

Mesure transitoire et sans contact de champ de température par thermotransmittance dans des milieux semi-transparentes à l'infrarouge

Contactless and transient temperature fields measurements in infrared semi-transparent materials by thermotransmittance

Coline BOURGES^{1*}, Stéphane CHEVALIER¹, Alain SOMMIER¹, Christophe PRADERE¹

¹ I2M UMR 5295, Arts et Métiers Institut de Technologie, CNRS, Université de Bordeaux. Esplanade des Arts et Métiers, 33400 Talence, France.

*(auteur correspondant : coline.bourges@u-bordeaux.fr)

Résumé - Disposer de mesures de champs de température absolue en régime transitoire est un véritable enjeu pour la compréhension des phénomènes thermiques dans de nombreux domaines. Pour des milieux semi-transparentes à l'infrarouge, comme les milieux vivants, les méthodes actuelles ne sont pas toujours adaptées. Cette étude propose d'utiliser la thermo-dépendance de la transmission optique des matériaux pour répondre à ce besoin. La méthode de calibration du coefficient de thermotransmittance ainsi que le calcul de champs de température absolue en régime transitoire sont présentés dans ce travail.

Mots-clés : Thermotransmittance ; Infrarouge ; Semi-transparent ; Température absolue ; Transitoire.

Abstract - The transient and absolute temperature field measurement is a challenge for the understanding of thermal phenomena in many research domains. Regarding infrared semi-transparent materials, as living environments, usual methods are not well-adapted. To solve this issue, this study presents the development of a new method based on the materials thermal dependent transmittance. This work presents the calibration of the thermotransmittance coefficient and its use for the measurement of transient and absolute temperature fields.

Keywords: Thermotransmittance; Infrared; Semi-transparent; Absolute temperature; Transient.

Nomenclature

A	absorbance	t	temps, s
T	température, K		
T_a	température ambiante, K		
I	signal transmis, DL		
I_0	signal incident, DL		
x, y	coordonnées de l'image, m		
e	épaisseur, m		
			<i>Symboles grecs</i>
		Γ	transmittance
		λ	longueur d'onde, μm
		τ	coefficient de thermotransmittance, $\text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$

1. Introduction

La compréhension des propriétés thermiques de matériaux est un enjeu dans de nombreux domaines, y compris en biologie pour étudier des réactions chimiques dans les milieux vivants. De nombreuses méthodes d'analyse existent comme la thermographie infrarouge [1], la spectroscopie Raman [2] ou la thermoreflectance [3]. Cependant, elles ne s'appliquent pas toutes à

des échantillons semi-transparents à l'infrarouge, comme les milieux vivants, pour lesquels une caractérisation en réflexion n'est pas adaptée.

Pour ces matériaux, l'émissivité ne peut être calculée par les méthodes usuelles [4], ce qui rend difficile l'utilisation de l'émission propre pour le calcul de champ de température absolue. L'étude de la thermo-dépendance de la transmission optique, appelée thermotransmittance [5, 6] permet de s'affranchir de la connaissance de l'émissivité pour le calcul de la température absolue. Cette grandeur est propre au matériau et ne dépend pas des conditions extérieures (température ambiante, ...). Enfin, elle peut être mesurée pour chaque longueur d'onde, ce qui a pour conséquence une meilleure résolution spatiale, contrairement à l'émission propre.

Cette étude préliminaire a donc pour objectif de valider la pertinence de la thermotransmittance pour la mesure des champs de température transitoire dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge. A terme, elle sera utilisée pour des études en tomographie thermique transitoire.

Ce travail présente dans un premier temps le montage expérimental pour le calcul du coefficient de thermotransmittance. La méthode de calibration du coefficient pour un échantillon de silicium est développée dans un second temps. Enfin, les résultats des mesures de champs de température sont décrits en transitoire pour des lames de silicium et de verre.

2. Montage expérimental

Le montage utilisé pour mesurer la thermotransmittance d'un échantillon est présenté dans la figure 1. Afin de travailler en lumière monochromatique, le spectre d'une source type corps noir infrarouge (HawkEye Technologies, IR-Si295) est décomposé grâce à un monochromateur qui permet de sélectionner une longueur d'onde en sortie. La fente d'ouverture du monochromateur est de 5 mm. Dans cette étude, les longueurs d'onde utilisées sont comprises dans la gamme allant de 2 à 5 μm . Un assemblage de deux miroirs paraboliques permet de collimater et d'agrandir le faisceau incident afin d'éclairer une plus grande zone de l'échantillon. Ce dernier est chauffé par un four résistif annulaire asservi en température par un PID. Enfin, une caméra infrarouge (FLIR SC7000, InSb, gamme de longueur d'onde de 1,5 à 5 μm) collecte le flux transmis par l'échantillon.

Le signal capté par la caméra est la somme du flux transmis, I , et de l'émission propre, E , du matériau étudié. Une méthode à deux images est mise en place pour mesurer périodiquement l'émission propre lorsque la source incidente est éteinte puis la somme des signaux lorsque qu'elle est allumée. Pour cela, un hacheur optique est positionné en sortie du monochromateur et est synchronisé avec la fréquence d'acquisition de la caméra. Il devient alors possible de séparer les deux contributions par soustraction. Pour la mesure de thermotransmittance, seul le faisceau transmis, I , est utilisé.

Les matériaux étudiés sont une lame de silicium d'épaisseur 0,4 mm et une lame de verre d'épaisseur 2 mm, choisis pour leurs caractéristiques thermiques différentes, l'un étant conducteur, l'autre isolant.

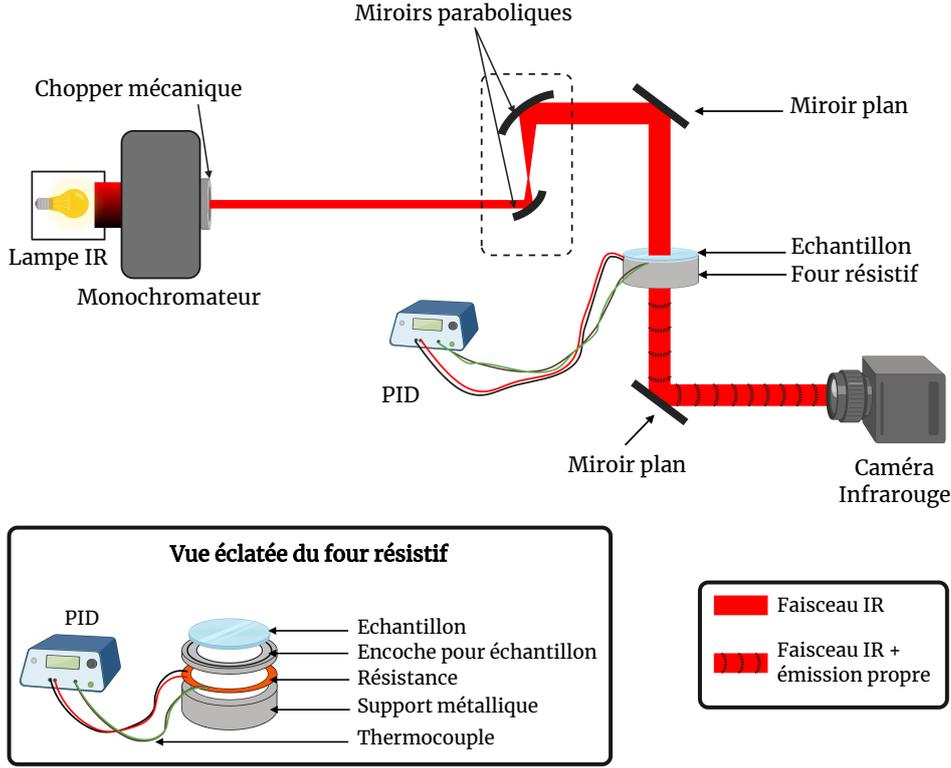


Figure 1 : Schéma du montage expérimental pour la mesure de la thermotransmittance.

3. Calibration du coefficient de thermotransmittance

3.1. Calcul du coefficient de thermotransmittance

La transmittance Γ du matériau étudié est le rapport entre le signal transmis, I , lorsque l'échantillon est placé devant la caméra, et le signal incident, I_0 , sans échantillon.

$$\Gamma(x, y, \lambda, T) = \frac{I(x, y, \lambda, T)}{I_0(x, y, \lambda, T_a)} \quad (1)$$

Par conséquent, l'étape de calibration nécessite une acquisition du faisceau incident sans échantillon afin de déterminer I_0 à la température ambiante. L'absorbance du matériau est alors :

$$A(x, y, \lambda, T) = -\log_{10}(\Gamma(x, y, \lambda, T)) \quad (2)$$

A cette étape, il faut remarquer que l'absorbance de l'échantillon dépend de sa température. Par conséquent, la variation d'absorbance en fonction de T est définie par :

$$\Delta A(x, y, \lambda, T) = A(x, y, \lambda, T) - A(x, y, \lambda, T_a) = -\log_{10} \left(\frac{\Gamma(x, y, \lambda, T)}{\Gamma(x, y, \lambda, T_a)} \right) \quad (3)$$

Enfin, il a été montré [5] que la variation d'absorbance varie linéairement avec la température :

$$\Delta A(x, y, \lambda, T) \approx \tau(x, y, \lambda)(T - T_a) \times e \quad (4)$$

Avec $\tau(x, y, \lambda)$ le coefficient de thermotransmittance et e l'épaisseur du matériau.

3.2. Calibration du coefficient de thermotransmittance sur une lame de silicium

Afin de déterminer la longueur d'onde optimale pour les mesures de thermotransmittance, la transmittance du matériau dans la gamme de 2 à 5 μm a été mesurée au préalable. Cette étude préliminaire permet de sélectionner $\lambda = 4 \mu\text{m}$ pour la lame de silicium, ce qui correspond à sa transmittance maximale. Grâce au four résistif contrôlé par un PID, le signal transmis par l'échantillon est enregistré à différentes températures, de T_a jusqu'à 100°C.

Afin de réduire le bruit sur les acquisitions, le signal est moyenné temporellement sur 400 images, puis spatialement par zones de 5 par 5 pixels. Le coefficient de thermotransmittance $\tau(x, y, \lambda)$ est calculé en chaque point de la nouvelle image de coordonnées (x, y) . La figure 2 (a) et (b) représente la variation d'absorbance en fonction de l'écart de température $\Delta T = T - T_a$. L'écart-type sur la température mesurée est de l'ordre de 9 °C (voir figure 2 (c) et (d), cf. équation 6). Les phénomènes de convection de l'air autour de l'échantillon sont une contribution importante de cette erreur, notamment sur les températures les plus élevées. De plus, l'incertitude augmente aux bords du faisceau, ce qui peut s'expliquer par une diminution du signal dans ces zones.

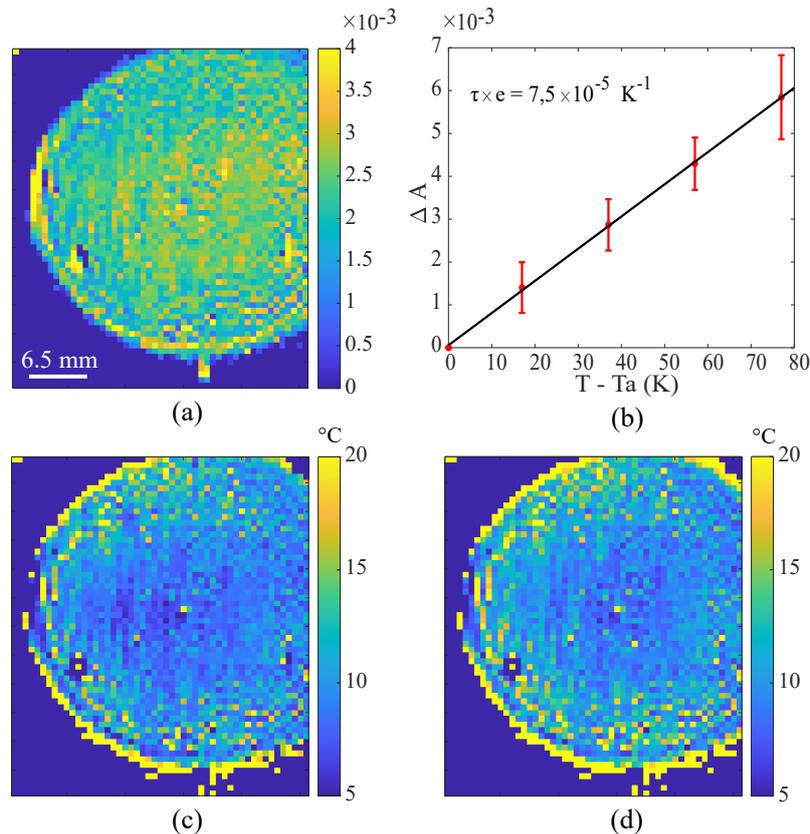


Figure 2 : (a) Cartographie de ΔA de l'échantillon de silicium mesuré à 60°C. (b) Évolution de ΔA en fonction de $\Delta T = T - T_a$ pour un pixel pris au centre de l'image (a), les barres d'erreurs correspondent aux écarts-types temporels. (c) Erreur sur la température à 40°C pour chaque pixel, l'erreur moyenne est de 8,4°C. (d) Erreur sur la température à 80°C pour chaque pixel, l'erreur moyenne est de 9,2°C.

Le coefficient directeur de la droite $\Delta A = f(\Delta T)$ (voir figure 2) est le coefficient de thermotransmittance dépendant, à ce stade, de l'épaisseur du matériau. Ainsi, calculé en chaque pixel, une cartographie $\tau(x, y, \lambda)$ est établie. Pour la lame de silicium, le coefficient de thermotransmittance moyen dépendant de l'épaisseur est : $\bar{\tau}(\lambda = 4\mu\text{m}) \times e = (7,5 \pm 1,1) \times 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Grâce à la mesure du coefficient de thermo-transmittance, il est désormais possible de calculer des champs de température absolue. En effet, d'après l'équation 4, il vient :

$$T(x, y, \lambda) = \frac{\Delta A(x, y, \lambda, T)}{\tau(x, y, \lambda) \times e} + T_a. \quad (5)$$

L'écart-type $u_{\Delta T}$ sur la mesure de température est donné par :

$$u_{\Delta T} = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \Delta A}\right)^2 u_{\Delta A}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \tau}\right)^2 u_{\tau}^2} \quad (6)$$

Avec $u_{\Delta A}$ l'écart-type temporel sur ΔA et u_{τ} l'écart-type de la régression linéaire pour le calcul de τ .

La figure 3 représente les champs de température mesurés grâce au coefficient de thermo-transmittance lors de l'étape de calibration. Les mesures de champs de température en régime permanent obtenues après calibration sont cohérentes avec les températures de consigne du four résistif. Elles valident ainsi la méthode de calibration. La prochaine étape consiste donc à réaliser des mesures de champs de température transitoire.

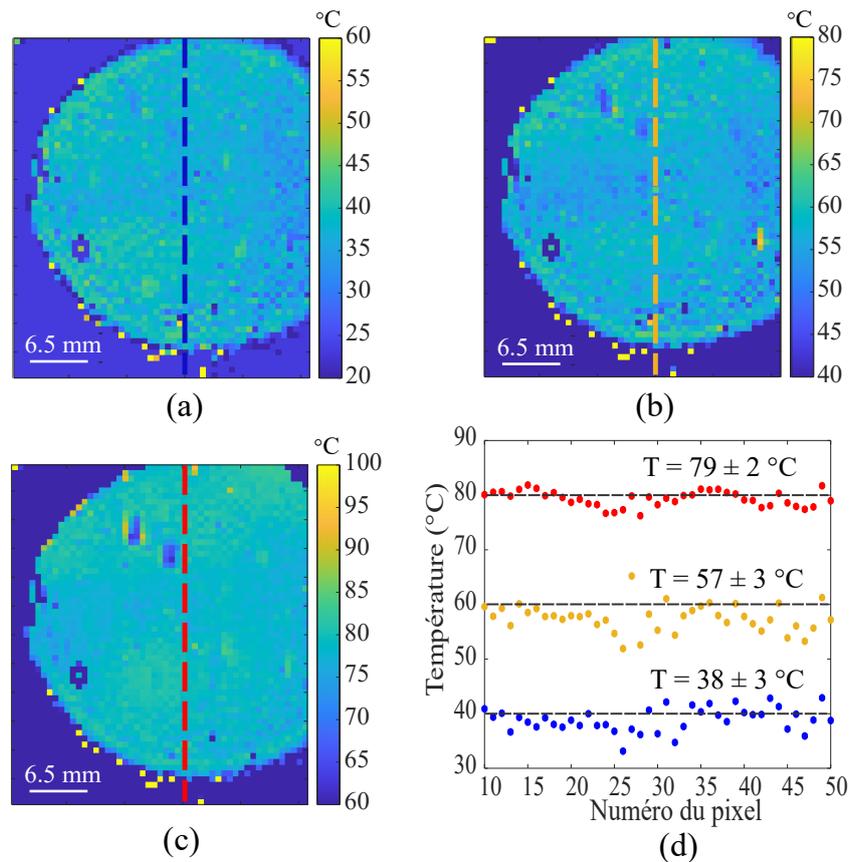


Figure 3 : (a), (b) et (c) : Champs de température en régime permanent. Températures de consigne du four résistif : (a) 40°C, (b) 60°C et (c) 80°C. (d) : Valeurs des pixels sur une coupe des champs de température mesurés lorsque le four est à 40°C, 60°C et 80°C.

4. Mesures de champs de température transitoire

Le même dispositif expérimental que pour la calibration est utilisé. L'échantillon initialement à la température T_a à l'instant t_0 est chauffé par le four résistif. A la différence de l'étape de calibration, la caméra enregistre un film de la montée en température du matériau au cours du temps. La variation d'absorbance est calculée pour chaque image du film (cf. équation 3). Le coefficient de thermodmittance permet finalement de mesurer les champs de température transitoire (cf. équation 5).

La fréquence d'acquisition des images est de 30 Hz : une image sur deux correspond à l'émission propre du matériau, l'autre à la somme de l'émission propre et du signal transmis. Par conséquent, la fréquence d'acquisition effective est de 15 Hz. Afin de diminuer le bruit sur les images finales, des moyennes temporelles et spatiales sont réalisées. Les paramètres utilisés pour cette étude sont résumés tableau 1. Les figures 4 et 5 représentent des champs de température transitoire des échantillons de verre et de silicium.

	Longueur d'onde	Moyenne temporelle	Moyenne spatiale	$\bar{\tau}(\lambda)$
Verre	3,3 μm	30 images	5 x 5 pixels	$1,5 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}.\text{m}^{-1}$
Silicium	4 μm	30 images	5 x 5 pixels	$2,0 \times 10^{-1} \text{ K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

Tableau 1 : Paramètres d'étude pour les mesures de champs de température transitoire des échantillons de verre et de silicium.

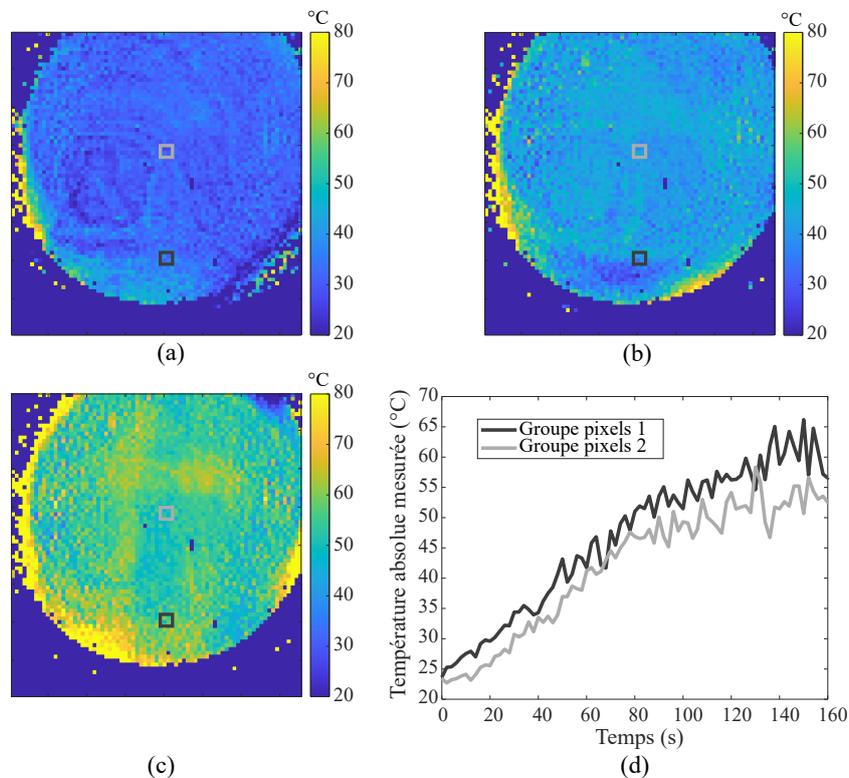


Figure 4 : (a), (b) et (c) : Champs de température transitoire mesurés sur la lame de silicium. Les images sont prises à $t_1 = 34$ s (a), $t_2 = 68$ s (b) et $t_3 = 134$ s (c) par rapport au début de l'acquisition. (d) : Évolution de la température au cours du temps pour deux groupes de pixels pris au centre et au bord de l'échantillon (carrés sur les figures (a), (b) et (c)).

Le silicium étant un bon conducteur (conductivité de l'ordre de 140 W/m/K), le gradient de température est faible sur une image prise à un instant t du film. Cependant, l'étude comparative de deux groupes de pixels issus du centre et du bord de l'échantillon (figure 5 (d)) montre que la méthode est suffisamment résolue pour étudier des variations de température inférieures à 5°C au cours du temps.

La même mesure est réalisée sur l'échantillon de verre, calibré au préalable. Comme il est plus isolant que le silicium (conductivité de l'ordre de 1 W/m/K), les gradients de température sur les images y sont plus marqués.

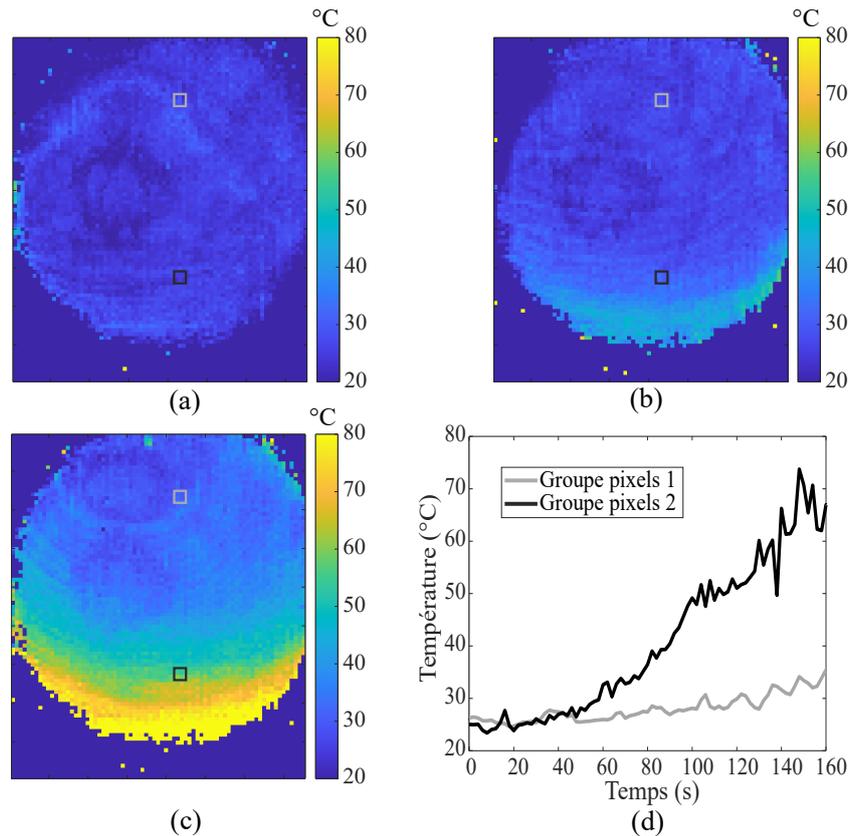


Figure 5 : (a), (b), (c) : Champs de température transitoire mesurés sur la lame de verre. Les images sont prises à $t_1 = 34$ s (a), $t_2 = 68$ s (b) et $t_3 = 134$ s (c) par rapport au début de l'acquisition. (d) : Évolution temporelle de la température de deux groupes de pixels pris à deux positions différentes sur l'échantillon (carrés sur les figures (a), (b) et (c)).

Finalement, les résultats présentés figures 4 et 5 valident la méthode de la thermotransmittance pour la mesure de champs de température absolue et transitoire dans des milieux semi-transparents à l'infrarouge.

5. Conclusion

Ce travail a permis de mettre en évidence l'intérêt de la thermotransmittance pour la mesure de champs de température absolue et transitoire dans des milieux solides, homogènes et semi-transparents à l'infrarouge. Néanmoins, la plus grande difficulté de cette méthode réside dans la faible quantité du signal utile, contrairement à une caractérisation en émission propre.

Les pistes d'amélioration concernent principalement l'étape de calibration qui actuellement génère une incertitude importante sur la mesure. Pour palier à cela, il est envisagé une méthode de double calibration, pouvant inclure le signal réfléchi par l'échantillon. De plus, une meilleure isolation du système permettrait de limiter les perturbations liées aux phénomènes convectifs, et d'apporter une meilleure précision de la mesure au cours de la calibration.

Cette étude préliminaire ouvre la voie au développement d'une méthode d'imagerie confocale pour la mesure de propriétés thermiques par imagerie 3D dans des organismes vivants.

Références

- [1] R. Usamentiaga, P. Venegas, J. Guerediaga, L. Vega, J. Molleda, F.G. Bulnes, Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors (Switzerland)*, (2014) .
- [2] A. Ewinger, G. Rinke, A. Urban, S. Kerschbaum, In situ measurement of the temperature of water in microchannels using laser Raman spectroscopy, *Chemical Engineering Journal*, (2013) .
- [3] M. Farzaneh, K. Maize, D. Lüeren, J.A. Summers, P.M. Mayer, P.E. Raad, K.P. Pipe, A. Shakouri, R.J. Ram, J.A. Hudgings, CCD-based thermorefectance microscopy : Principles and applications, *Journal of Physics D : Applied Physics*, (2009) .
- [4] A. Adibekyan, E. Kononogova, C. Monte, J. Hollandt, Review of PTB measurements on emissivity, reflectivity and transmissivity of semitransparent fiber-reinforced plastic composites, *International Journal of Thermophysics*, (2019) .
- [5] C. Pradere, M. Ryu, A. Sommier, M. Romano, A. Kusiak, J.L. Battaglia, J.C. Batsale, J. Morikawa, Non-contact temperature field measurement of solids by infrared multispectral thermotransmittance, *Journal of Applied Physics*, (2017) .
- [6] N. Kakuta, H. Yamashita, D. Kawashima, K. Kondo, H. Arimoto, Y. Yamada, Simultaneous imaging of temperature and concentration of ethanol-water mixtures in microchannel using near-infrared dual-wavelength absorption technique, *Measurement Science and Technology*, (2016) .