrale mesurée sur l'eau avec fenêtres en  $\text{CaF}_2$ .

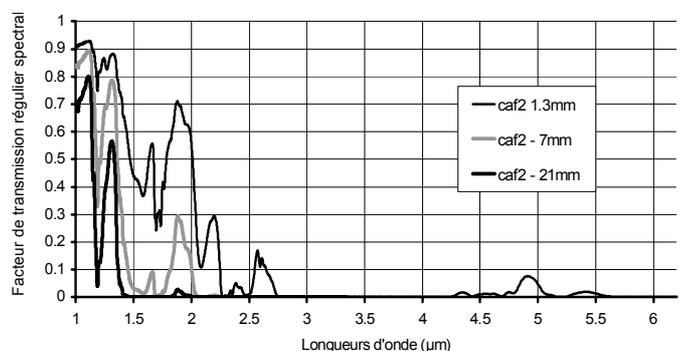


Figure 4 : Transmission spectrale mesurée sur l'éthanol avec fenêtres en  $\text{CaF}_2$ .

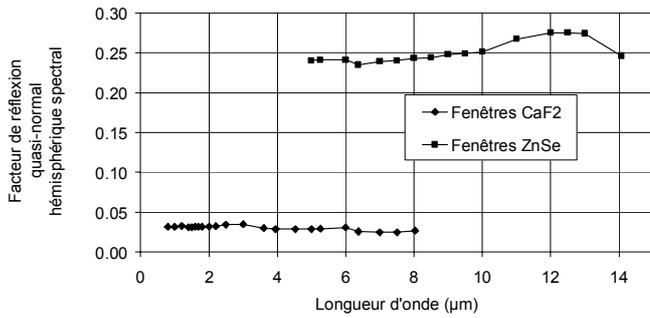


Figure 5 : Facteur de réflexion quasi-normal hémisphérique spectral mesuré sur la cellule remplie d'eau.

## 4. Calcul des caractéristiques du liquide

Les facteurs de réflexion et de transmission ont été mesurés avec les fenêtres. Même si les facteurs d'absorption des fenêtres sont faibles, les valeurs mesurées dépendent fortement des indices de réfraction des fenêtres et sont différentes de celles qui seraient mesurées sur une surface libre du produit placé dans l'air. Des modèles de calcul ont donc été établis pour déduire des résultats des mesures (avec fenêtres) les caractéristiques radiatives propres du liquide.

### 4.1. Calcul du coefficient d'absorption spectral

Le facteur de transmission spectrale interne d'une épaisseur d'un matériau non diffusant est donné par la relation

$$\tau_{int} = e^{-\kappa_{\lambda} * ep} \quad (1)$$

avec  $\kappa_{\lambda}$  le coefficient d'absorption spectral et  $ep$  l'épaisseur de liquide. Ce facteur de transmission interne représente la proportion de rayonnement transmise à travers une couche homogène de produit, d'une certaine épaisseur, sans traversée d'un dioptre (d'une interface) liquide/autre milieu.

Le facteur de transmission spectrale du liquide dans la cellule a été mesuré pour des épaisseurs différentes de liquide (voir figures 3 et 4) et en utilisant les mêmes fenêtres pour toutes les épaisseurs de liquide. Le rapport entre les transmissions spectrales obtenues pour deux épaisseurs différentes est

$$\frac{\tau_{int}(ep_1)}{\tau_{int}(ep_2)} = e^{-\kappa_{\lambda} * (ep_1 - ep_2)} \quad (2)$$

d'où la relation donnant le coefficient d'absorption

$$\kappa_{\lambda} = \frac{1}{(ep_2 - ep_1)} \cdot \ln\left(\frac{\tau_{int}(ep_1)}{\tau_{int}(ep_2)}\right) \quad (3)$$

Cependant cette relation ne donne une valeur correcte que si la valeur du rapport des transmissions mesurées pour les deux épaisseurs est juste. Quand le liquide est très absorbant, la valeur de la transmission spectrale mesurée dépend surtout du bruit de détection du spectromètre. L'erreur relative sur le rapport des transmissions est alors grande ce qui conduit à une valeur du coefficient d'absorption incorrecte. Le coefficient d'absorption calculé en utilisant la relation (3) est sous évalué dans le cas d'un

liquide très absorbant. Dans le cas d'une absorption élevée, dans notre cas lorsque la transmission spectrale est "nulle" pour l'épaisseur 7 mm, nous avons choisi de calculer le coefficient d'absorption en utilisant uniquement la valeur du facteur de transmission spectral mesuré pour l'épaisseur de liquide la plus petite (1,3 mm). Le coefficient d'absorption est alors calculé en utilisant la relation suivante :

$$\kappa_{\lambda} = \frac{-1}{ep} \cdot \ln\left(\frac{\tau_{mesuré}}{(1 - \rho_{dioptr\ air / fen\etre})^2}\right) \quad (4)$$

avec  $\kappa_{\lambda}$  le coefficient d'absorption,  $ep$  l'épaisseur de liquide (ici 1,3 mm),  $\tau_{mesuré}$  la valeur de la transmission spectrale mesurée et  $\rho_{dioptr\ air / fen\etre}$  le facteur de réflexion spectral du dioptre air/fenêtre. Le facteur de réflexion spectral du dioptre air/fenêtre est calculé à partir des indices de réfraction spectrale de la fenêtre trouvés dans [1], [2] et [3]. Ce modèle de calcul (eq. 4) est un modèle simplifié qui ne prend pas en compte les réflexions multiples entre les dioptres. Les deux modèles de calcul du coefficient d'absorption ont été comparés dans des bandes spectrales où l'absorption du liquide n'est pas trop importante. La figure 6 présente un exemple de comparaison des résultats obtenus pour de l'eau. Des valeurs trouvées dans la référence [1] sont également représentées.

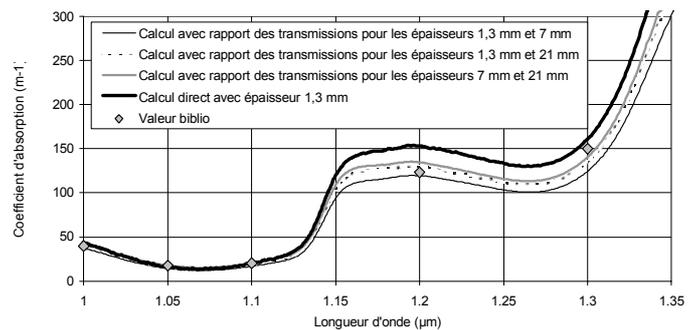


Figure 6 : Comparaison des deux modèles de calcul du coefficient d'absorption de l'eau.

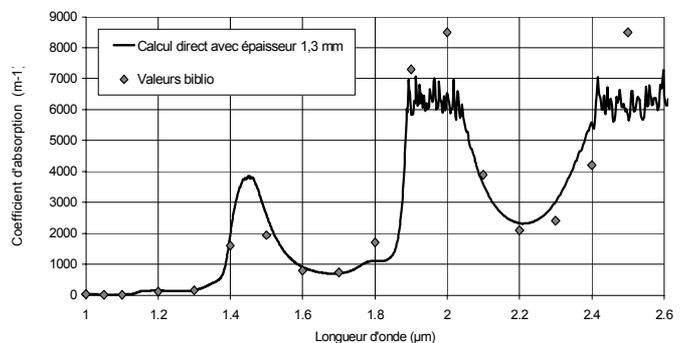


Figure 7 : Comparaison des résultats du modèle "simplifié" à des données bibliographiques.

Dans les bandes spectrales de transparence du liquide, les deux modèles de calcul donnent les mêmes ordres de grandeurs. Le modèle "simplifié", qui utilise la valeur de

transmission mesurée pour une seule épaisseur de liquide, a plutôt tendance à donner des valeurs de coefficients d'absorption plus élevées que le modèle utilisant un rapport de transmission pour deux épaisseurs différentes (Fig. 6). Il faut noter que le modèle "simplifié" (éq. 4) ne prend pas en compte les réflexions multiples entre les dioptrés. Or ces réflexions multiples ne sont pas négligeables dans les bandes d'absorption faible du liquide qui sont les seules bandes spectrales pour lesquelles les deux modèles peuvent être comparés. Dans les bandes spectrales de forte absorption, le modèle simplifié donne de bons ordres de grandeurs du coefficient d'absorption. Cela est démontré par la figure 7 qui présente des comparaisons entre des coefficients d'absorption calculés avec le modèle simplifié et des coefficients trouvés dans la référence [1]. Quand le liquide est très absorbant, le facteur de transmission mesuré correspond surtout aux bruits de mesure du spectromètre. La transmission mesurée est alors la transmission spectrale minimum détectable et est supérieure à la transmission spectrale réelle. On obtient donc un coefficient d'absorption inférieur au coefficient réel (Fig. 7). En fait quand le liquide est très absorbant, on constate par la mesure que le liquide est opaque pour l'épaisseur utilisée mais on ne peut pas affirmer qu'il est opaque pour une épaisseur beaucoup plus petite.

## 4.2. Calcul de l'indice de réfraction spectral

L'indice de réfraction du liquide est calculé en utilisant la procédure suivante :

- mesure du facteur de réflexion quasi-normal spectral pour la plus grande épaisseur de liquide (21 mm),
- calcul du facteur de réflexion du dioptre fenêtre/liquide en utilisant la relation 5,
- calcul de l'indice de réfraction du liquide à partir du facteur de réflexion du dioptre fenêtre/liquide en utilisant la relation 7.

Cette procédure, basée sur des mesures de réflexion spectrales pour une grande épaisseur de liquide, évite d'avoir à prendre en compte les réflexions sur la deuxième fenêtre. Si le liquide est transparent les réflexions sur la deuxième fenêtre ne sont pas prises en compte par le réflectomètre. Le facteur de réflexion du dioptre fenêtre/liquide est calculé en utilisant la relation

$$\rho_{d \text{ liq/fen}} = \frac{(\rho_{mes} - \rho_{d \text{ a/f}})}{(1 - \rho_{d \text{ a/f}})^2 + (\rho_{mes} - \rho_{d \text{ a/f}}) * \rho_{d \text{ a/f}}} \quad (5)$$

avec  $\rho_{mes}$  le facteur de réflexion quasi-normal spectral mesuré,  $\rho_{d \text{ a/f}}$  le facteur de réflexion spectral du dioptre air/fenêtre.

Le facteur de réflexion spectral du dioptre air/fenêtre est calculé en utilisant la relation de Fresnel

$$\rho_{d \text{ a/f}} = \frac{(n_{fenêtre} - 1)^2}{(n_{fenêtre} + 1)^2} \quad (6)$$

avec  $n_{fenêtre}$  l'indice de réfraction du matériau constituant la fenêtre.

L'indice de réfraction du liquide est calculé en utilisant la

$$n_{liquide} = \frac{n_{fenêtre} \cdot (1 - \sqrt{\rho_{d \text{ liq/fen}}})}{(1 + \sqrt{\rho_{d \text{ liq/fen}}})} \quad (7)$$

Les valeurs d'indice de réfraction, obtenues pour l'eau pure et l'éthanol pur, sont présentées graphiquement sur les figures 8 et 9. Pour l'eau, des données trouvées dans la bibliographie [1] sont également représentées.

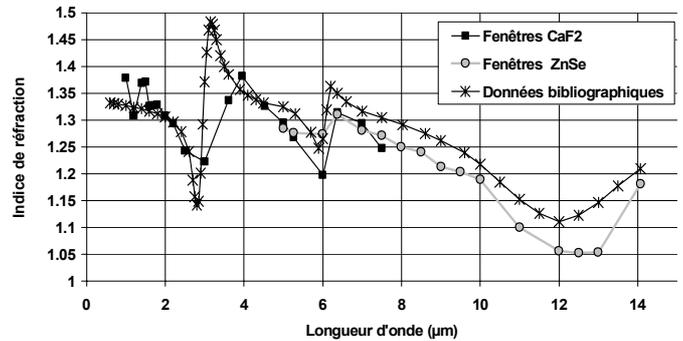


Figure 8 : Indice de réfraction obtenu pour l'eau.

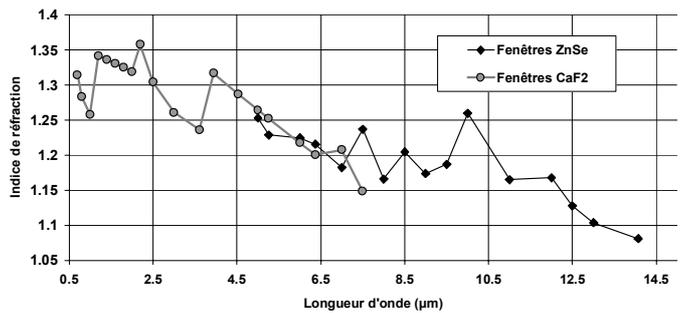


Figure 9 : Indice de réfraction obtenu pour l'éthanol.

Pour l'eau pure (Fig. 8), les écarts relatifs maximums entre les indices de réfraction trouvés dans la bibliographie et les indices obtenus par mesure sont de l'ordre de 8 %. La largeur spectrale d'analyse relativement grande de notre réflectomètre ne permet pas de détecter les variations spectrales importantes de l'indice de réfraction aux voisinages de 3  $\mu\text{m}$  et de 6  $\mu\text{m}$ . La courbe indice de réfraction en fonction de la longueur d'onde que nous obtenons est "lissée" par la largeur spectrale d'analyse.

## 4.3. Calcul du facteur d'absorption énergétique d'une lame de liquide

L'objectif final est de calculer le facteur d'absorption énergétique d'une lame du liquide exposé à un rayonnement d'origine thermique (par exemple une situation d'incendie). L'éclairement est supposé diffus et généré par une source thermique de type "corps gris". Le liquide est supposé être contenu dans un récipient horizontal et présenter une surface libre grande par rapport à la hauteur du récipient, les effets de masquage dus aux bords du récipient sont donc négligés. Le fond du récipient est supposé très absorbant et les réflexions sur le dioptre liquide/fond du récipient sont supposées nulles. De plus le liquide est supposé isotherme.

Le facteur d'absorption normal spectral de la lame de liquide est donné par la relation :

$$\alpha_{\lambda \text{ lame liq}}^{\perp} = \left(1 - \rho_{\lambda \text{ dioptre air / liquide}}^{\perp}\right) \cdot \left(1 - \tau_{\lambda \text{ int. liquide}}^{\perp}\right) \quad (8)$$

où  $\rho_{\lambda \text{ dioptre air / liquide}}^{\perp}$  est le facteur de réflexion normal spectral du dioptre air/liquide et  $\tau_{\lambda \text{ int. liquide}}^{\perp}$  est le facteur de transmission normal spectral interne de la lame de liquide.  $\rho_{\lambda \text{ dioptre air / liquide}}^{\perp}$  est calculé en utilisant la relation (6) mais en remplaçant  $n_{\text{fenêtre}}$  par l'indice de réfraction spectral du liquide.  $\tau_{\lambda \text{ int. liquide}}^{\perp}$  est calculé en utilisant la relation (1).

Le facteur d'absorption normal total (toutes les longueurs d'onde) de la lame de liquide est calculé en prenant en compte la distribution spectrale du rayonnement incident. Ce facteur est calculé en utilisant la relation suivante :

$$\alpha_{\text{tot lame liq}}^{\perp} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \alpha_{\lambda \text{ lame liq}}^{\perp} \cdot \ell_{\lambda}^{\circ}(T_{\text{source}}) \cdot d\lambda \quad (9)$$

où  $\alpha_{\lambda \text{ lame liq}}^{\perp}$  est le facteur d'absorption normale spectrale de la lame de liquide,  $\ell_{\lambda}^{\circ}(T_{\text{source}})$  est la luminance spectrique d'un corps noir à la longueur d'onde  $\lambda$  et à la température  $T_{\text{source}}$ ,  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont les bornes de la bande spectrale de calcul.

Notre moyen de mesure de la réflexion quasi-normale hémisphérique spectrale ne permet pas les mesures pour les longueurs d'onde supérieures à 14  $\mu\text{m}$  alors que les mesures de la transmission spectrale sont faites jusqu'à 22  $\mu\text{m}$ . Le facteur d'absorption normal total est donc calculé en supposant que le facteur de réflexion normal spectral du dioptre air/liquide est constant entre 14  $\mu\text{m}$  et 22  $\mu\text{m}$ . Cette hypothèse est faite afin de prendre en compte une proportion significative du rayonnement émis par un corps gris à basse température (plus de 75 % du rayonnement est ainsi pris en compte pour la température 100 °C).

Lorsque le liquide est en situation d'exposition à un incendie, le rayonnement incident est supposé provenir de toutes les directions avec une luminance constante quelle que soit la direction. La référence [5] donne la valeur du rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité normale d'un matériau en fonction de l'émissivité normale. Dans notre cas, la luminance incidente ne dépend pas de la direction, le rapport entre le facteur d'absorption total hémisphérique et le facteur d'absorption total normal est donc égal au rapport des émissivités donné dans [5].

Le facteur d'absorption total hémisphérique de la lame de liquide est donc donné par la relation

$$\alpha_{\text{tot lame liq}}^{\circ} = \alpha_{\text{tot lame liq}}^{\perp} \cdot \frac{\epsilon_{\text{hem}}}{\epsilon_{\text{norm}}} \quad (10)$$

avec  $\alpha_{\text{tot lame liq}}^{\perp}$  le facteur d'absorption normal total et

$\frac{\epsilon_{\text{hem}}}{\epsilon_{\text{norm}}}$  le rapport entre l'émissivité hémisphérique et l'émissivité normale donné par [5]. Pour un facteur

d'absorption normal total supérieur à 0.7 le rapport

$$\frac{\alpha_{\text{tot lame liq}}^{\circ}}{\alpha_{\text{tot lame liq}}^{\perp}} \text{ est égal à } 0.95 \pm 0.02.$$

Les tableaux 1 et 2 donnent les valeurs des facteurs d'absorption totale hémisphérique obtenus pour l'eau pure et l'éthanol.

Eau pure		
Température de la source de rayonnement (°C)	Facteur d'absorption totale hémisphérique	
	Epaisseur = 1 mm	Epaisseur = 5 mm
100	0.939	0.941
200	0.937	0.939
300	0.935	0.938
400	0.933	0.937
500	0.929	0.936
600	0.923	0.934
700	0.913	0.932
800	0.901	0.929
900	0.885	0.923
1000	0.868	0.917
1100	0.848	0.908
1200	0.827	0.898

Tableau 1 : Facteur d'absorption totale hémisphérique de l'eau pure.

Ethanol		
Température de la source de rayonnement (°C)	Facteur d'absorption totale hémisphérique	
	Epaisseur = 1 mm	Epaisseur = 5 mm
100	0.942	0.943
200	0.941	0.941
300	0.937	0.940
400	0.929	0.938
500	0.916	0.934
600	0.897	0.929
700	0.872	0.921
800	0.843	0.911
900	0.812	0.898
1000	0.778	0.883
1100	0.744	0.867
1200	0.711	0.849

Tableau 2 : Facteur d'absorption totale hémisphérique de l'éthanol pur.

Les facteurs d'absorption totale hémisphérique de l'eau et de l'éthanol diminuent quand la température augmente à cause de la transparence des deux liquides pour les courtes longueurs d'onde. Ce sont des liquides très absorbants pour un rayonnement produit par une source thermique à moins de 1200 °C.

## **10. Conclusions**

Une méthode de mesure des propriétés radiatives infrarouges de liquides volatiles a été mise au point. Les mesures réalisées sur le liquide placé dans une cellule étanche sont des mesures de la réflexion quasi-normale hémisphérique spectrale et des mesures de la transmission régulière spectrale. Les modèles de calcul de l'indice de réfraction et du coefficient d'absorption du liquide à partir des paramètres mesurés ont été établis. La méthode de mesure a été validée, pour de l'eau, par comparaison des indices de réfraction spectrale et des coefficients d'absorption spectrale obtenus expérimentalement à des données publiées. Les incertitudes élargies ( $k = 2$ ) sur les facteurs d'absorption totale hémisphérique (énergétique) obtenus pour l'eau et l'éthanol sont évaluées à  $\pm 0,07$ .

La méthode peut être appliquée sur tout type de liquide à température ambiante. Le liquide peut être semi-transparent ou opaque, il suffit qu'il soit compatible avec les matériaux de la cellule.

La justesse de la détermination du coefficient d'absorption spectral dans les bandes de forte absorption pourrait être améliorée en construisant une cellule à réglage continu de l'épaisseur de liquide jusqu'à une petite épaisseur, de l'ordre de 0,1 mm.

La méthode de détermination de l'indice de réfraction utilisée ici (à partir de mesures de facteurs de réflexion) a des performances limitées à causes des incertitudes sur les mesures de la réflexion spectrale. Des méthodes géométriques, de type mesure de la déviation d'un faisceau, sont bien plus performantes en terme d'incertitude sur l'indice de réfraction dans le domaine visible. L'application

de ce type de technique dans le domaine infrarouge ne pourrait se faire que dans les bandes de transparence du liquide. De telles techniques ne sont toutefois pas couramment disponibles pour l'infrarouge.

## **Références**

- [1] W.L. Wolfe et G. J. Zissis, The Infrared Handbook. Washington : Office of Naval Research, Department of the Navy, 1978, p. 3-110 et 7-51.
- [2] G. Gaussorgues, La Thermographie Infrarouge, Paris : Technique et Documentation Lavoisier, 1989, p. 138 et 146.
- [3] The Book of Photon Tools, Stratford CT USA : ORIEL Instruments, p. 15-7.
- [4] J. Hameury, B. Hay, J.R. Filtz, "Measurement of Infrared spectral directional hemispherical reflectance and emissivity at BNM-LNE", dans International Journal of Thermophysics, Vol. 26, Num. 6, pp. 1973–1983, Nov. 2005.
- [5] M. Rubin, D. Arateh , J. Hartman, "A correlation between normal and hemispherical emissivity of low-emissivity coating on glass", dans Int. Comm. Heat Mass Transfer, Vol. 14, 1987, pp. 561-565.