

Caractérisation de la conductivité thermique radiale de fibres de carbone de type PAN par la méthode 3omega

Radial thermal conductivity of PAN type carbon fibers using the 3omega method

Rodrigo OLAYA, Mishra KETAKI, Bertrand GARNIER

CNRS, LTEn UMR 6607, Université de Nantes, Rue Christian Pauc, 44306 Nantes Cedex 3, France
correspondant : rodrigoandres.olayagomez@univ-nantes.fr

Résumé La conductivité thermique radiale d'une fibre de carbone type PAN a été mesurée à l'aide de la méthode 3ω . Un modèle analytique en 2D en régime périodique établi a été développé et validé avec un code éléments finis. Une comparaison avec un modèle 1D radial montre l'importance de l'utilisation d'un modèle 2D compte tenu des transferts axiaux résiduels constatés lors des essais. Afin d'augmenter la sensibilité de mesure, la fibre de carbone a été placée dans de l'eau déionisée. Finalement les conductivités thermiques radiales mesurées sont entre 0,4 et 0,8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ soit 25 à 50 fois moins que la conductivité axiale des fibres de carbone de type PAN.

Mots clés : méthode 3omega; conductivité thermique radiale; fibre de carbone; composite; quadrupoles

Abstract Radial thermal conductivity of a PAN type carbon fiber is measured using the 3ω method. A 2D analytical model has been developed to carry out this estimation and has been validated using numerical simulation with finite elements. A comparison with a 1D radial analytical shows the importance of the use of a 2D model in order to avoid bias in the radial thermal conductivity measurement because of the presence of an axial heat flux along the fiber in our experiments. To increase the sensitivity, the carbon fiber was embedded in deionized water. Finally, the measured radial thermal conductivities were found between 0.4 and 0.8 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ which is 25 to 50 times less than the axial conductivity of PAN type carbon fibers.

Nomenclature

C	Chaleur spécifique, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	$V_{3\omega}$	Tension 3omega, V
I_{rms}	Courant électrique, A	X_{u_p}	Coeff. de sensibilité, $^{\circ}\text{C}$
L	Longueur de la fibre, m	<i>Symboles grecs</i>	
k_r	Cond. therm. radiale fibre, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	α_e	Coeff. de temp. de la résistance R , $^{\circ}\text{C}^{-1}$
k_w	Cond. therm. de l'eau	$\tilde{\theta}$	Température 2 fois transformée, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$
k_z	Cond. therm. axiale fibre, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	ρ	Masse volumique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
R	Rayon de la fibre, m	σ	Ecart type sur k_r , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R_0	Résistance élec. de la fibre, Ω	f	Fréquence ($f=\omega/(2\pi)$), Hz
T	Température, $^{\circ}\text{C}$		
\bar{T}	Temp. transformée moyenne, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$		

1. Introduction

La fibre de carbone est un matériau composite largement utilisé dans l'industrie notamment dans celle liée au transport aérien ou maritime et également dans le domaine de l'énergie (ailes d'éoliennes) [1]. Les fibres de carbone sont choisies notamment pour leur effet sur l'accroissement de la tenue mécanique des composites à matrice polymère. De plus elles permettent d'améliorer le transfert de chaleur au sein des matériaux composites parfois sièges de fort gradient de température. Afin de développer des modèles de prédiction de la conductivité

effective des composites polymère/fibre de carbone, il est nécessaire de connaître les propriétés thermiques de leurs constituants. Or, la mesure des propriétés thermiques des fibres de carbone est difficile en raison de leur faible diamètre typiquement entre 5 et 10 μm et également en raison de leur anisotropie. Il existe de nombreux travaux sur la conductivité thermique axiale des fibres de carbone mais beaucoup moins sur leur conductivité radiale, celle-ci étant plus difficile à mesurer.

Fibre de Carbone	Réf. Commercial	k_r W.m ⁻¹ .K ⁻¹	k_z W.m ⁻¹ .K ⁻¹	$\rho c / 10^6$ J.K ⁻¹ .m ⁻³	Temp. °C	Méthode	Réf
Lignin	-	0,11 - 8	1,8	-	77 - RT	FET-Raman TET	[2]
Pitch	YSH-60A	12	745	-	RT	ASTM C177- 10	[3]
Pitch	-	-	490	-	RT	T-type	[4]
PAN	T650	1,5	13,7	1,97	RT	3 ω	[5]
PAN	FT300B	-	10,47	1,37	RT	3 ω	[6]
Rayon	TC2	-	5-12,5	-	850-1800	Chauffage périodique	[7]

Tableau 1: Conductivité thermique radiale (k_r), axiale (k_z) et capacité thermique (ρc) de différentes fibres de carbone (RT : « room temperature »)

Le tableau 1 présente quelques valeurs issues de la littérature, ainsi il apparait que, à notre connaissance, seul Jiang [5] a mesuré la conductivité thermique radiale de fibre de carbone de type PAN, ce type de fibre étant l'objet de notre travail. Par ailleurs on peut remarquer que plusieurs auteurs utilisent une méthode de type 3 ω , celle-ci est intéressante car elle permet de mesurer simultanément plusieurs propriétés thermiques notamment la conductivité thermique axiale et la capacité thermique volumique des fibres [6]. En outre cette technique est relativement simple au niveau de l'instrumentation de la fibre de carbone. En effet, seules deux connections électriques avec des blocs de cuivre sont nécessaires, ceci ayant par ailleurs l'avantage de pouvoir, par la suite, thermaliser facilement l'échantillon pour changer la température moyenne à laquelle la mesure sera réalisée. Dans notre présent travail utilisant la méthode 3 ω , on s'intéressera seulement à l'estimation de la conductivité radiale car des travaux précédents (Mishra et al. [6]) ont déjà permis d'obtenir les valeurs de conductivités thermiques axiales k_z et de capacité thermique volumique ρc des fibres de carbone de type PAN, ces valeurs seront utilisées dans nos modèles et donc supposées connues.

Afin de mesurer la conductivité thermique radiale k_r , nous avons successivement développé un modèle thermique analytiques 2D en régime périodique établi, effectué une étude de sensibilité de la tension 3 ω mesurée à la grandeur recherchée k_r (afin de voir la pertinence du modèle 2D par rapport à la version 1D et d'optimiser la conception du dispositif de mesure), puis enfin traité une série de mesures sur des fibres de carbone de type PAN (FT300B).

2. Modèle analytique en 2D

Dans le dispositif de mesure, les deux extrémités de la fibre de carbone sont placées sur deux pièces en cuivre entre lesquelles on mesure la différence de potentiel $V_{3\omega}$ à la fréquence 3 ω lorsque qu'un courant de quelques mA et à la fréquence ω est imposé. Le tout est plongé dans de l'eau dé-ionisée afin de créer des gradients de température essentiellement radiaux. Ce dernier point est important et sera rediscuté dans la section dédiée à l'analyse de sensibilité. Afin d'extraire des mesures de tension $V_{3\omega}$ la valeur de la conductivité thermique radiale k_r , il est nécessaire de disposer d'un modèle thermique analytique reliant ces deux grandeurs. Compte tenu du dispositif, on a développé en régime périodique établi un modèle thermique

2D axisymétrique comportant la fibre de carbone anisotrope et de l'eau dé-ionisée, cette dernière étant considérée comme un milieu semi infini (Fig. 1).

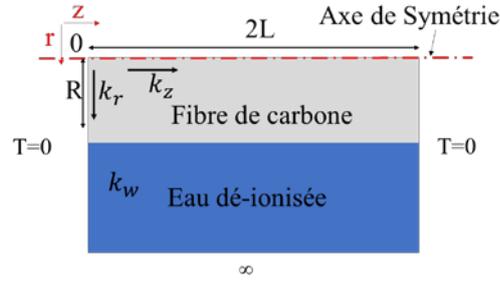


Figure 1: Géométrie 2D axisym. considérée pour le développement du modèle thermique 2D

Dans ce cas l'équation de la chaleur à résoudre dans les deux milieux s'exprime par :

$$k_r \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + k_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = -P \quad (1) \quad k_w \left(\frac{\partial^2 T_w}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + k_w \frac{\partial^2 T_w}{\partial z^2} - \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

Où P est une puissance volumique (effet Joule) et k_w et ρc_w sont la conductivité thermique et la capacité calorifique volumique de l'eau dé-ionisée. Dans l'Eq. (1) le terme source P est considéré constant, cette hypothèse est justifiée dans notre application car les effets de la température sur P (via la résistance électrique dont il dépend) n'est que de l'ordre de 0,075%. Il est à noter que cette hypothèse est à vérifier car parfois P peut varier significativement au cours des mesures avec la méthode 3 ω [8]. Par ailleurs, les conditions aux limites sont :

$$\begin{cases} \text{En } r = R \text{ on a } T = T_w \text{ et } k_r \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_R = k_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \Big|_R \text{ (contact parfait)} \\ \text{En } r = 0 \text{ on a } T_{finie} ; r = \infty \text{ on a } T_w \rightarrow 0 \\ \text{En } z = 0 \text{ on a } T = T_w = 0 ; z = L \text{ on a } \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial T_w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

La résolution de ces équations du problème commence avec une double transformée sur la température T . D'abord, une transformée en temps de Fourier complexe est appliquée à la température $T = \tilde{T} e^{2\omega jt}$ et à la puissance $P = \tilde{P} e^{2\omega jt}$. Dans un deuxième temps, une transformée finie de Fourier de type sinusoidal est utilisée :

$$\tilde{\theta} = \int_0^L \tilde{T} \sin(\beta_n z) dz \quad (4)$$

Avec ces deux transformations, la température à l'intérieur de la fibre prend la forme suivante :

$$\tilde{\theta}(\gamma_n) = a_1 I_0(\gamma_n r) + \frac{\tilde{P}}{\beta_n k_r \gamma_n^2} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} \gamma_n^2 = \frac{k_z}{k_r} (\alpha_z^2 + \beta_n^2) \\ \beta_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{\pi}{L} \text{ avec } n = 0, 1, 2 \dots \infty \end{cases} \quad (5)$$

Où $\tilde{\theta}$ est la température transformée, I_0 représente une fonction de Bessel modifiée et a_1 est une grandeur qui sera calculée en utilisant les conditions aux limites [9]. Par ailleurs, une formulation de type quadrupole [9] a été utilisée pour traiter l'aspect multicouche. Finalement, après l'utilisation de la formule pour la transformation inverse en sinus et en intégrant cette fois-ci sur le rayon et la longueur de la fibre de carbone, on obtient sa température moyenne :

$$\bar{\bar{T}} = \left\| \left(\frac{2}{L^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\tilde{\theta}(\gamma_n)}{\beta_n} \right) e^{2\omega jt} \right\| \quad (6)$$

$$\text{avec } \bar{\theta} = \left(\frac{AZ_{\infty}+B}{CZ_{\infty}+D} \right) \tilde{Q} \quad (7)$$

$$\begin{cases} A = 1 \\ B = \frac{I_0(\gamma_n R)}{2\pi k_r L \gamma_n R I_1(\gamma_n R)} - \frac{1}{\pi L k_r R^2 \gamma_n^2} \\ C = \pi R^2 L k_r \gamma_n^2 \beta_n \\ D = \frac{I_0(\gamma_n R) \gamma_n \beta_n R}{2I_1(\gamma_n R)} \end{cases} \quad (8)$$

$$Z_{\infty} = \frac{K_0(\gamma_{wn} R)}{2\pi R L k_w \gamma_{wn} K_1(\gamma_{wn} R)} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \gamma_{wn}^2 = \alpha_w^2 + \beta_n^2 \\ \tilde{Q} = \pi R^2 L \tilde{P} \\ \alpha_z^2 = \frac{2\rho c j \omega}{k_z} \\ \alpha_w^2 = \frac{2\rho_w c_w j \omega}{k_w} \end{cases} \quad (10)$$

Où I_0, I_1 sont les fonctions de Bessel modifiées de première espèce et K_0, K_1 des fonctions de Bessel modifiées de deuxième espèce. La température moyenne est directement liée à la mesure de tension $V_{3\omega}$ par la relation suivante :

$$V_{3\omega \text{ rms}} = I_{\text{rms}} R_0 \alpha_e \bar{\bar{T}} \quad (11)$$

Où $R_0 \alpha_e \bar{\bar{T}}$ provient de l'effet de la température sur la résistance électrique de la fibre de carbone ($R = R_0(1 + \alpha_e T)$ avec $\alpha_e = 2.4 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ le coefficient de température de la fibre PAN/FT300B).

3. Comparaison entre les modèles analytiques 2D et 1D et la version numérique 2D

Le modèle présenté précédemment a été comparé à un modèle numérique 2D basé sur les éléments finis (logiciel Comsol). Les conditions opératoires sont une valeur de courant électrique modulé de valeur rms 1 mA traversant une fibre de carbone de longueur 1.7 mm et de diamètre 7 μm . La conductivité thermique radiale a été choisie égale à 0,8 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. La conductivité thermique axiale k_z et la capacité thermique volumique ρc de la fibre de carbone ont été précédemment mesurée par nos soins (Tableau 1, [6]). Les résultats illustrés dans la Fig. 2 montrent un très bon accord entre les versions analytique et numérique des modèles 2D, en effet aucune différence n'est décelable (écart inférieur à 0,1%). La réponse d'un modèle 1D issu des travaux de Liang [5] a été ajoutée dans la Fig. 2, on peut alors bien distinguer des valeurs légèrement supérieures aux modèles 2D notamment à basse fréquence (Fig. 2 et 3). Cela montre qu'il reste néanmoins des transferts de chaleur axiaux non négligeables dans la fibre malgré la présence d'un milieu fortement effusif (eau dé-ionisée) qui sert de puits de chaleur radial autour de celle-ci.

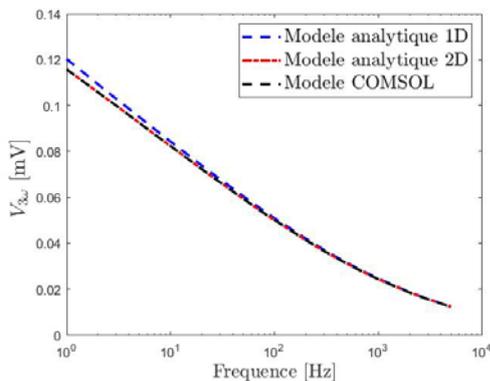


Figure 2: Comparaison entre modèles analytiques 1D, 2D et modèle numérique 2D

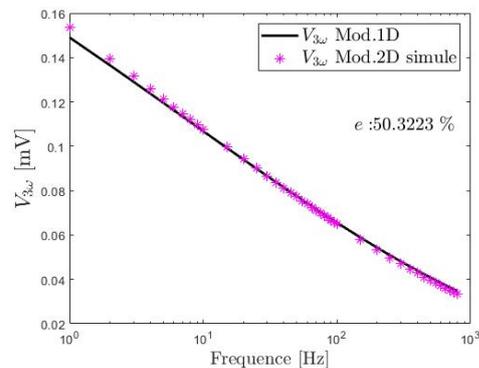


Figure 3 : Calcul du biais sur l'estimation de k_r en utilisant un modèle 1D (données simulées avec le modèle 2D)

On a voulu alors chiffrer le biais de mesure si on utilisait un modèle 1D pour l'estimation de k_r . Il s'avère que les écarts de tension $V_{3\omega}$ au maximum de 8% entre 1D et 2D constatés dans la Fig. 2 à basse fréquence induisent un biais sur l'estimation de k_r d'environ 50% ce qui montre la pertinence de l'usage d'un modèle thermique 2D donc prenant en compte les transferts axiaux résiduels.

4. Analyse de sensibilité

La mesure de la conductivité radiale des fibres de carbones n'est pas facile et il est important d'optimiser les conditions opératoires notamment en termes de gamme de fréquence de mesure, ou de type de milieu environnant. Ce travail a été réalisé en calculant à l'aide du modèle analytique 2D les coefficients X de sensibilité de la température T (reliée à la tension $V_{3\omega}$ par l'Eq.11) aux deux conductivités k_r et k_z . Les coefficients de sensibilité X ou X^* (en grandeur réduite) sont définis par [10] :

$$X_{u_p} = u_p \frac{\partial T}{\partial u_p} \quad \text{ou} \quad X_{u_p}^* = \frac{u_p}{T_{max}} \frac{\partial T}{\partial u_p}, \quad \text{avec } u_p = k_r, k_z \quad (12)$$

La figure 4 est très intéressante car elle compare la sensibilité à k_r et à k_z dans le dispositif de mesure de conductivité radiale. Par ailleurs, on y a rajouté la valeur de la sensibilité à k_z lors des mesures uniquement axiales i.e. de k_z [6], cette dernière est indiquée avec la notation « avec $k_w = 0$ » correspondant à une condition adiabatique. Le fait de placer de l'eau dé-ionisée autour de la fibre de carbone réduit donc très fortement la sensibilité à k_z et accroît fortement celle à k_r , ce qui était recherché. Toutefois, la sensibilité à k_r reste tout de même modeste autour de $X = 0,29$ °C et par ailleurs elle est quasiment indépendante de la fréquence sur la gamme 0,1-1000 Hz.

Une des questions qui se pose alors, peut-on augmenter encore plus la sensibilité à k_r en remplaçant l'eau par un autre fluide ou matériau autour de la fibre de carbone ? La figure 5 montre l'effet de la conductivité thermique du matériau environnant sur la sensibilité de la température à k_r . Il apparaît ainsi un gain d'un facteur 6 pour une augmentation de conductivité de k_w d'un facteur 10 (passage de 0,59 à 5,9 W.m⁻¹.K⁻¹). Toutefois il est difficile de trouver un fluide ou un matériau avec de telles propriétés tout en assurant un bon contact thermique avec la fibre de carbone. En refroidissant l'eau on pourrait obtenir de la glace avec une conductivité thermique bien supérieure (2,1 W.m⁻¹.K⁻¹ à 0°C) mais la capacité calorifique massique chuterait (de 4,22 à 2,06 kJ.kg⁻¹.K⁻¹ à 0°C) ce qui n'apporterait pas beaucoup de gain en terme de sensibilité à k_r car il faut noter que la grandeur pertinente pour choisir un milieu créant un effet de puits de chaleur est son effusivité thermique.

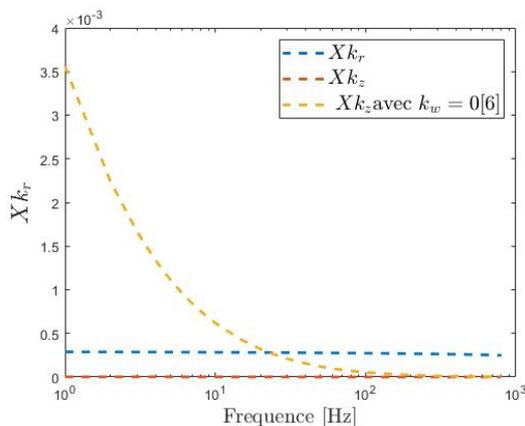


Figure 4: Analyse de sensibilité de la température T à k_r et k_z (Xk_z avec $k_w=0$ correspond à l'estimation de k_z sous vide[6])

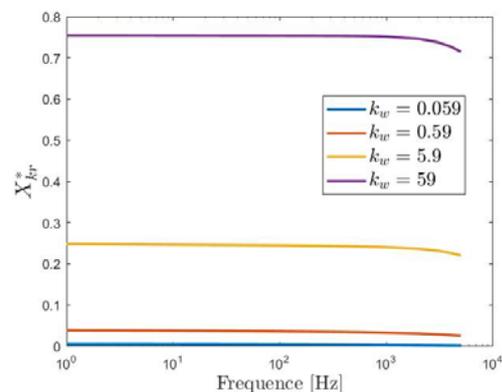


Figure 5: Analyse de sensibilité de la température mesurée à k_r en changeant la conductivité thermique du milieu environnant ($k_w = 0,59$ W.m⁻¹.K⁻¹ est la cond. therm. de l'eau)

5. Dispositif expérimental

Il existe deux types différents de circuits électroniques qui permettent la mesure de la tension $V_{3\omega}$ de l'échantillon : le pont Wheatstone et l'amplificateur différentiel. L'inconvénient avec le pont Wheatstone est l'impossibilité de réaliser la mesure de tension lorsque la fibre de carbone a une résistance électrique supérieure à environ 400Ω pour des problèmes d'adaptation d'impédance avec la détection synchrone. Dans notre cas les fibres de carbone ont des résistances électriques autour de 900Ω d'où l'usage d'amplificateurs différentiels. Dans notre dispositif expérimental, deux amplificateurs différentiels (AD624) avec une source de courant constante (Keithley 6221) ont été utilisés pour la détection des signaux de tension entre les extrémités de la fibre de carbone (résistance R_x) et entre celles de la résistance variable associée R_v (Fig. 6). A la sortie des 2 amplificateurs différentiels, le signal est analysé par une détection synchrone (Ametek 7265) pour aboutir à la mesure de $V_{3\omega}$. Avant les mesures, la résistance variable R_v est réglée afin d'égaliser le signal à la fréquence 1ω en sortie des amplificateurs différentiels. Un bain thermostat à température ambiante permet de bien stabiliser pendant les essais la température des deux pièces en cuivre sur lesquelles est maintenue la fibre de carbone.

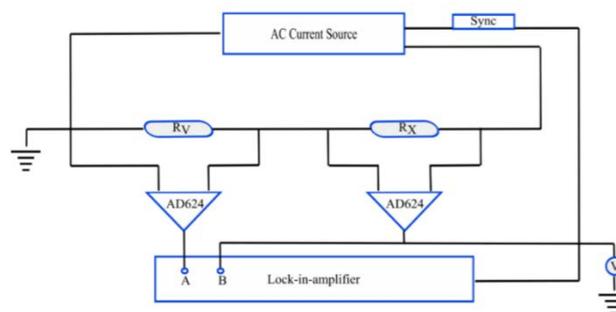


Figure 6 : Schéma électrique pour la mesure de la tension $V_{3\omega}$

En ce qui concerne le porte-échantillon, il est constitué de deux petites sections d'une carte de circuit électronique FR4 recouverte de $15 \mu\text{m}$ de cuivre qui sont collées sur un cube de polycarbonate avec un espace entre eux un peu inférieur à la longueur de la fibre de carbone étudiée (Fig. 7). Les extrémités de la fibre de carbone sont maintenues sur les parties en cuivre à l'aide de laque d'argent, puis l'ensemble est immergé dans de l'eau dé-ionisée.

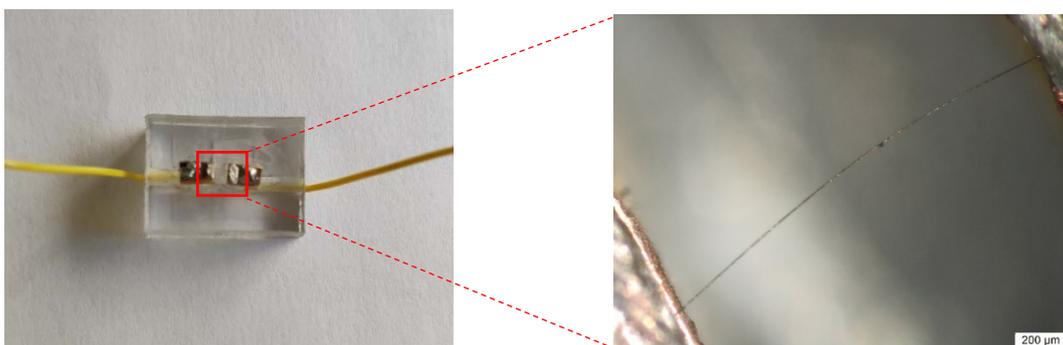


Figure 7: Porte-échantillon avec la mise en place d'une fibre de carbone

La mesure de la tension 3ω est réalisée sur un large intervalle de fréquences (1 à 800 Hz) avec environ 42 valeurs de fréquence avec de plus quelques fréquences plus élevées (autour de 5 kHz) pour obtenir la valeur asymptotique. Une analyse d'incertitude de mesure est présentée dans la section suivante.

6. Analyse d'incertitude

Les sources d'incertitude lors de la mesure de k_r sont nombreuses. On peut citer les grandeurs tels que longueur, diamètre des fibres, courant et tension électrique ainsi que les paramètres

thermiques supposés connus $k_z, \rho_c \dots$. Le principe de calcul de l'incertitude lors de l'estimation de k_r est issu des travaux de Milosevic [11].

$$S_{final} = [X^T W X]^{-1} \text{ with } W = \left[\sigma_{V_{3\omega}}^2 + \sum_P \left(\sigma_{m_P} \frac{\partial V_{3\omega}}{\partial m_P} \right)^2 \right]^{-1} \quad (13)$$

Où X est la matrice de coefficient de sensibilité, W est la matrice de variance et covariance, $\sigma_{V_{3\omega}}$ est la variance de la tension 3ω mesurée, σ_{m_P} est la variance des paramètres connus p , S_{final} est la matrice de variance et covariance de l'incertitude. Certaines valeurs de σ_{m_P} peuvent se trouver à partir de leurs erreurs relatives que l'on a chiffrées égales à : $e_{I_{rms}} = 0.1\%$, $e_{R_0} = 0.2\%$, $e_\alpha = 3\%$, $e_L = 9\%$ et $e_R = 13\%$ et sont utilisées pour le calcul de S_{final} . Les valeurs de l'erreur relative liée à la longueur et au diamètre ont été calculées à partir des mesures réalisées au microscope. Pour un intervalle de confiance de 95%, l'incertitude relative e_m des paramètres m est obtenue en utilisant $e_m = 1.96 \sigma_m / m$. De ces calculs, il en ressort une incertitude relative de 24% sur la conductivité thermique radiale k_r lors de son estimation.

7. Résultats expérimentaux

L'estimation de la conductivité thermique radiale a été réalisée à partir du modèle thermique analytique 2D validé précédemment. Le tableau 2 montre les résultats pour trois différentes fibres de carbone de type PAN/ FT300B avec des caractéristiques géométriques proches. Les valeurs de la conductivité thermique radiale obtenues sont plus de 10 fois inférieures à la valeur axiale égale à $10,5 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ [6] et vont de 0,4 à $0,8 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Cond. therm. radiale $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	Fibre de carbone 1 $L=1,70 \text{ mm}$ $\phi=7,45 \mu\text{m}$	Fibre de carbone 2 $L=1,73 \text{ mm}$ $\phi=8,58 \mu\text{m}$	Fibre de carbone 3 $L=0,74 \text{ mm}$ $\phi=7,45 \mu\text{m}$
k_r	0,549	0,435/0,652*	0,801

* : 2 mesures ont été réalisées pour le même échantillon

Tableau 2 : Mesures de conductivité thermique radiale (k_r) pour des fibres de carbone de type PAN FT300B (L longueur et ϕ diamètre des fibres de carbone)

Dans la figure 8, on peut constater un bon accord entre les valeurs mesurées et calculées de la tension $V_{3\omega}$ après l'estimation de la conductivité thermique radiale k_r . Pour améliorer l'estimation, on a en fait considéré du point de vue expérimental les écarts entre tensions mesurées et leur valeur asymptotique obtenue à hautes fréquences autour de 5 kHz, la valeur asymptotique devant en théorie être nulle. En effet, on a constaté que d'un essai sur l'autre cette valeur asymptotique n'était pas toujours égale à zéro témoignant de la présence d'un léger « offset » électronique.

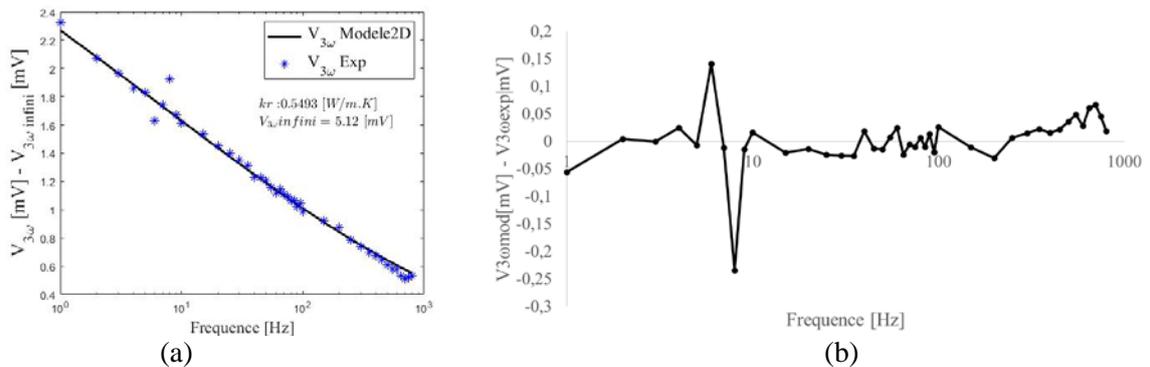


Figure 8 : (a) Comparaison entre valeurs mesurées et calculées de $V_{3\omega}$ après l'estimation de k_r ; (b) valeurs résiduelles i.e. écart entre $V_{3\omega}$ mesurée et $V_{3\omega}$ calculée

La Figure 8b présente les résidus de tension $V_{3\omega}$ après l'estimation de k_r . Il apparaît que la valeur maximale des résidus est de l'ordre de 0,06 mV pour des valeurs maximales de tension de 2,3 mV ce qui en grandeur relative donnent des résidus maximums de l'ordre de 2,6% ce qui reste faible.

8. Conclusion

Un modèle thermique analytique en 2D et en régime périodique a été développé et validé afin d'estimer la conductivité thermique radiale de fibre de carbone. Il est apparu que l'usage d'un modèle thermique 1D utilisé dans les travaux de Liang [5] pouvait entraîner des biais de mesure de l'ordre de 50% lors de l'estimation de k_r . Par ailleurs, il a été montré que la présence d'eau autour de la fibre de carbone augmentait la sensibilité des mesures de la tension électrique 3ω à la conductivité k_r tout en diminuant celle à la conductivité axiale k_z .

Trois différents échantillons de fibres de carbone de type PAN (FT300B) de diamètre entre 7,4 et 8,6 μm ont été caractérisés et les valeurs de conductivité thermique radiale estimées varient entre 0,43 et 0,80 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Connaissant les deux valeurs de conductivités thermiques des fibres de carbone les travaux futurs concerneront la mesure des résistances thermiques de contact (RTC) entre deux fibres de carbone, ceci afin de compléter les mesures aux petites échelles nécessaires si l'on veut développer des modèles précis de calcul de conductivité effective de composites à matrice polymère chargés de fibre de carbone mais la mesure des RTC fibre/fibre constitue encore un vrai challenge.

Références

- [1] J. Wang, X. Zhang, G.-P. Wu, Simultaneous Measurements of thermal properties of individual carbon fibers, *Int. J. Thermophysics*, 32 (2011) 974-983.
- [2] R. Wang, H. Zobeiri, H. Lin, W. Qu, X. Bai, Anisotropic thermal conductivities and structure in lignin-based microscale carbon fibers *Carbon*, 147 (2019) 58-69.
- [3] H. S. Huang, S. Ganguli, A. K. Roy, Prediction of the transverse thermal conductivity of pitch-based carbon fibers, *J. Composite Mat.*, 48-111 (2014) 1383-1390.
- [4] J. L. Wang, M. Gu, X. Zhang, Y. Song, Thermal conductivity measurement of an individual fibre using a T type probe method, *J. Phy. D-Appl. Phys.*, 42-110(2009)10, 2009.
- [5] J. Liang, Experimental measurement and modeling of thermal conductivities of carbon fibers and their composites modified with carbon nanofibers, PhD -Univ. Oklahoma, 2014.
- [6] K. Mishra, B. Garnier, S. Le Corre, N. Boyard, Accurate measurement of the longitudinal thermal conductivity and volumetric heat capacity of single carbon fibers with the 3 ω method, *Therm. Analys. Calorim.*, 137-14 (2019) 1037-1047.
- [7] C. Pradere, J. C. Batsale, J. M. Goyhénèche, R. Pailler, S. Dilhaire, Thermal properties of carbon fibers at very high temperature, *Carbon*, 47 (2009) 737-743.
- [8] T. Ding, Y. Jannot, V. Schich, A. Degiovanni, Analysis of the non-linearity of the heat transfer equation in case of a time-dependent heat source: application to the 3 ω method, *Journal of Engineering Mathematics, Springer Verlag*, 121 (2020) 85-99.
- [9] D. Maillet, S. André, J. C. Batsale, A. Degiovanni, C. Moyne, *Thermal quadrupoles solving the heat equation through integral transforms*, Chichester, Wiley (2000).
- [10] E. Chapelle, B. Garnier, B. Bourouga, Interfacial thermal resistance measurement between metallic wire and polymer in composites, *Int. J. Therm. Sci.*, 112 (2009) 2221-2227.
- [11] N. D. Milosevic, M. Raynaud, K. D. Maglic, Estimation of thermal contact resistance between the materials of double layer sample using the laser flash method, *Inv. Prob. Eng.*, 10 (2002) 85-103.