

Intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nanofluides SiO₂ / eau (partie 2)

João-Paulo RIBEIRO^{2*}, Sébastien FERROUILLAT¹, Biran WANG², Olivier SORIANO², Olivier PONCELET², Jean Antoine GRUSS², André BONTEMPS¹

¹ Université Joseph Fourier, Laboratoire des Écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI)
Domaine Universitaire BP 53, 38041 Grenoble Cedex 9

² CEA / LITEN / LETH - GRETh

17, avenue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex 9

* (auteur correspondant : joao-paulo.ribeiro@cea.fr)

Résumé - Cet article présente les résultats d'une étude expérimentale sur les performances des échanges convectifs de nanofluides à base d'eau (système SiO₂/eau) dans un tube en inox chauffé à flux imposé. Les régimes d'écoulements laminaire et turbulent sont étudiés. Le dispositif expérimental est décrit. Les résultats obtenus indiquent une amélioration notable des coefficients d'échange par rapport à ceux du fluide de base à iso-Reynolds. Ces résultats ont été comparés à ceux calculés par les corrélations standards et une discussion est proposée. Les pertes de pression sont examinées également. Enfin, dans le but d'évaluer le bénéfice des propriétés thermiques des nanofluides, un critère de performance énergétique est proposé et étudié.

Nomenclature

C_p capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$

k conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$

L longueur du tube, m

•

\dot{m} débit massique, kg/s

Nu nombre de Nusselt

Pr nombre de Prandtl

q densité de flux, W/m^2

Re nombre de Reynolds

S section du tube, m^2

T_i thermocouple i

T température, $^{\circ}C$

u vitesse moyenne du fluide, m/s

•

\dot{v} débit volumique, m^3/s

x position dans le tube, m

Symboles grecs

Δp perte de pression, Pa

Λ coefficient de Darcy

μ viscosité dynamique, $Pa.s$

ρ masse volumique, kg/m^3

Indices et exposants

e entrée du tube

f fluide de base (de référence)

i interne

nf nanofluide

p paroi

s sortie du tube

1. Introduction

Des solutions colloïdales (appelées nanofluides), composées de particules de taille nanométrique (1-100 nm) en suspension dans un liquide caloporteur, ont été préparées récemment dans le but d'améliorer les propriétés thermiques du fluide (cf. article partie 1). Un grand nombre d'équipes de recherche ont étudié les conductivités thermiques de ces solutions et ont développé des modèles théoriques afin d'expliquer les améliorations observées [1, 2]. Néanmoins, dans le but de prédire les avantages de ces fluides innovants dans des applications thermiques, la seule considération de la conductivité thermique est insuffisante et d'autres critères doivent être pris en compte : le coefficient d'échange thermique et la perte de pression. Cet article présente alors les résultats d'une étude expérimentale sur les

performances des échanges convectifs de nanofluides à base de nanoparticule de silice et d'eau (système SiO₂/eau) dans un tube chauffé à flux imposé.

Peu d'auteurs ont travaillé à ce sujet et seulement quelques modèles ont pu être proposés. En général, les corrélations standards utilisées pour l'étude du coefficient d'échange des fluides s'écoulant dans un tube chauffé sont les corrélations de Shah (forme locale) pour les écoulements laminaires [3] et la corrélation de Dittus-Boelter pour les écoulements turbulents [4]. Dans le cas des nanofluides, quelques auteurs ont employé des corrélations standards modifiées [5-7]. Cependant, ces équations ne sont pas universelles car elles ne considèrent pas les caractéristiques qui résultent de la nature dispersée des nanofluides. Par conséquent, le fait de généraliser ces résultats à d'autres types de nanofluides n'est pas possible. Enfin, d'autres modèles sont fondés sur l'hypothèse que le transfert de chaleur des nanofluides résulte de deux effets : l'action de la conductivité thermique d'une part et l'action due à la dispersion des nanoparticules [8].

2. Caractérisation des nanofluides

Pour notre étude, ce sont des nanoparticules de silice (SiO₂) et de l'eau déminéralisée qui ont été choisies respectivement comme phase dispersée et milieu de dispersion (voir article partie 1). Les nanoparticules de silice présentent des avantages en terme de stabilité thermique, de dispersabilité et de compatibilité chimique avec le milieu aqueux [2, 9]. Les nanofluides ont été préparés à partir d'une solution commerciale (Ludox® TMA) dont la fraction massique en nanoparticules est de 34 %. Trois solutions ont été employées pour notre étude : la solution-mère (34 %), puis après dilution, 16 et 5 %. Dans le cadre de notre étude, les propriétés physiques des nanofluides ont été mesurées (voir article partie 1).

3. Dispositif expérimental

3.1. Description du banc d'essais

Les mesures ont été effectuées dans une boucle d'essais, représentée schématiquement sur la figure 1. Elle est composée d'un circuit fluide, d'une unité de chauffage, d'un groupe de régulation de température et d'une unité de contrôle et d'acquisition des mesures. Le circuit fluide inclut une pompe à engrenages relié à un débitmètre massique à effet Coriolis, un vase d'expansion servant également comme réservoir à fluide et une section d'essai verticale. Cette section d'essai se présente comme un tube fin en inox AISI316L d'une longueur $L = 500 \text{ mm}$, de diamètre interne $d_i = 1,28 \text{ mm}$ et de diamètre externe $d_{ext} = 1,49 \text{ mm}$. L'ensemble de la section d'essai est chauffé à l'aide de fils de cuivre brasés aux extrémités du tube et reliés à un générateur de tension et de courant qui génère une puissance électrique maximale de 625 W (chauffage uniforme par effet Joule). Dix thermocouples (T_i), de type T, sont fixés à l'extérieur du tube (paroi externe) dans le sens de la longueur. Le tableau 1 indique la position longitudinale de chaque thermocouple.

T_i	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
Position longitudinale (x, mm)	5	56	110	168	222	279	333	389	444	485
x/d_i	4	44	86	131	173	218	260	304	347	379

Tableau 1 : Position des thermocouples

Deux sondes thermométriques (Pt100) sont placées en entrée et en sortie du tube au sein même de l'écoulement. Ces sondes permettent la mesure de la température du fluide en entrée et en sortie du tube (respectivement T_e et T_s). En outre, des capteurs de pression sont placés

également en entrée et en sortie du tube afin de mesurer la perte de pression due à l'écoulement du fluide au sein du tube. Afin de contrôler la température du fluide dans le circuit, la boucle dispose d'un circuit parallèle comprenant un échangeur et un thermostat à régulation active muni d'un bac rempli d'eau.

Avant les expériences, le débitmètre, les capteurs de pression et les sondes Pt100 ont été étalonnés. Les incertitudes obtenues sont inférieures à 5 % sur la gamme de mesure. Les thermocouples ont été étalonnés in situ, l'incertitude de la chaîne de mesure est évaluée de ± 0.4 °C.

3.2. Traitements des données

Le coefficient d'échange local h est défini de la manière suivante :

$$h(x) = \frac{q}{(T_p(x) - T(x))} \quad (1)$$

Le coefficient d'échange h peut être exprimé en fonction du nombre de Nusselt Nu :

$$h(x) = \frac{Nu(x)k_{nf}}{d_i} \quad (2)$$

Le nombre de Nusselt est associé au nombre de Reynolds Re :

$$Re = \frac{\dot{m}.d_i}{S.\mu} \quad (3)$$

Afin de décrire les pertes de pression observées dans nos expériences, nous avons calculé le coefficient de Darcy Λ :

$$\Lambda_{\text{exp}} = \left(\frac{\Delta p}{\rho \cdot \frac{u^2}{2}} - K_r - K_e \right) \cdot \left(\frac{d_i}{L} \right) \quad (4)$$

K_r and K_e sont les coefficients de perte de charge dus à la présence d'un rétrécissement et d'un élargissement du tube respectivement à l'entrée et à la sortie de la section d'essais [4].

Préalablement aux essais sur les nanofluides, la boucle a été testée avec de l'eau déminéralisée. La conformité des résultats expérimentaux avec ceux des corrélations nous a garanti la qualité des mesures effectuées au sein de la boucle.

4. Résultats et discussions

4.1. Coefficient d'échange

Avec nos mesures, nous pouvons déterminer un coefficient d'amélioration sur le coefficient d'échange. En effet, en calculant le rapport du coefficient d'échange du nanofluide sur celui du liquide de base (eau déminéralisée) dans les mêmes conditions, un critère de performance thermique des nanofluides peut être défini (figure 2).

En général, les nanofluides étudiés ne présentent pas d'améliorations significatives en régime laminaire. Néanmoins, la solution la plus concentrée (34 %) présente des améliorations non négligeables (autour de 20% d'amélioration à $Re > 500$). Pour les écoulements à hauts nombres de Reynolds, des intensifications des transferts de chaleur sont

observées. Ces améliorations sont plus significatives pour les solutions les plus concentrées. On observe pour la solution à 5% de nanoparticules une augmentation de 30 % du coefficient d'échange, alors qu'elles sont de 30 % à 100 % pour la solution concentrée à 34%. Les figures 3 et 4 montrent le nombre de Nusselt expérimental en fonction de celui calculé par les corrélations. Nous pouvons alors voir que le nombre de Nusselt est correctement prédit par les corrélations standards à $\pm 15\%$ si les propriétés du nanofluide sont utilisées pour le calcul des nombres de Reynolds et de Nusselt.

Par conséquent, les effets dus à la présence des nanoparticules, comme le mouvement brownien ou la micro-convection, ne semblent pas entraîner des phénomènes anormaux sur les échanges de chaleur contrairement à certaines théories. Par conséquent, les nanofluides à base de silice peuvent être considérés comme des fluides standards monophasiques. Plusieurs auteurs ont également montré que la présence de nanoparticules sphériques dans des solutions n'occasionne pas de phénomènes anormaux sur les échanges convectifs [11, 12].

4.2. Comportement hydraulique

Dans le but d'étudier le comportement hydraulique des nanofluides, nous avons déterminé les coefficients de Darcy expérimentaux (relation (4)). Les résultats sont représentés dans la figure 5 avec les corrélations standards (loi de Poiseuille pour le régime laminaire et loi de Blasius pour le régime turbulent) [4]. Pour tous les nanofluides étudiés, le comportement hydraulique semble conforme aux approches théoriques. La présence des nanoparticules dans l'eau s'écoulant au sein du tube à différents débits ne semble pas modifier les propriétés de l'écoulement, notamment les propriétés de surface. Le comportement hydraulique peut donc être prédit correctement en utilisant les propriétés physiques du nanofluide.

En comparaison avec la partie 1 de l'article, il a été démontré que les améliorations des coefficients d'échange suivaient les mêmes tendances. Quelles que soient les conditions considérées en paroi de la section d'essais, les performances thermiques sont similaires. Dans le cas du flux imposé, il a été montré que le nombre de Nusselt pouvait être calculé en utilisant les corrélations standards. Néanmoins, l'étude à long terme des performances des nanofluides, dans le cas où la température de paroi est imposée, a montré une augmentation au cours du temps du coefficient d'échange et de la perte de pression. Ces augmentations sont supposées provenir d'un dépôt de particules sur la paroi du tube. Des visualisations et des études à long terme sont en cours dans notre laboratoire afin d'expliquer ces observations.

4.3. Critère de performance énergétique

Les résultats des nanofluides SiO₂/eau sont apparemment très prometteurs du fait leurs performances thermiques. Cependant, l'augmentation importante de la viscosité dynamique (et cinématique) des nanofluides (voir article 1) implique nécessairement une augmentation des pertes de pression au sein du système. Par conséquent, même si une intensification des transferts de chaleur est observée, la puissance de pompage requise est augmentée en comparaison à celle du cas de l'eau seule. C'est la raison pour laquelle une augmentation significative de la viscosité du nanofluide peut entraîner un bilan énergétique défavorable du système. Pour illustrer cela, nous avons défini un critère de performance énergétique (PEC) fondé sur une approche énergétique globale :

$$PEC = \frac{\dot{m} \cdot C_p (T_s - T_e)}{\dot{v} \cdot \Delta P} \quad (5)$$

Il représente le rapport entre la puissance thermique échangée avec le fluide et la puissance de pompage requise. Notons que ce critère est fondé sur l'hypothèse que les pertes thermiques

sont négligeables, cette hypothèse a été vérifiée expérimentalement. La figure 6 montre l'évolution de ce critère énergétique en fonction du débit volumique dans le cas de l'eau et des nanofluides SiO₂/eau. Nous pouvons remarquer que la grande majorité des mesures est bien en-dessous de la ligne correspondant au cas de l'eau, ce qui signifie que le bilan énergétique des nanofluides étudiés est défavorable quelles que soient les conditions de fonctionnement. Par conséquent, les performances thermiques des nanofluides observées dans cet article ne peuvent être atteintes qu'à condition d'une dépense énergétique supplémentaire. En outre, pour les débits les plus forts et les solutions les moins concentrées, le critère énergétique semble s'améliorer. Nous avons prévu d'améliorer les performances de notre installation expérimentale afin d'étudier le comportement énergétique des nanofluides en régime pleinement turbulent. On peut espérer atteindre dans ces régimes un bilan énergétique plus favorable.

5. Conclusions et perspectives

Les études engagées au CEA-LETh ont permis d'établir des résultats prometteurs concernant les propriétés thermo-convectives des nanofluides. En effet, des études menées sur une famille de nanofluides ont révélé des augmentations des transferts thermiques de nanofluide dans des conditions d'écoulement et de concentration en nanoparticules données. En outre, il a été observé que les effets dus à la présence des nanoparticules n'occasionnent pas de phénomènes anormaux comme prévu par quelques théories. Par conséquent, en convection forcée, les nanofluides SiO₂/eau étudiés (à base de nanoparticules sphériques) semblent se comporter comme des fluides standards, dont les propriétés thermo-convectives sont prédictibles par des corrélations usuelles si l'on utilise dans ces corrélations leurs propriétés thermo-physiques mesurées.

Cependant, l'avantage de l'emploi des nanofluides en tant que fluides caloporteurs dépend fortement d'un compromis entre l'augmentation de la conductivité thermique (déterminant dans l'intensification des transferts thermiques convectifs) et l'augmentation de la viscosité (déterminant dans l'augmentation indésirable de la puissance de pompage). Les futures recherches devront donc être dirigées vers la sélection de matériaux, de forme et de taille de nanoparticules qui augmenteraient la conductivité thermique du mélange avec une augmentation modérée de la viscosité. Par exemple, l'usage de particules non-sphériques conférant un caractère rhéofluidifiant au mélange est une voie à explorer. En outre, les futures recherches devront également prendre en compte l'encrassement éventuel des conduites par les nanofluides et d'en étudier les causes.

Références

- [1] Yu, W.; France, D.; Routbort, J.; Choi, S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements. *Heat Transfer engineering* 29[5], 432-460. 2008.
- [2] Das, S.; Choi, S.; Yu, W.; Pradeep, T. *Nanofluids: Science and Technology*; J Wiley : 2008.
- [3] Bejan, A.; *Convection Heat Transfer*, Second Edition, Wiley Inter. Science - 1995
- [4] GRETh *Manuel Technique GRETh*; GRETh: 1987.
- [5] Pak, B.; Cho, Y. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. *Experimental heat transfer* 11[2], 151-170. 1998.
- [6] Maiga, S.; Nguyen, C.; Galanis, N.; Roy, G.; Maré, T.; Coqueux, M. Heat transfer enhancement in turbulent tube flow using Al₂O₃ nanoparticle suspension. *International Journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow* 16[3], 275-292. 2006.
- [7] Wang, X.; Xu, X.; Choi, S. Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. *Journal of Thermophysics and heat transfer* 13[4], 474-480. 1999.
- [8] Xuan, Y.; Roetzel, W. Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. *Int J. Heat Mass Transfer* 43[19], 3701-3707. 2000.

[9] Yu, W.; France, D.; Choi, S.; Routbort, J. Review and Assessment of Nanofluid Technology for Transportation and Other Applications. ANL/ESD/07-9. 2007.

[10] Rohsenow, W.; Hartnett, J.; Ganic, E. *Handbook of Heat Transfer Fundamentals*; Mc Graw Hill: 1985.

[11] W. Williams, J. Buongiorno, L.W. Hu, Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in horizontal tube, *Journal of Heat Transfer*, vol. 130, Issue 4, 2008.

[12] U. Rea, T. McKrell, L.W. Hu, J. Buongiorno, Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au financement d'une part du Programme inter-disciplinaire Energie « Microcond » du CNRS et d'autre part de l'ADEME sous la convention 0566C0066.

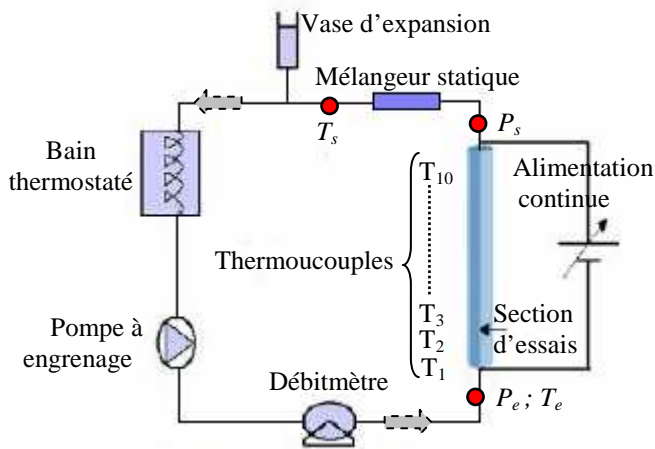


Figure 1 : La boucle d'essais

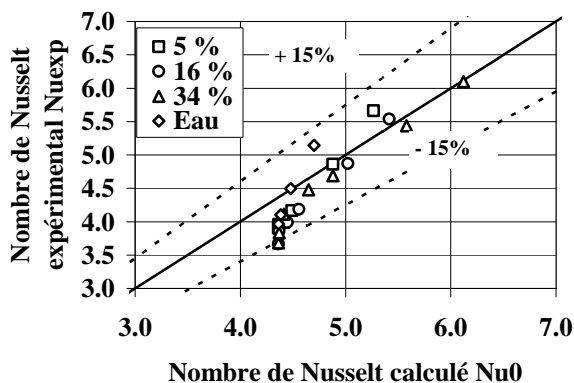


Figure 3 : Nombre de Nusselt expérimental fonction du nombre de Nusselt calculé dans le cas du régime laminaire (corrélations de Shah)

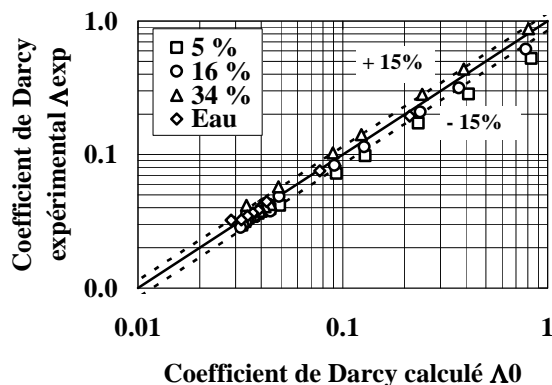


Figure 5 : Coefficient de Darcy expérimental en fonction de celui issu des corrélations

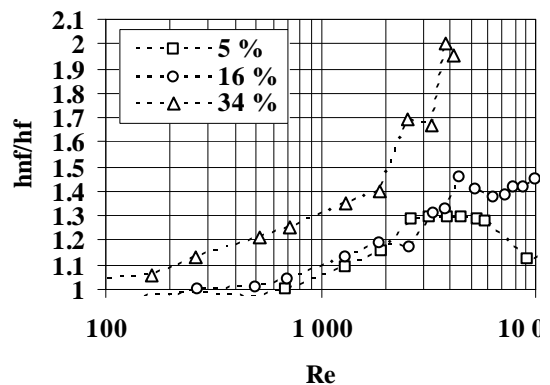


Figure 2 : Améliorations du coefficient d'échange en fonction du nombre de Reynolds (à $x/di=304$)

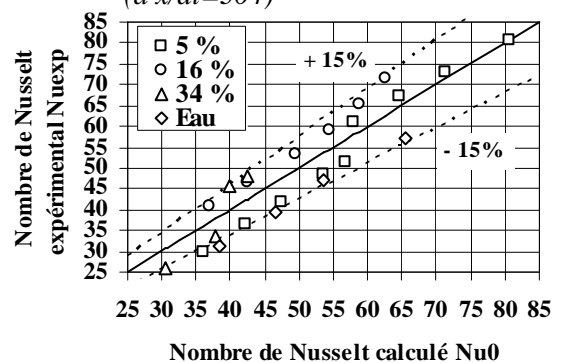


Figure 4 : Nombre de Nusselt expérimental fonction du nombre de Nusselt calculé dans le cas du régime turbulent (corrélation de Dittus-Boelter)

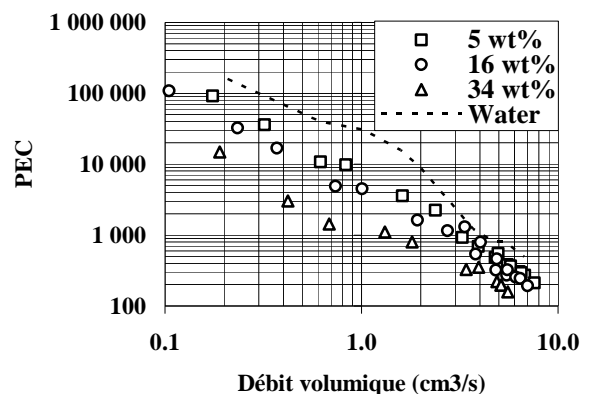


Figure 6 : Evolution du PEC en fonction du débit volumique