

# Caractéristiques hydrodynamiques et transfert de chaleur par convection de nanofluides

**E. EBRAHIMNIA-BAJESTAN<sup>a</sup>, A. JAVADIAN-SARAF<sup>b</sup>,  
H. NIAZMAND<sup>c</sup>, P. ESTELLÉ<sup>d</sup>.**

a. Department of Energy, Institute of Science and High Technology and Environmental Science, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran,  
e.ebrahimnia@kgut.ac.ir

b. Department of Chemistry, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran,  
Aida.javadian@yahoo

c. Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran,  
Niazmand@um.ac.ir

d. LGCGM EA3913, Equipe Matériaux et Thermo-Rhéologie, Université Rennes 1, IUT de Rennes, patrice.estelle@univ-rennes1.fr

## Résumé :

*Cet article présente une étude expérimentale de transfert de chaleur par convection laminaire pour deux types de nanofluides circulant dans un tube chauffé uniformément. Les nanofluides préparés sont constitués de nanoparticules d'argent et d'oxyde de titane dispersées dans de l'eau. La conductivité thermique et la viscosité dynamique de ces nanofluides ont été mesurées et modélisées pour différentes températures et concentrations. De plus, le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge des nanofluides circulant dans le tube ont été mesurés pour différents nombres de Reynolds.*

*Les résultats expérimentaux montrent que le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge augmentent avec la concentration des nanoparticules et le nombre de Reynolds. Finalement, un critère a été introduit pour identifier les nanofluides appropriés pour leur utilisation dans les échangeurs de chaleur et les systèmes énergétiques.*

## Abstract :

*In this article an experimental study of laminar convective heat transfer for two types of nanofluids flowing through a uniformly heated tube is presented. The nanofluids consist of silver and titanium oxide nanoparticles dispersing into water. The thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids have been measured and modeled at different temperatures and concentrations. Moreover, the heat transfer coefficient and pressured drop of nanofluids flow inside the tube have been measured at different Reynolds numbers.*

*The results indicate that the heat transfer coefficient and pressured drop increase with nanoparticle concentration and Reynolds number. Finally, a criterion has been introduced to find the proper nanofluids for using in heat exchangers and energy systems.*

## **Mots clefs : Nanofluide, Transfert thermique par convection, Pertes de charge, Étude expérimentale**

### **1 Introduction**

Comme souligné dans plusieurs articles de synthèse [1-3], un grand nombre de travaux expérimentaux ont été menés sur le comportement thermique de différents types de nanofluides circulant dans diverses géométries d'échangeurs de chaleur. Ceci s'explique par les propriétés de conductivité thermique apportées par les nanoparticules dispersées dans des fluides de base. La majorité de ces travaux mettent en évidence que les corrélations classiques ne sont pas capables de prédire les caractéristiques supérieures de transfert de chaleur par convection de nanofluides. Cependant, les mécanismes d'amélioration de transfert de chaleur de nanofluides ne sont pas encore connus complètement et il n'existe pas à ce jour de modèle complet permettant de prédire les propriétés hydrodynamiques et de transfert de chaleur des nanofluides. Aussi, il convient d'effectuer davantage d'études expérimentales dans le domaine des transferts de chaleur de nanofluides.

Dans ce travail, le transfert de chaleur par convection laminaire de nanofluides Ag/eau et TiO<sub>2</sub>/eau dans un tube droit a été étudié expérimentalement. A ce jour, peu d'études ont été menées sur l'hydrodynamique et le transfert de chaleur de ces types de nanofluides. Dans un premier temps, la conductivité thermique et le comportement rhéologique de ces nanofluides sont étudiés et reportés.

### **2 Matériaux et dispositifs expérimentaux**

#### **2.1 Préparation des nanofluides**

Le nanofluide TiO<sub>2</sub>/eau est constitué de nanoparticules TiO<sub>2</sub> (DEGUSSA P25) d'un diamètre moyen de 21 nm dispersés dans l'eau et du surfactant CTAB (cetyl trimethyl ammonium bromide) et a été stabilisé à l'aide d'un bain à ultrasons pendant 3-5 heures.

Le nanofluide Ag/eau d'origine commerciale est synthétisé en une seule étape à partir de nanoparticules d'argent de 10nm de diamètre moyen. Les concentrations volumiques étudiées des nanoparticules sont 1%, 1.6% et 2.3% pour le nanofluide TiO<sub>2</sub>/eau et 0.17% pour le nanofluide Ag/eau.

#### **2.2 Appareils expérimentaux**

##### **2.2.1 Mesures de propriétés thermophysiques**

Un viscosimètre Cannon-Fenskea été utilisé pour mesurer les viscosités des nanofluides préparés aux différentes températures et concentrations en nanoparticules. Afin de mesurer les conductivités thermiques des nanofluides, un appareil utilisant le principe de la méthode du fil chaud transitoire a été utilisé [4]. Ces appareils ont été préalablement calibrés.

##### **2.2.2 Appareil de transferts thermiques convectifs**

Comme le montre la figure 1, un tube circulaire horizontal de 2m de long, de 7.8 mm de diamètre intérieur et de 1.8mm d'épaisseur a été développé pour étudier la convection forcée des nanofluides en régime laminaire. Des éléments chauffants 313W en caoutchouc de silicone ont été utilisés et disposés le long du tube pour le chauffer. Pour obtenir un flux de chaleur constant et uniforme le long du tube, celui-ci est recouvert de plusieurs couches de matériaux isolants.

Pendant les essais, les débits et les températures des fluides à l'entrée et la sortie du tube, ainsi que les températures de paroi aux dix différentes positions du long du tube ont été mesurés des thermocouples de type T. Les pertes de charge du tube ont été aussi mesurées. Pour l'ensemble des essais, la température d'entrée des nanofluides est de 22,5°C.

### 2.2.3 Incertitude

Les incertitudes de mesure pour la conductivité thermique, la viscosité, le coefficient myen d'échange de chaleur ainsi que les pertes de charges ont été évaluées respectivement à 0,00899 W/m<sup>2</sup>\*K (1.3%), 9,34×10<sup>-6</sup> Pa\*s (0.88%), 14,5 W/m<sup>2</sup>\*K (2.8%) et 0,003kPa (9%).

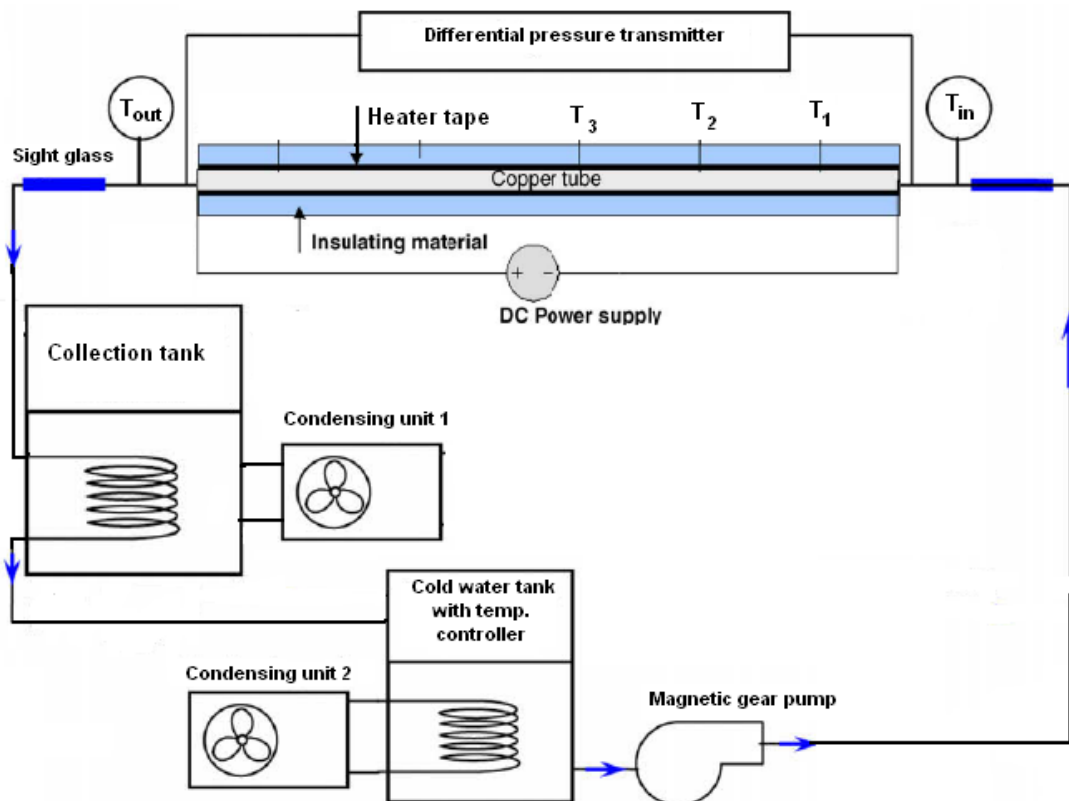


Figure 1. Schéma de l'appareil expérimental de transferts thermiques convectifs

## 3 Résultats and discussions

### 3.1 Propriétés thermophysiques

En raison de la très faible concentration en nanoparticules Ag, les données ont indiqué que le modèle classique d'Einstein (équation 1) est assez satisfaisant pour prédire la viscosité du nanofluide Ag/eau.

$$\mu_{nf} = (1 + 2.5 \varphi) \mu_f \quad (1)$$

Cependant, cette relation ne permet pas de reproduire l'évolution de la viscosité du nanofluide TiO<sub>2</sub>/eau. Par conséquent, un modèle semi-empirique, initialement proposé par Koo and Kleinstreuer [5] a été employé pour estimer la viscosité du nanofluide TiO<sub>2</sub>/eau. Ce modèle dépend de deux paramètres  $f$  et  $\beta$  qui sont obtenus à partir des mesures expérimentales dans notre étude comme suit.

$$\mu_{enf} = \mu_{static} + \mu_{Brownian} \quad (2)$$

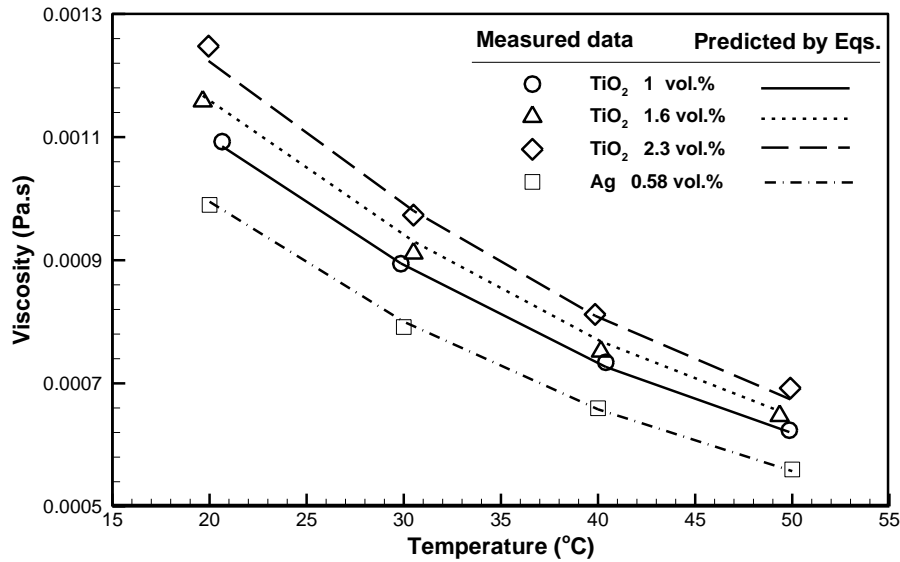
$$\mu_{static} = (1 + 2.5 \varphi) \mu_f \quad (2a)$$

$$\mu_{Brownian} = 5 \times 10^4 \beta \rho_f \varphi \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_p d_p}} f(\varphi, T) \quad (2b)$$

$$\beta = 0.0000308 \times (100\varphi)^2 - 0.0000287 \times (100\varphi) + 0.000834 \quad (2c)$$

$$f(\varphi, T) = (-0.4602 + 1.217\varphi)(T - 273.15) + (45.16 - 522.8\varphi) \quad (2d)$$

La figure 2 représente la comparaison entre les valeurs mesurées et les modèles des équations précédentes.



**Figure 2.** Valeurs expérimentales et modélisées de la viscosité des nanofluides pour différentes concentrations et températures.

De plus, et comme souvent observé dans la littérature, les mesures ont montré que la conductivité thermique de deux nanofluides est plus importante que celle du fluide de base même à faible concentration en nanoparticules. Comme pour la viscosité, Koo and Kleinstreuer [5] ont proposé un modèle semi-empirique afin de prédire l'évolution de la conductivité thermique de nanofluides. Ce modèle est défini par les équations (3)-(3b).

$$k_{nf} = k_{static} + k_{brownian} \quad (3)$$

$$k_{static} = \frac{k_p + 2k_f + 2\varphi(k_p - k_f)}{k_p + 2k_f - \varphi(k_p - k_f)} k_f \quad (3a)$$

$$k_{brownian} = 5 \times 10^4 \beta (\rho C_p)_f \varphi \sqrt{\frac{\kappa T}{\rho_p d_p}} f(\varphi, T) \quad (3b)$$

Les paramètres  $f$  et  $\beta$  ont été obtenus par l'ajustement du modèle sur les mesures expérimentales de notre étude pour les différentes températures et concentrations en nanoparticules. Ces paramètres s'expriment ici comme suit.

Pour le nanofluide Ag/eau:

$$\beta = 0.653 \times (100\varphi)^{0.01} \quad (3c)$$

$$f(\varphi, T) = (0.0000036075\varphi^{-0.91266})(T + 273.15)^{0.60187} \quad (3d)$$

Pour le nanofluide TiO<sub>2</sub>/ eau:

$$\beta = 0.000867 \times (100\varphi)^{-0.9475} \quad (3e)$$

$$f(\varphi, T) = (-0.4527\varphi - 0.02295)(T) + (128.1\varphi + 7.883) \quad (3f)$$

Les données expérimentales et les modèles précédents sont reportés sur la figure suivante, montrant le bon accord des modèles utilisés.

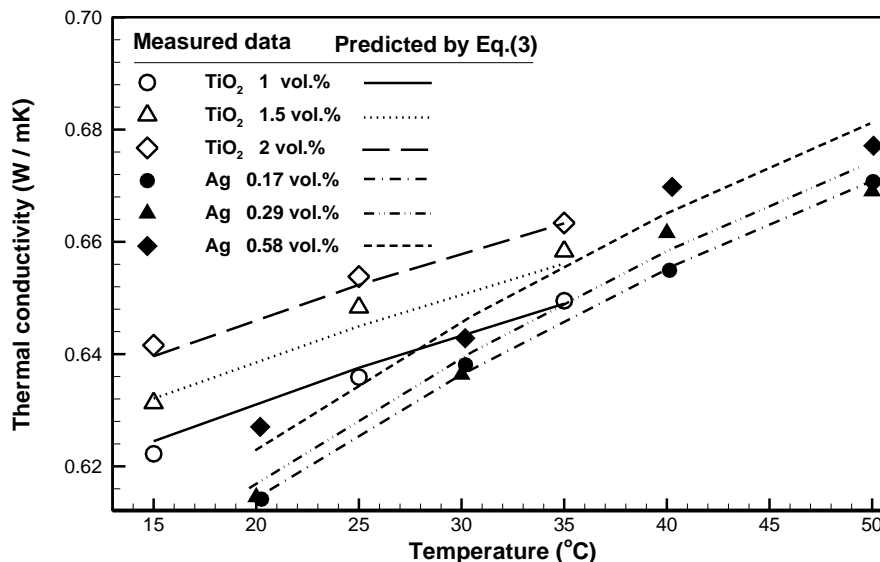


Figure 3. Valeurs expérimentales et modélisées de la conductivité thermique des nanofluides pour différentes concentrations et températures.

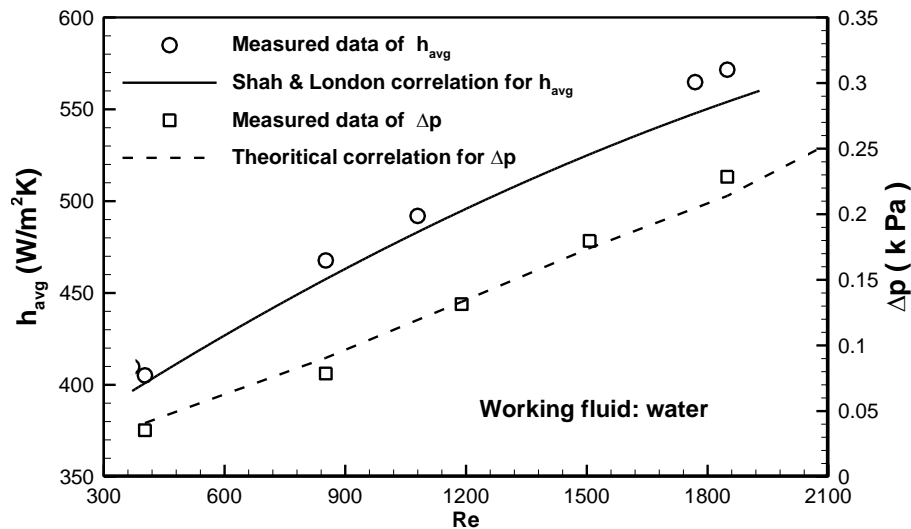
Il convient de mentionner que dans les équations ci-dessus, toutes les propriétés thermophysiques du fluide de base dépendent de la température. Dans cette étude, et pour la gamme de températures testées, les propriétés thermophysiques des nanoparticules ont été présumées constantes et égales aux valeurs définies dans le tableau 1.

Tableau1. Les propriétés thermophysiques des nanoparticules

Nanoparticules	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_p$ (J/kg·K)	$k$ (W/m·K)
TiO <sub>2</sub>	4157	710	8.4
Ag	10400	230	429

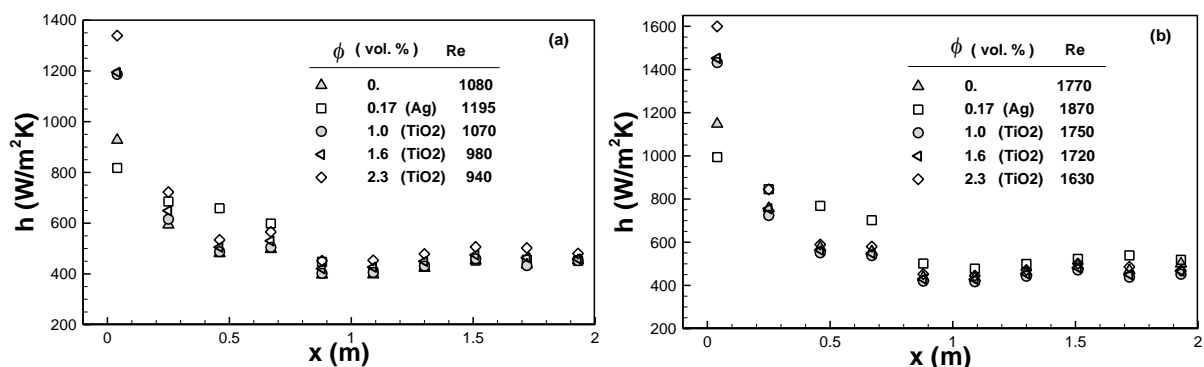
### 3.2 Transferts thermiques convectifs

Afin de vérifier la précision et la fiabilité de l'installation expérimentale, le coefficient de transfert de chaleur de l'eau a été comparé avec celui obtenu à partir de la corrélation de Shah et London [6]. De plus, les pertes de charge de l'eau dans le tube ont été comparées à la relation [6]  $\Delta p = \frac{64}{Re_{nf}} \frac{L_{pipe}}{D_{pipe}} (0.5 \rho_e \bar{V}^2)$ . Ainsi, comme le montre la Figure 4, les résultats expérimentaux de l'eau sont en accord raisonnable avec les valeurs théoriques, permettant ainsi de valider le dispositif expérimental.



**Figure 4.** Evolutions des résultats expérimentaux et théoriques de l'eau en fonction du nombre de Re pour le coefficient de transfert de chaleur et les pertes de charge.

La figure 5 montre les variations axiales du coefficient de transfert de chaleur aux différentes concentrations en particules et nombres de Reynolds. Les résultats indiquent que l'augmentation du transfert de chaleur des nanofluides est plus notable aux concentrations plus élevées et dans la région thermiquement en développement. Ces résultats sont conformes à ceux obtenus avec d'autres systèmes [7,8].



**Figure 5.** Coefficient de transfert de chaleur en fonction de la distance axiale en différents nanofluides et concentrations de particules et nombres de Reynolds : (a)  $Re \approx 1000$ ; (b)  $Re \approx 1700$ .

La figure 6 illustre l'évolution des pertes de charge dans le tube pour les différents nanofluides par rapport à celle de l'eau. Il est clair que les pertes de charge des nanofluides TiO<sub>2</sub>/eau sont considérablement plus grandes que celles du fluide de base. Cette augmentation considérable est liée à

la viscosité très élevée du nanofluid  $\text{TiO}_2/\text{eau}$ , qui est proportionnelle à la concentration des nanoparticules. On constate également que les pertes de charges sont corrélées à l'augmentation de  $\text{Re}$ . On constate ainsi que naturellement en utilisant des nanofluides l'augmentation des performances thermiques est accompagné de plusieurs effets défavorables comme l'augmentation des pertes de charge. Par conséquent, il est nécessaire de proposer un critère qui tient compte à la fois des performances thermiques mais aussi des propriétés hydrodynamiques afin de trouver des nanofluides appropriés pour diverses applications en situation réelles d'utilisation. Ce critère est introduit par le paramètre  $\eta$  défini comme le rapport du coefficient de transfert de chaleur moyen relatif ( $\bar{h}_{nf}/\bar{h}_f$ ) par rapport aux pertes de charge relatives ( $\Delta p_{nf}/\Delta p_f$ ) [7].

$$\eta = \frac{(\bar{h}_{nf}/\bar{h}_f)}{(\Delta p_{nf}/\Delta p_f)} \quad (4)$$

Comme le montre la figure 7, le paramètre  $\eta$  est inférieur à 1 sauf pour le nanofluid  $\text{Ag}/\text{eau}$ . Cela est dû au fait que la viscosité des nanofluides  $\text{TiO}_2/\text{eau}$  augment plus rapidement par rapport à la conductivité thermique quand la concentration des nanoparticules est augmentée. Cependant, dans le cas du nanofluid  $\text{Ag}/\text{eau}$  la conductivité thermique plus importante. Généralement, les avantages des nanofluides sont directement liés à l'amélioration de la conductivité thermique par l'ajout de nanoparticules, ce qui entraîne l'augmentation du transfert de chaleur comparée à la croissance de la viscosité qui provoque l'augmentation des pertes de charge. Ensuite, les synthèses des nanofluides de faible viscosité et de conductivité thermique élevée sont essentielles dans les applications de transfert de chaleur.

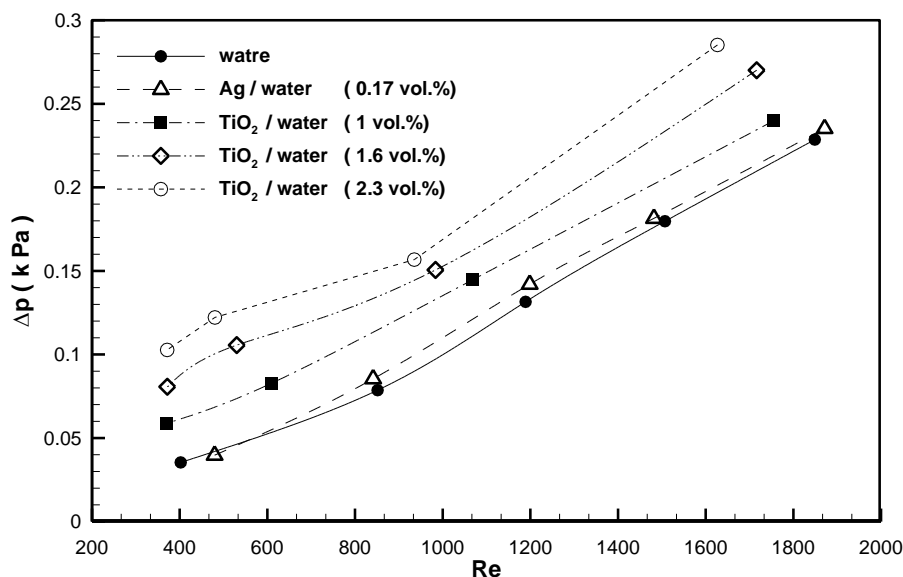


Figure 6. Pertes de charge en fonction du nombre de Reynolds pour les différents nanofluides et concentrations de particules

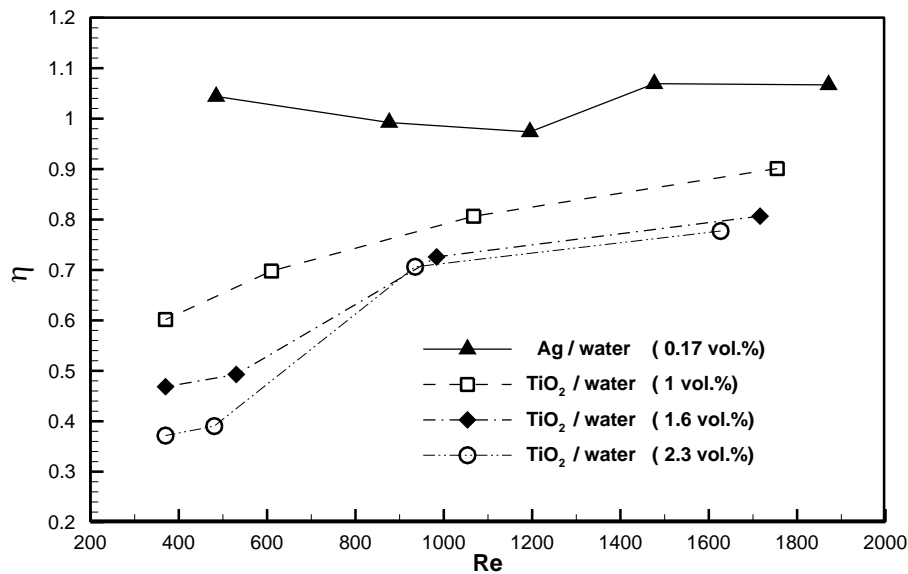


Figure 7. Rapport du coefficient de transfert de chaleur moyen relatif par rapport aux pertes de charge relatives pour les différents nanofluides

## 4 Conclusions

Cet article a présenté une étude expérimentale sur les performances de transfert de chaleur et les pertes de charge de nanofluides en écoulement dans un tube circulaire droit et chauffée uniformément en régime laminaire. La conductivité thermique et la viscosité des nanofluides TiO<sub>2</sub>/eau et Ag/eau ont été mesurées et modélisées. Les résultats ont indiqué que l'augmentation importante des pertes de charge peut compenser les gains thermiques et aboutir ainsi à un bilan énergétique défavorable. Finalement, un critère a été introduit pour les choix des nanofluides appropriés dans les applications de transfert de chaleur.

## Références

- [1] A.M. Hussein, K.V. Sharma, R.A. Bakar, K. Kadrigama, A review of forced convection heat transfer enhancement and hydrodynamic characteristics of a nanofluid, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 734-43.
- [2] F. Javadi, R. Saidur, M. Kamalifarvestani, Investigating performance improvement of solar collectors by using nanofluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28 (2013) 232-45.
- [3] L. Syam Sundar, M.K. Singh, Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20 (2013) 23-35.
- [4] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 33 (2009) 706-14.
- [5] J. Koo, C. Kleinstreuer, Laminar nanofluid flow in microheat-sinks, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48 (2005) 2652-2661.
- [6] R.K. Shah, A.L. London, *Laminar flow forced convection in ducts*, Academic Press, New York, 1978.
- [7] S. Ferrouillat, A. Bontemps, O. Poncelet, et al. ; Influence of nanoparticle shape factor on convective heat transfer and energetic performance of water-based SiO<sub>2</sub> and ZnO nanofluids, *Applied Thermal Engineering* 51 (2013) 839-851.



[8] S. Halefadi, P. Estellé, T. Maré, Heat transfer properties of aqueous carbon nanotubes nanofluids in coaxial heat exchanger under laminar regime, *Experimental Thermal and Fluid Science* 55 (2014) 174-180.