

Etude de la conductivité thermique du Nanofluide graphène/glycérol : Effet de la concentration

Auteurs : Mohamed LOTFI¹, Mohammed FLIYOU¹, Rodolphe HEYD², My Abdelaziz KOUMINA¹ Adresse des auteurs : ¹ Equipe Physique des nanostructures, Université Cadi Ayyad, ENS Marrakech, Maroc ² CRMD, CNRS, Orléans, France

Email des auteurs : lotfimohamed_1999@yahoo.fr ; fliyou@hotmail.com ; rodolphe.heyd@gmail.com ; koumina@gmail.com

Résumé :

Pour améliorer le rendement énergétique de certains fluides utilisés comme caloporteur d'énergie, notre travail présenté dans cette communication s'est lancé et il est centré sur l'étude des propriétés thermiques d'un nouveau type de nanofluide : le système Graphène/Glycérol. La caractérisation est faite en fonction de la fraction volumique des nanoparticules de graphène au sein du glycérol. Le but général est l'étude expérimentale de la conductivité thermique (transfert thermique du nanofluide) en fonction de la concentration des nanoparticules.

Nous utilisons la méthode 3ω pour la caractérisation thermique des nanofluides. Nous avons développé la caractérisation thermique des échantillons pour différents pourcentages et pour différentes températures. Les résultats obtenus avec ce nouveau système sont intéressants, nous avons observé une augmentation de la conductivité thermique qui dépasse 100% pour de faibles fractions volumiques. L'ajout de faible fraction de nanoparticules au sein du glycérol permet une grande amélioration du rendement énergétique.

Mots clés : Graphène, Conductivité thermique, Nanoparticules, Nanofluides, Méthode 3ω

1. Introduction

Dans plusieurs domaines de sciences et techniques on trouve des liquides de refroidissement comme porteurs d'énergie thermique. Malheureusement ces liquides présentent des conductivités thermiques faibles. Parmi les méthodes utilisées pour augmenter la conductivité thermique on trouve celle de l'ajout de nanoparticules au sein du fluide.

Le travail de notre équipe se base sur l'ajout de nanoparticules de graphène à des liquides, et leur caractérisation thermique en utilisant la méthode 3ω à l'ENS Marrakech et leur caractérisation rhéologique en collaboration avec le CRMD à Orléans en France.

2. Méthode de caractérisation thermique

2.1. Principe de la méthode

La méthode 3ω utilise un très fin fil de platine de résistance R(t) qui plonge dans le fluide à caractériser. Un courant électrique mis en circulation dans le fil, y provoquant par effet Joule le dégagement d'une énergie thermique chauffe le fluide environnant. Plus la conductivité thermique du liquide environnant est grande, plus l'augmentation de température du fil est faible. C'est ce principe qui est utilisé pour mesurer la conductivité thermique.

Le courant électrique utilisé dans la méthode 3ω est un courant électrique harmonique $i(t) = \hat{l}cos\omega_0 t$ [1,4]. Ce courant harmonique i(t) génère par effet Joule au sein du filament une puissance thermique de pulsation $\omega = 2\omega_0$ qui engendre elle-même une variation de la température du fil, et donc de sa résistance électrique, comportant chacune une composante de pulsation $2\omega_0$. Finalement la tension électrique aux bornes du fil présentera une très faible composante harmonique (quelques μV) de pulsation $\omega = 3\omega_0$ qui contient toute l'information sur le processus de chauffage et donc sur les propriétés thermiques du fluide. C'est de la détection de cette tension que la méthode tire son nom.

2.2. Protocole expérimental

Nous avons utilisé la configuration expérimentale à pont diviseur dont nous reproduisons ici sur la figure (Figure 1) cette configuration est utilisée pour éliminer la composante en ω_0 .

2.2.1. Excitation

La tension d'excitation e(t) harmonique de fréquence v_0 est de préférence fournie par l'oscillateur interne du détecteur synchrone (DS). L'amplificateur de courant (AC) permet d'exciter le fil chauffant par un courant électrique dont l'intensité $i(t) = \hat{l}cos\omega_0 t$ est directement proportionnelle à e(t). L'amplificateur de courant que nous utilisons n'introduit pas de déphasage notable entre i(t) et e(t).



Figure 1 : Montage avec pont diviseur. Le détecteur synchrone (DS) est utilisé en mode détection du troisième harmonique, il est commandé par un ordinateur de type PC. (AD1) et (AD2) sont des amplificateurs différentiels de type AMP03, (AI) est un amplificateur d'instrumentation de type AD620, (AC) est un amplificateur de courant.

2.2.2. Équilibrage du pont

Une fois la température de mesure T_i du liquide convenablement stabilisée à l'aide d'un bain thermostaté de précision, la première phase du protocole de mesure consiste en l'équilibrage du pont, c'est à dire l'élimination de la composante continue. Cet équilibrage est réalisé pour chaque température de mesure T_i , en ajustant la valeur du potentiomètre de précision R_g de telle sorte que :

$$R_g i(t) = R(T_i)i(t) \tag{1}$$

On a alors

$$u_g(t) = u_{\omega_0}(t) \tag{2}$$

Le signal différentiel $\Delta u(t)$ à l'entrée de l'amplificateur d'instrumentation s'écrit alors :

$$\Delta u(t) = u(t) - u_g(t) = u(t) - u_{\omega_0}(t) = u_{AC}(t) + u_{DC}(t)$$
(3)

2.2.3. Amplification

Le signal informatif $u_{AC}(t)$ étant très faible, on préfère l'amplifier avant de démarrer la détection synchrone. C'est le rôle de l'amplificateur d'instrumentation (AI) qui amplifie $\Delta u(t)$ d'un facteur G compris entre 100 et 1000. Le signal $u_S(t)$ à l'entrée du détecteur synchrone s'écrit alors :

$$u_{S}(t) = G\Delta u(t) = G\left[u(t) - u_{\omega_{0}}(t)\right] = G\left[u_{AC}(t) + u_{DC}(t)\right]$$
(4)
Ce signal a l'allure représentée sur la figure (Figure 1)

2.2.4. Détection synchrone

On utilise un détecteur synchrone (DS) double phase en mode détection du troisième harmonique. On peut ainsi mesurer simultanément les amplitudes des composantes $3\omega_0$ en phase (X) et en quadrature (Y) présentes dans le signal $u_s(t)$ à l'entrée du détecteur. Le détecteur extrait du signal $u_s(t)$ les amplitudes suivantes :

$$X = \frac{\alpha_{Pt} R_{ref} G \hat{I}}{2} \Delta \hat{T}_{AC}^{0} \qquad \text{(en phase)} \tag{5}$$

$$Y = \frac{\alpha_{Pt} R_{ref} G \hat{I}}{2} \Delta \hat{T}_{AC}^{\, q} \quad (\text{en quadrature}) \tag{6}$$

 R_{ref} résistance de référence du fil de platine.

 α_{Pt} le coefficient de température de la résistivité électrique du platine que nous supposons constant dans le domaine de températures étudiées et qui vaut $\alpha_{Pt} = 3,92 \times 10^{-3} K^{-1}$.

 $\Delta \hat{T}_{AC}^{0}$ l'amplitude de la variation de la température du fil chauffant induite par la composante alternative du courant qui est en phase avec le signal d'excitation.

 $\Delta \hat{T}^{A}_{AC}$ l'amplitude de la variation de la température du fil chauffant induite par la composante alternative du courant qui est en quadrature de phase avec le signal d'excitation.

En ramenant l'expression de $\Delta \hat{T}_{AC}^{0}$ dans (5) on obtient [1] :

$$X = \frac{\alpha_{Pt}R_{ref}R(T)Gl^3}{8\pi\lambda L} \left(\frac{1}{2}\ln\frac{2\alpha}{a_1^2} - \gamma - \frac{1}{2}\ln\omega_0\right)$$
(7)

Avec α la diffusivité thermique du fluide.

 a_1 le rayon du fil.

 γ la constante d'Euler.

C'est l'expression (7) que nous avons utilisée pour déduire la conductivité thermique des liquides à partir de la mesure de X en faisant varier la fréquence d'excitation $v_0 = \omega_0/2\pi$

2.2.4. Balayage en fréquence

Pour déterminer la conductivité thermique à partir de (7), on réalise plusieurs mesures de X en faisant varier la fréquence d'excitation dans l'intervalle $]0, v_0^{\max}$ [. On trace ensuite X en fonction de v_0 en représentation logarithmique. La pente p_X de la partie linéaire de ce graphe permet de déterminer λ avec précision :

$$p_X = \frac{\alpha_{Pt} R_{ref} R(T_i) G I^3}{16\pi\lambda L} \tag{8}$$

 T_i la température fixée de fil.

2. Mesures

2.1. Matériel utilisé

Le matériel utilisé dans notre étude est le suivant : Fil de platine : fourni par la société PHYMEP/Paris, référence AMS 771000 (Teflon Insulated Platinum Wire). Il s'agit d'un fil de platine de grande pureté (99,99%) de rayon $a_1 = 25,4 \,\mu m$ protégé par une gaine en téflon. La longueur du fil est L = 2 cm. Le coefficient de température du platine vaut $\alpha_{Pt} = 3,92 \times 10^{-3} K^{-1}$. La résistance de référence du fil vaut $R_{ref} = 1,31 \,\Omega$. Glycérol : nous avons utilisé du glycérol pur à 99%.

2.2. Effet de la fraction volumique Φ

2.1.1. Résultats expérimentaux

Nous avons étudié l'effet de la fraction volumique sur les propriétés thermiques du nanofluide pour une température de 25 °C. Nous avons représenté figure 2 la variation de la conductivité thermique du nanofluide λ_{nf} avec la fraction volumique Φ , relativement à la conductivité thermique du glycérol pur λ_{gl} à la même température, pour des nanoparticules de 8 nm de diamètre.



Figure 2 : variation de la conductivité thermique relative $\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{gl}}$ en fonction de la fraction volumique Φ des nanoparticules de graphène au sein du glycérol

2.1.2. Analyse des résultats

Le modèle de Chon [25], qui tient compte de plusieurs paramètres pertinents du nanofluide, permet une description très satisfaisante de nos mesures. Chon a établit la corrélation (9) à partir des données publiées sur la conductivité thermique du nanofluide Al_2O_3/Eau . Pour faciliter la discussion, nous rappelons ici le modèle de Chon [6] écrit sous la forme :

$$\frac{\lambda_{nf}}{\lambda_{gl}} = 1 + 64,7\Phi^{a} \left(\frac{\mathrm{d}_{gl}}{\mathrm{d}_{np}}\right)^{b} \left(\frac{\lambda_{np}}{\lambda_{gl}}\right)^{c} Pr^{d}\mathrm{Re}^{e}$$
(9)

avec à 25 $^{\circ}\text{C}$:

• *Pr*= 12600 le nombre de Prandtl du glycérol ;

• $Re = \rho_{gl}K_BT/(3\pi\eta^2 d_{gl})$ le nombre de Reynolds associé au mouvement brownien des nanoparticules dans le glycérol [6];

- ρ_{gl} =1260 kg.m⁻³ : desnité du glycérol.
- $\eta = 1,49$ Pa. s : viscosité dynamique du glycérol.
- d_{ql} le libre parcours moyen des molécules de glycérol. Nous avons utilisé la valeur $d_{ql} = 0,47$ nm ;
- $d_{np} = 8$ nm le diamètre moyen des nanoparticules ;
- $\lambda_{gl} = 0$, 285 W/m.K la conductivité thermique du glycérol ;
- λ_{nf} la conductivité thermique du nanofluide que nous avons mesurée ;
- λ_{np} =5300 W/m.K la conductivité thermique du graphène ;
- $K_B = 1,381 \ 10^{-23} \ (J/K)$ la constante de Boltzmann.

Ce modèle a été utilisé par Chon pour modéliser la conductivité thermique du nanofluide eau/Al₂O₃. Les valeurs des paramètres a, b, c, d et e trouvées par Chon dans ce cas particulier sont : a =0,746 ; b =0,369 ; c=0,7476 ; d=0,9955 et e =1,2321 [6, 7].

Dans nos mesures nous obtenons les valeurs : a=0,746; b=0,369; c=0,7476; d=1,71 et e=1,208Mis à part d, les valeurs que nous obtenons pour les paramètres du modèle de Chon sont très proches de celles obtenues pour le nanofluide Al_2O_3/Eau .

Conclusion

Le modèle de Chon, qui contient les « ingrédients » physiques des transferts énergétiques au sein des nanofluides, est applicable pour décrire les propriétés thermiques du nanofluide graphène/Glycérol que nous avons étudié. En particulier nous avons observé que la conductivité thermique effective de ce nanofluide augmente avec la concentration en nanoparticules.

Les résultats obtenus avec ce nouveau système sont intéressants car l'augmentation de la conductivité thermique atteint des valeurs importantes : 220% et 40% respectivement pour des fractions volumiques aussi faibles que 1% et 0,1% de nanoparticules de 8 nm de diamètre.

Ces résultats sont tout à fait comparables à ceux obtenus avec certains nanofluides à base de nanotubes de carbone pour lesquels l'augmentation est de 200 % pour une fraction volumique de 0,35% [8].

Les résultats que nous avons obtenus ici tendent à relativiser l'influence du mouvement brownien dans l'amélioration de la conductivité thermique effective des nanofluides. La conduction thermique au sein du fluide et entre le fluide et les nanoparticules semble être le facteur dominant de cette amélioration.

Nomenclature

Symbole Nom, unité Symboles grecs Т température, K λ conductivité thermique, *W/m.K* η viscosité dynamique du fluide, kg/ms Φ fraction volumique (concentration) des nanoparticules α diffusivité thermique, $m^2 s^{-1}$ ρ densité du fluide (kg.m⁻³) Exposant, Indices nanoparticules np nf nanofluide glycérol gl

Références

 R. Heyd, A. Hadaoui, M. Fliyou, A. Koumina, L.H. Ameziane, A. Outzourhit et M.L. Saboungi, Development of absolute hot-wire anemometry by the 3ω method, Rev. Sci. Instrum 81:044901, page 1-6, 2010.
 S.W. Churchill, M. Bernstein, A correlation equation for forced convection from gases and liquids to a correlation equation for forced convection from gases and liquids to a circular cylinder in crossflow, J. Heat Transfer 99 (2), pages 300–306, 1997.

[3] L.V. King, The convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry, Philos. Trans. R. Soc. London A214, pages 373–432, 1914.

[4] W.S. Chung, O. Kwon, Du S. Choi, S. Park, Y.K. Choi, J.S. Lee, Tunable ac thermal anemometry, Superlatt. Microstruct. 35, pages 325–338, 2004.

[5] F. Chen, J.Shulman, Y. Xue, C. W. Chu, G. S. Nolas, Thermal conductivity measurement under hydrostatic pressure using the 3ω method, Rev. Sci. Instrum. 75, 4578 (2004).
[6] R. S. Vajjha, D. K. Das. Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and

development of new correlations. International Journal of Heat and Mass Transfer 52, 4675-4682, (2009).

[7] H. A. Mintsa, G. Roy, C. T. Nguyen, D. Doucet. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. International Journal of Thermal Sciences 48, pages 363-371, 2009.

[8] G. V. Casquillas. Contrôle de température et étude des transferts thermiques dans des dispositifs microfluidiques. Thèse de doctorat, Faculté des sciences d'Orsay, effectuée au Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, 2008.