



HAL
open science

Défi des mesures de la conductivité thermique radiale de fibres de carbone et de la résistance thermique de contact fibre/fibre

Rodrigo Andres Olaya Gomez, Bertrand Garnier

► To cite this version:

Rodrigo Andres Olaya Gomez, Bertrand Garnier. Défi des mesures de la conductivité thermique radiale de fibres de carbone et de la résistance thermique de contact fibre/fibre. 19ième Journées Internationales de Thermique (JiTH 2022), Nov 2022, Tanger, Maroc. hal-03859952

HAL Id: hal-03859952

<https://hal.science/hal-03859952>

Submitted on 18 Nov 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Défi des mesures de la conductivité thermique radiale de fibres de carbone et de la résistance thermique de contact fibre/fibre

Rodrigo OLAYA, Bertrand GARNIER

LTen UMR 6607, CNRS, Nantes-Université, Rue Christian Pauc, 44306 Nantes Cedex 3, France
rodrigoandres.olayagomez@univ-nantes.fr, Bertrand.Garnier@univ-nantes.fr

Résumé : Dans ce travail, il s'agit de caractériser les propriétés thermiques des fibres de carbone de type PAN telles que la conductivité thermique radiale et la résistance thermique de contact (RTC) entre deux fibres de carbone croisées. Ces estimations sont réalisées à partir de mesures obtenues à l'aide de la méthode 3ω et aussi de modèles thermiques analytique ou numérique. Des analyses de sensibilité montrent l'influence des paramètres expérimentaux et géométriques lors de l'estimation des grandeurs recherchées. Les mesures réalisées sur des fibres de carbone de type PAN FT300B avec des diamètres inférieurs à $9 \mu\text{m}$ ont montré que la valeur de la conductivité thermique radiale d'une fibre de carbone était autour de $0.61 \text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$, ce qui est plus de 10 fois inférieur à sa conductivité thermique axiale. De même, les mesures réalisées sur le même type de fibre ont montré que la résistance thermique de contact entre deux fibres de carbone croisées est de $\sim 11 \pm 9 \text{10}^5 \text{ }^\circ\text{C}\text{W}^{-1}$.

Mots clés : Méthode 3ω ; Fibre de Carbone ; Conductivité thermique radiale ; Résistance thermique de contact ; Modèles thermiques analytique et numérique ; Analyse de sensibilité ; Théorie de Hertz

1 Introduction

Les matériaux composites et plus précisément les matériaux renforcés par des fibres de carbone sont des matériaux très répandus dans l'industrie aéronautique maritime textile et dans le domaine de l'énergie [1] en raison de leurs propriétés mécaniques avantageuses. Lors de leur utilisation, ces matériaux composites sont souvent le siège de gradients thermiques qui peuvent affecter les grandeurs mécaniques et la modélisation ab-initio des champs de température requière la connaissance des propriétés thermiques effectives des composites. Or la prédiction de celles-ci est souvent pénalisée par le manque de données aux petites échelles. Ainsi dans les composites à base de fibre de carbone, les propriétés thermiques des fibres ainsi que les résistances de contact matrice/fibre ou fibre/fibre sont des données peu disponibles. Par ailleurs, les données existantes concernent en très grande majorité la conductivité thermique axiale dont la mesure est assez classique (méthode 3ω ou impulsional...). Dans le travail présenté, on va s'intéresser à la conductivité thermique radiale et à la résistance thermique de contacte fibre/fibre qui sont des données quasi absentes de la littérature et difficile à caractériser.

Différentes techniques dédiées à cette étude à l'échelle locale existent dans la littérature dont on remarque la méthode 3ω car, en pratique, elle est très précise et sa cellule de mesure est relativement simple à mettre en œuvre. En outre, la méthode 3ω permet la mesure de plusieurs grandeurs thermiques.

Comme déjà annoncé, ce travail est dédié à la mesure de la conductivité thermique radiale k_r , ainsi qu'à la résistance thermique de contact (RTC) entre fibres. Dans ce qui suit, on présente dans un premier temps la mesure de k_r avec les modèles thermiques utilisés pour son estimation, le dispositif expérimental et les résultats obtenus. Dans un deuxième temps, les travaux sur la mesure de la RTC entre 2 fibres de carbone de type PAN sont présentés avec une démarche similaire (modèle thermique, dispositif expérimental et résultats).

2 Mesure de la conductivité thermique radiale

2.1 Etat de l'art sur la mesure de k_r et principe de mesure

La mesure des propriétés thermiques des fibres de carbone est difficile en raison de leur faible diamètre typiquement entre 5 et $10 \mu\text{m}$ 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.

Le Tableau 1 présente quelques valeurs issues de la littérature, ainsi il apparaît que, à notre connaissance, seul Liang [2] a testé la mesure de la conductivité thermique radiale de fibre de carbone de type PAN, ce type de fibre étant également l'objet de notre travail. Son travail [2] a été réalisé avec un modèle 1D radial seulement. Or nous nous sommes aperçus [3] que les transferts axiaux lors de la mesure de k_r n'étaient pas négligeable devant ceux dans la direction radiale d'où la nécessité de considérer lors de la mesure de k_r de la présence de transfert 2D (axial et radial). C'est l'objet des travaux présentés ici sur l'estimation de k_r .

Par ailleurs toujours dans le Tableau 1, on peut remarquer que plusieurs auteurs utilisent la méthode de type 3ω , 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 [4].

Tableau 1. Conductivité thermique radiale de différentes fibres de carbone (état de l'art)

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. ($^{\circ}C$)	Méthode	Réf
Lignin	-	0,11 - 8	1,8	-	77 - RT	FET-Raman	[5]
Pitch	YSH-60A	12	745	-	RT	ASTM C177-10	[6]
Pitch	-	-	490	-	RT	T-type	[4]
PAN	T650	1,5	13,7	1,97	RT	3ω	[2]
PAN	FT300B	-	10,47	1,37	RT	3ω	[7]
Rayon	TC2	-	5-12,5	-	850-1800	Modulé	[8]

En ce qui concerne le principe de mesure (voir Figure 1), la fibre de carbone de longueur entre 0,5 et 1,5 mm est collée à ses deux extrémités sur deux blocs de cuivre à l'aide de laque d'argent. Un courant modulé à la fréquence ω est injecté dans la fibre en induisant un effet Joule. Une mesure de la tension électrique $V_{3\omega}$ aux bornes de la fibre de carbone à la fréquence 3ω est réalisée celle-ci contenant l'information sur la température moyenne de la fibre. Lors de l'estimation des propriétés thermiques recherchée k_r , cette température moyenne est également calculée avec un modèle thermique adapté à son homologue obtenu calculé par sa version analytique.

Le circuit électrique capable de mesurer la tension $V_{3\omega}$ utilisé lors de ce travail correspond à celui de [3]. La section suivante décrit brièvement le modèle thermique analytique utilisé lors de l'estimation de k_r .

2.2 Modèle thermique analytique pour la mesure de k_r

La mesure de la conductivité radiale des fibres est plus délicate. Afin d'obtenir un transfert thermique essentiellement radial, la fibre est placée dans de l'eau dé-ionisée et nous avons 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 (Figure 1). Il est à noter que des travaux précédents ont montré qu'un modèle 1D radial n'était pas adapté car il entraînait des biais de mesure en raison de gradients de température axiaux résiduels non négligeables [3].

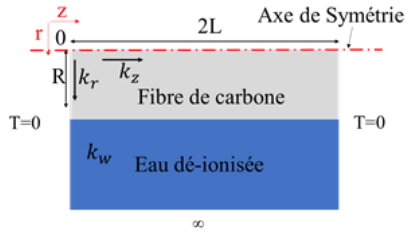


Figure 1. Configuration 2D du modèle thermique pour estimer k_r

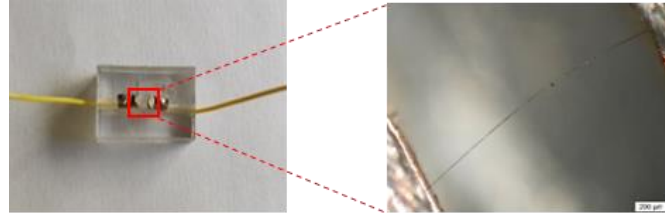


Figure 2. Porte-échantillon avec la mise en place d'une fibre de carbone pour la mesure de k_r

En configuration 2D axisymétrique, l'équation de la chaleur à résoudre pour les deux milieux s'expriment par :

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

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

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. Par ailleurs, les conditions aux limites sont :

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

La résolution de ces équations commence avec une double transformée sur la température T . D'abord, une transformée en temps de Fourier complexe est appliquée à la température : $T = \tilde{T} e^{2\omega j t}$ et à la puissance : $P = \tilde{P} e^{2\omega j t}$. Dans un deuxième temps, une transformée finie de Fourier de type sinusoïdal est utilisée. Par la suite, une formulation de type quadripôle [9] a été utilisée pour traiter l'aspect multicouche. Finalement, après intégration

sur le rayon, l'utilisation de la formule pour la transformation inverse en sinus [9] et l'intégration cette fois-ci sur la longueur de la fibre de carbone, on obtient sa température moyenne \bar{T} :

$$\bar{T} = \left\| \left(\frac{2}{L^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{\bar{\theta}}{\beta_n} \right) e^{2\omega jt} \right\| \quad (4) \quad \text{avec } \bar{\theta} = \left(\frac{A Z_{\infty} + B}{C Z_{\infty} + D} \right) \bar{Q} \quad (5)$$

Où \bar{T} est la température de la fibre doublement moyennée. On pourra trouver les expressions de A, B, C, D et Z_{∞} dans la référence [3]. La température moyenne est alors directement liée à la valeur rms de la tension $V_{3\omega}$ par la relation suivante[7]:

$$V_{3\omega rms} = \frac{1}{2} I_{rms} R_0 \alpha_e \bar{T} \quad (6)$$

Où $R_0 \alpha_e \bar{T}$ provient de l'effet de la température sur la résistance électrique de la fibre de carbone ($R = R_0(1 + \alpha_e T)$) avec $\alpha_e = 2.4 \cdot 10^{-4} K^{-1}$ le coefficient de température de la fibre PAN/FT300B. L'estimation de k_r est réalisée à partir du modèle (Eq. 4, 5 et 6), de mesures de $V_{3\omega}$ et d'une méthode d'estimation de paramètres (simplex).

2.3 Dispositif expérimental et résultats

Le porte-échantillon est constitué de deux petites sections d'une carte de circuit électronique FR4 recouverte de 15 μm 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 (Figure 2). 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. La mesure de la tension 3ω est réalisée sur un large intervalle de fréquence (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.

Pour le relevé de tension $V_{3\omega}$, on a en fait considéré les écarts entre tensions $V_{3\omega}$ et leur valeur asymptotique obtenue à haute fréquence autour de 5 kHz en raison de la présence d'un léger « offset » électronique.

Dans la Figure 3, on peut constater un bon accord entre les valeurs mesurées et calculées de la tension $V_{3\omega}$ lors de l'estimation de k_r . L'estimation de la conductivité thermique radiale a été réalisée sur trois différents échantillons (Tableau 2). Les valeurs obtenues sont plus dispersées que dans le cas de la conductivité axiale en raison de gradient de température bien plus faible que dans le cas radial. Par ailleurs, ceci est cohérent avec le calcul d'incertitude sur k_r qui donne une incertitude relative de mesure de l'ordre de 24% [3].

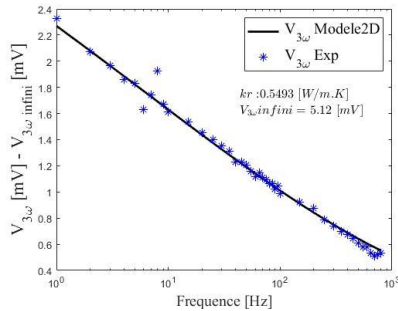


Figure 3. (a) Comparaison entre valeurs mesurées et calculées de $V_{3\omega}$ après l'estimation de k_r

	N° 1	N° 2	N° 3
Fibre de carbone	$L=1,70$ mm	$L=1,73$ mm	$L=0,74$ mm
	$\phi=7,45$ μm	$\phi=8,58$ μm	$\phi=7,45$ μm
k_r ($W.m^{-1}.K^{-1}$)	0,549	0,435/0,652*	0,801

* : Deux mesures ont été réalisées pour le même échantillon.

Les valeurs de la conductivité thermique radiale obtenues (en moyenne $0,61 W.m^{-1}.K^{-1}$) sont plus de 10 fois inférieures à la valeur axiale ($10,1 W.m^{-1}.K^{-1}$), ce qui atteste du caractère non isotrope de ce type de fibre de carbone.

3 Mesure de la résistance thermique de contact (RTC) fibre/fibre

3.1 Principe de mesure

La littérature est abondante pour la RTC entre solides accolés à macro-échelle, mais beaucoup moins riche à micro-échelle. Le Tableau 3 contient un état de l'art sur la mesure à micro-échelle, notamment le contact entre fils ou fibres (en carbone ou non). Dans le travail de Katakami et al. [10] concernant la fibre de carbone, la méthode Raman est utilisée pour la conductivité thermique axiale de fibres de carbone ainsi que des premières mesures de RTC fibre/fibre. Cependant la fibre de carbone est considérée comme isotrope, ce que les mesures précédentes de k_r contredisent – voir section 2.3- A notre connaissance c'est le seul travail consacré au contact entre fibres de carbone croisées.

Tableau 3. RTC entre fils ou fibres et pour différents matériaux

Matériel fil	Diam. Fil (μm)	Méthode	TCR fil/fil (KW^{-1})	Référence
Pt-Pt	10-50	T-type	$5 \cdot 10^4$	[11]
Pt-Pt	10-30	T-type	$20\text{-}30 \cdot 10^4$	
CF-CF	11-11	Laser-flash Raman	$2.98 \cdot 10^5$	[10]
CNT-CNT	$74\text{-}121 \cdot 10^{-3}$	Suspended micro-device	$2.96 \cdot 10^4$	[12]
Pt-Pt-	25.4-25.4	C-Transient electrical	$7.05 \cdot 10^5$	[13]
Pt-glass	25.4-8.9	C-Transient electrical	$2.06 \cdot 10^6$	

Pour le type de fibre de carbone que l'on souhaite étudier (PAN – FT300B), la connaissance des conductivités thermiques axiale et radiale de la fibre de carbone permet maintenant d'envisager une mesure de la résistance thermique de contact (RTC) entre deux fibres. Pour ce faire, comme le montre la Figure 5, une première fibre placée entre deux blocs de cuivre est chauffée par effet Joule avec un courant modulé comme dans le cas de la mesure de la conductivité thermique axiale [7] et une deuxième fibre collée aux extrémités d'une pièce en U est positionnée sur la première à l'aide d'un dispositif de micro-déplacement 3D (Micro-contrôle). L'effet du positionnement de la deuxième fibre doit localement baisser la température de la première fibre et possiblement affecter la température moyenne que l'on peut analyser via le relevé de tension $V_{3\omega}$ (Figure 4).

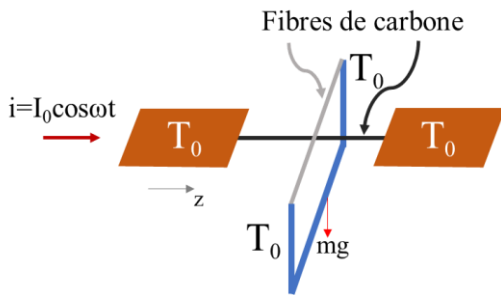


Figure 5. Principe de la mesure de RTC entre deux fibres de carbone

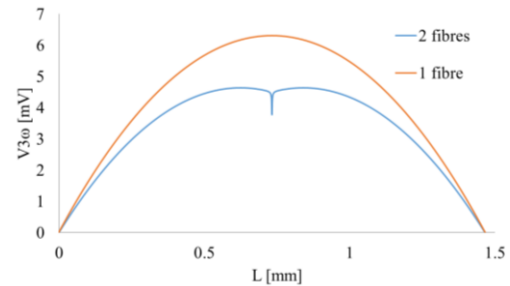


Figure 4. Distribution de température le long de la fibre seule et perturbée par le contact avec une autre fibre – courbe obtenue par simulation numérique

3.2 Modèle numérique

L'estimation de la RTC fibre/fibre se réalise à partir d'un modèle thermique numérique (éléments finis Figure 7). Deux cylindres croisés perpendiculairement représentant les fibres de carbone sont mis en contact par une petite surface de contact. Cette surface de contact est générée par les déformations créées par la masse du support en U. Un premier calcul montre que les déformations (flèche) sont négligeables car le cercle formant la section transversale du cylindre est infiniment petit par rapport à l'arc du au chargement produit par la présence de la deuxième fibre donc le contact dès point de vue de la fibre reste un point. Le contact est finalement déterminé à partir des déformations. Le calcul des déformations est mené par la théorie de Hertz pour un corps élastiques et pour deux cylindres croisés [14]. Dans le modèle numérique, la surface déformée est enlevée des cylindres permettant l'obtention d'une zone plate. Le fait d'avoir cette zone génère le contact entre les deux façades aplaties des cylindres. Le maillage et le raffinement du même est défini à partir du nombre d'éléments à l'intérieur de la zone de contact. On constate que avec 16 éléments dans la zone de contact, on obtient une variation de la tension $V_{3\omega}$ inférieure à 1%.

Les propriétés thermiques et géométriques des fibres de carbone utilisées ont été déterminées précédemment. L'expression qui permet de relier la température moyenne de la fibre est définie dans la section 2.1 (Eq (6))

3.3 Analyse de sensibilité

Une analyse de sensibilité a été réalisée afin d'optimiser les conditions expérimentales notamment la gamme de fréquence à balayer. Ce calcul est réalisé à partir du principe expliqué en [3] et le modèle numérique développé précédemment.

La Figure 6 où D est le diamètre de la 1^{ère} fibre et L sa longueur compare la sensibilité de la tension $V_{3\omega}$ à différentes paramètres thermique et géométrique. La sensibilité de $V_{3\omega}$ à la RTC a de l'importance sur un intervalle entre 1 et 10 Hz, même chose pour les autres paramètres. La figure 6 montre également une certaine corrélation entre ces grandeurs. En terme de traitement, on a dans un premier temps affiné la mesure de diamètre D et de la longueur L de la première fibre en les estimant dans la gamme de fréquence de 10 à 100 Hz puis dans un deuxième temps on a estimé la RTC entre les 2 fibres sur la gamme de fréquence de 1 à 10 Hz, là où on a une bien meilleure sensibilité.

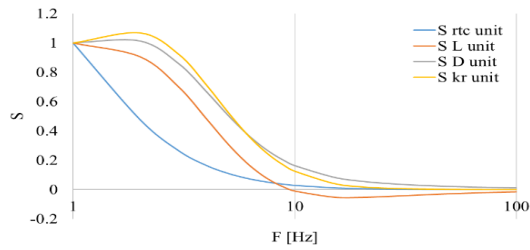


Figure 6. Analyse de sensibilité de $V_{3\omega}$ à k_r , RTC , D et L

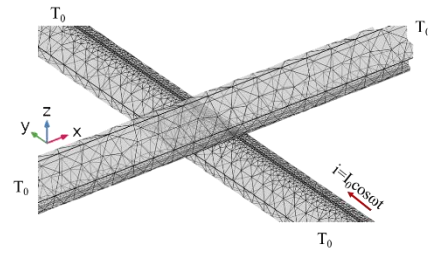


Figure 7. Géométrie pour le modèle thermique numérique (éléments finis Consol)

3.4 Dispositif expérimental et résultats

Le dispositif de mesure de RTC entre fibres est constitué d'une poutre encastrée en cuivre + PPMA avec une rainure de 1.5 mm environ au milieu (Figure 8). Une fibre de carbone est placée sur cette rainure à l'aide de laque d'argent. Un support en U fabriqué en cuivre étamé sert à tenir la deuxième fibre de carbone dite amovible. Cette fibre de carbone est collée à l'aide de laque d'argent sur le support. Un système de micro-déplacement est utilisé pour le positionnement de la deuxième fibre de carbone. Le système de positionnement utilisé est retiré une fois la seconde fibre mise en place. Tout le dispositif est mis sous vide à une pression de $2 \cdot 10^{-3}$ mbar pour éviter les pertes convectives, le niveau de vide (pression) étant mesurée par une jauge Pirani (Figure 8). Chaque essai est constitué de 23 mesures de tension $V_{3\omega}$ réalisées sur un intervalle de fréquences de 1 à 100 Hz. Des mesures de la résistance électrique de la fibre de carbone collée sur la poutre sont réalisées avant et après le positionnement de la deuxième fibre de carbone afin de déterminer le terme source (effet Joule) dans la première fibre.

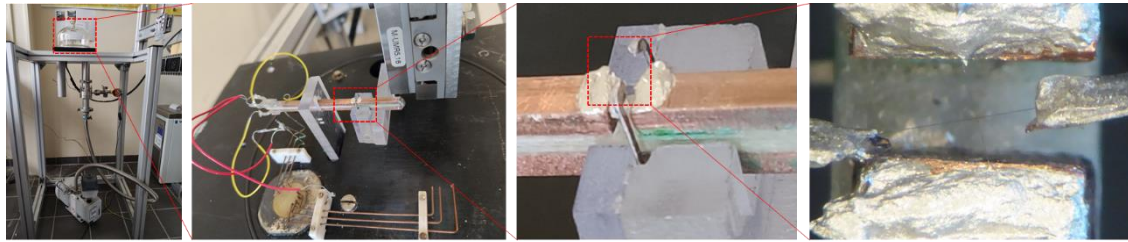


Figure 8. Dispositif expérimental, mesure de la RTC fibre/fibre

La Figure 9 montre les premières mesures témoignant nettement de l'effet de la présence de la seconde fibre. Il s'ensuit une chute de tension $V_{3\omega}$ de l'ordre de 20% et ceci sur la gamme de fréquence de 1 à 10 Hz tel qu'on l'a constaté lors de l'analyse de sensibilité. En répétant les mesures, on peut constater qu'elles sont nettement reproductibles.

La Figure 10 montre un très bon accord entre les mesures expérimentales et les calculs numériques sur tout l'intervalle de fréquence lors de l'estimation de la RTC entre les 2 fibres. La mesure de RTC fibre/fibre a été réalisée sur 3 fibres de carbone amovibles différentes et pour différentes valeurs de courant injectés (

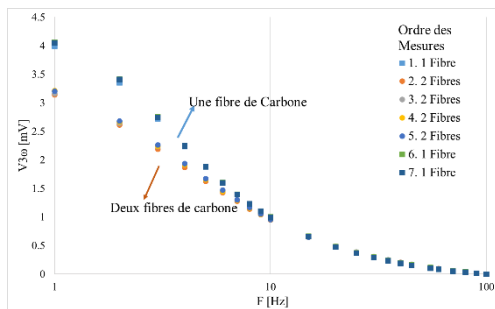


Figure 10. Mesure de la tension V_3 pour une seule et deux fibres de carbone.

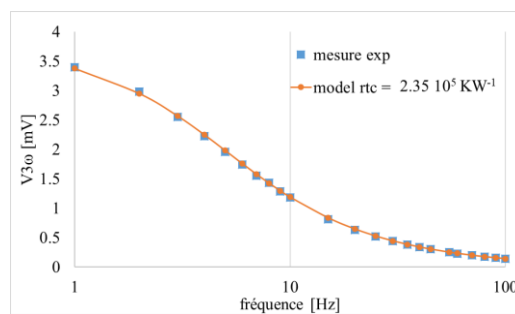


Figure 9. Comparaison de la tension V_3 mesurées et calculée

Tableau 4).

Tableau 4. Mesure de la RTC ($K.W^{-1}$) entre 2 fibres (Fibres de carbone PAN FT300B)

$I_{rms}(mA) \rightarrow$	0.4	0.45	0.5
\downarrow Echantillon			
N°2	$15.0 \cdot 10^5$	$4.50 \cdot 10^5$	$2.35 \cdot 10^5$
N°3	$15.4 \cdot 10^5$	$4.71 \cdot 10^5$	$10.3 \cdot 10^5$
N°1			$20.6 \cdot 10^5$

Ce tableau montre qu'il y a une certaine dispersion sur la mesure de la RTC fibre/fibre, ceci étant due aux nombreuses sources d'erreur (grandeurs géométriques, propriétés thermiques dont les conductivités thermiques axiale et radiale des fibres de carbone). On obtient finalement une valeur moyenne de RTC égale à 11°CW^{-1} avec une dispersion de $9 \cdot 10^5 \text{ }^{\circ}\text{CW}^{-1}$ (2 fois l'écart type).

Conclusions

Afin de mesurer la conductivité thermique radiale des fibres de carbone de type PAN FT300B de faible diamètre (6-9 μm) un modèle analytique 2D en régime périodique établi a été mis au point. Un dispositif expérimental original a été conçu en utilisant de l'eau dé-ionisée autour de la fibre pour augmenter le transfert radial. Une valeur moyenne de conductivité thermique radiale de $0,61 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a été obtenue.

En ce qui concerne la mesure de la résistance thermique de contact fibre /fibre, un modèle numérique a été développé et validé. Un dispositif de mesure très original sous vide a été mis au point avec deux fibres qui se croisent à 90° , la mise en place des fibres étant particulièrement délicate. Les premières mesures de tension $V_{3\omega}$ en fonction de la fréquence sont apparues être bien reproductibles et ont montré clairement un effet- sur $V_{3\omega}$ - du contact entre les deux fibres notamment à basse fréquence (1 à 10 Hz). Une valeur moyenne de RTC fibre/fibre de $\sim 11 \pm 9 \cdot 10^5 \text{ }^{\circ}\text{CW}^{-1}$ a été finalement obtenue.

Nomenclature

Symboles :

C	Chaleur spécifique, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
I_{rms}	Courant électrique, A
L	Longueur de la fibre, m
k_r	Cond. therm. radiale fibre, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k_w	Cond. therm. de l'eau
k_z	Cond. therm. Axiale de la fibre, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
R	Rayon de la fibre, m
R_0	Résistance élec. de la fibre, Ω
T	Température, $^{\circ}\text{C}$
\bar{T}	Temp. transformée moyenne, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$
V	Tension, V

$V_{3\omega}$ Tension 3omega, V

Lettres grecques :

α_e	Coeff. de temp. de la résistance R, $^{\circ}\text{C}^{-1}$
$\hat{\theta}$	Température 2 fois transformée, $^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}$
ρ	Masse volumique, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	Ecart type sur k_r , $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
f	Fréquence ($f=\omega/(2\pi)$), Hz

Indice/Exposants :

rms	root mean square
r	axe radial
w	eau
z	axe longitudinal

Références :

- [1] J. Wang, B. Song, X. Zhang, Y. Song, and G. Wu, "Simultaneous Measurements of Thermal Properties of Individual Carbon Fibers," *Int J Thermophys*, vol. 32, no. 5, pp. 974–983, May 2011.
- [2] J. Liang, "Experimental measurement and modeling of thermal conductivities of carbon fibers and their composites modified with carbon nanofibers." PhD-Univ. Oclahoma, 2014.
- [3] R. Olaya and B. Garnier, "Radial thermal conductivity of a PAN type carbon fiber using the 3 omega method," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 172, p. 107321, Feb. 2022.
- [4] J. L. Wang, M. Gu, X. Zhang, and Y. Song, "Thermal conductivity measurement of an individual fibre using a T type probe method," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 42, no. 10, p. 105502, May 2009.
- [5] R. Wang *et al.*, "Anisotropic thermal conductivities and structure in lignin-based microscale carbon fibers," *Carbon*, vol. 147, pp. 58–69, Jun. 2019.
- [6] H. S. Huang, S. Ganguli, and A. K. Roy, "Prediction of the transverse thermal conductivity of pitch-based carbon fibers," *Journal of Composite Materials*, vol. 48, no. 11, pp. 1383–1390, May 2014.
- [7] K. Mishra, B. Garnier, S. Le Corre, and N. Boyard, "Accurate measurement of the longitudinal thermal conductivity and volumetric heat capacity of single carbon fibers with the 3ω method," *J Therm Anal Calorim*, vol. 139, no. 2, pp. 1037–1047, Jan. 2020.
- [8] C. Pradere, J. C. Batsale, J. M. Goyhénèche, R. Pailler, and S. Dilhaire, "Thermal properties of carbon fibers at very high temperature," *Carbon*, vol. 47, no. 3, pp. 737–743, Mar. 2009.
- [9] D. Maillot, Ed., *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*. Chichester Weinheim: Wiley, 2000.
- [10] Q.-Y. Li, K. Katakami, T. Ikuta, M. Kohno, X. Zhang, and K. Takahashi, "Measurement of thermal contact resistance between individual carbon fibers using a laser-flash Raman mapping method," *Carbon*, vol. 141, pp. 92–98, Jan. 2019.
- [11] J. Wang and X. Zhang, "Measurement Methods and Applications for Thermophysical Properties at Micro/nanoscales," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 11, p. 11RC01.
- [12] J. Yang, S. Waltermire, Y. Chen, A. A. Zinn, T. T. Xu, and D. Li, "Contact thermal resistance between individual multiwall carbon nanotubes," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 2, p. 023109, Jan. 2010.
- [13] N. Velson and X. Wang, "Characterization of thermal transport across single-point contact between micro-wires," *Appl. Phys. A*, vol. 110, no. 2, pp. 403–412, Feb. 2013.
- [14] V. L. Popov, *Principios y aplicaciones de la mecánica de contacto en tribología, fricción y adherencia*, 3rd ed. Publicaciones de la Universidad de Alicante, 2020