

Influence du facteur de forme des nanoparticules sur les performances thermiques d'un nanofluide

Sébastien FERROUILLAT¹, André BONTEMPS^{1*}, Jean Antoine GRUSS², Olivier PONCELET², Olivier SORIANO²

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

² CEA / LITEN / LETH & LCSN

17, avenue des Martyrs 38054 Grenoble Cedex 9

* (auteur correspondant : andre.bontemps@cea.fr)

Résumé - Cet article présente les performances thermo-hydrauliques d'un nanofluide à base de silice recouverte d'argent et d'eau dans un échangeur coaxial cylindrique à température de paroi imposée. Dans cette étude nous avons mesuré les coefficients d'échange thermique en convection forcée pour deux nanofluides à facteur de forme n différents. Le premier correspond à une solution (5% massique) de nanoparticules sphériques de silice recouvertes d'argent, le second à des nanoparticules longilignes. L'analyse des performances thermiques a été réalisée en utilisant les propriétés physiques mesurées (masse volumique, capacité thermique massique, conductivité thermique, viscosité dynamique). Les mesures de perte de pression ont également été mesurées pour déterminer le coefficient de performance (PEC) défini par le rapport puissance thermique échangée / puissance de pompage. Les résultats mettent en évidence que sous certaines conditions le coefficient d'échange est augmenté sans nuire significativement à la puissance de pompage requise.

Nomenclature

C_p	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	T	température, K
d	diamètre des nanoparticules, m	<i>Symboles grec</i>	
d_h	diamètre hydraulique du tube interne, m	ΔP	différence de pression, Pa
h	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	λ	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
l	longueur des nanoparticules, m	Λ	coefficient de perte de charge régulière
\dot{m}	débit massique, $kg.s^{-1}$	μ	viscosité dynamique, $Pa.s$
Nu	nombre de Nusselt	\dot{v}	débit volumique, $m^3.s^{-1}$
n	facteur de forme	ρ	masse volumique, $kg.m^{-3}$
Re	nombre de Reynolds	ψ	sphéricité de la nanoparticule
S_{pi}	section de passage du tube interne, m^2		

1. Introduction

Dans le calcul des coefficients d'échanges thermiques et des pertes de pression dans un échangeur de chaleur les propriétés thermophysiques des fluides jouent un rôle essentiel. L'introduction de nanoparticules dans le fluide permet d'en augmenter la conductivité thermique mais peut en accroître sensiblement la viscosité. Cette augmentation peut être telle que le gain dans le flux transféré peut être annulé par une puissance de pompage trop importante. Le développement d'un nanofluide requiert donc une approche globale dans laquelle l'influence des propriétés thermophysiques devra être optimisée. De plus, ces propriétés devront rester stables en écoulement. Il a été montré que la forme des nanoparticules avait une influence sur les propriétés thermophysiques d'une suspension colloïdale [1]. Les mesures de la conductivité des nanofluides ont montré que pour des particules sphériques la relation de Maxwell-Eucken permettait de rendre compte correctement des valeurs obtenues. Pour des particules non sphériques l'approche de

Hamilton-Crosser [2] permet de prendre en compte le facteur de forme défini par $n = 3/\psi$, où ψ est la sphéricité de la particule. Les mesures de viscosité ont également montré une forte influence du facteur de forme mais il n'y pas de théorie générale permettant de prédire le comportement du nanofluide.

L'influence du facteur de forme sur les performances thermiques d'un nanofluide en écoulement a été peu étudiée. Dans cette communication nous présentons les résultats obtenus avec des nanoparticules de même composition mais de forme différente.

2. Caractérisation du nanofluide

2.1. Choix du nanofluide

Une précédente étude a permis de caractériser l'influence de la concentration de nanofluide à base de silice sur ses performances thermo-hydrauliques [3, 4]. Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de choisir un nanofluide à base de silice poreuse recouvert d'une couche d'argent préparé par le LCSN du CEA de Grenoble. La synthèse de cette silice poreuse a été réalisée afin d'obtenir deux facteurs de forme différents.

Le premier nanofluide préparé correspond à une solution (5 % massique) de nanoparticules sphériques de silice recouvertes d'argent, le second à des nanoparticules longilignes (5 % massique). D'après la définition du facteur de forme de Hamilton-Crosser, les facteurs de forme sont respectivement $n = 3$ (avec $\psi = 1$ pour une sphère) et $n = 4$ à 5 d'après les images de la figure 1 (avec $n = (12l/d)^{1/3}$, l la longueur et d le diamètre caractéristique des nanoparticules longilignes). Les nanoparticules de silice à facteur de forme ont été synthétisées par voie sol-gel en présence d'un agent tensio-actif. Cette voie de synthèse présente deux avantages qui sont celui de pouvoir contrôler précisément le facteur de forme des nanoparticules (sphères ou bâtonnets) en agissant sur le rapport organosilane/alcoxyde de silicium. L'autre avantage étant la possibilité de produire en grande quantité des nanoparticules, ce qui a permis de préparer des nanofluides contenant des charges massiques importantes en nanoparticules. Le titre massique en nanoparticules des nanofluides préparés est déterminé par gravimétrie. La microscopie à transmission faite sur des échantillons après passage dans les boucles thermiques a montré que la morphologie des nanoparticules n'a pas été affectée.

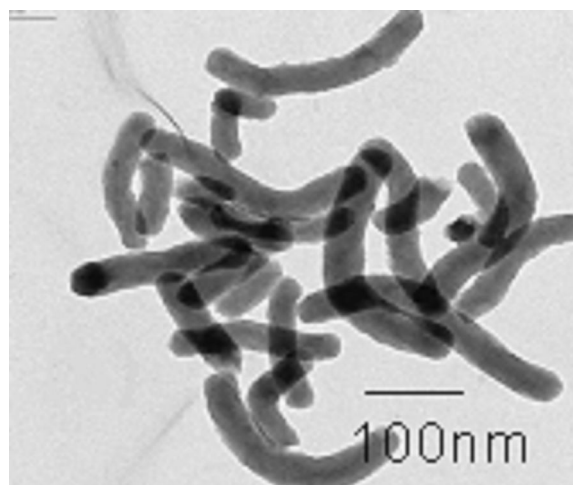


Figure 1 : Images des nanoparticules de silice à facteur de forme obtenues par Microscopie Électronique à Transmission

2.2. Propriétés physiques

Pour pallier le manque de modèles prédictifs des propriétés physiques, en particulier de la viscosité dynamique, les propriétés physiques sont systématiquement mesurées. Les figures 2 et 3 présentent les mesures de viscosité dynamique et de conductivité thermique réalisées. On remarque que la viscosité dynamique et la conductivité thermique des deux types de nanofluides sont comparables.

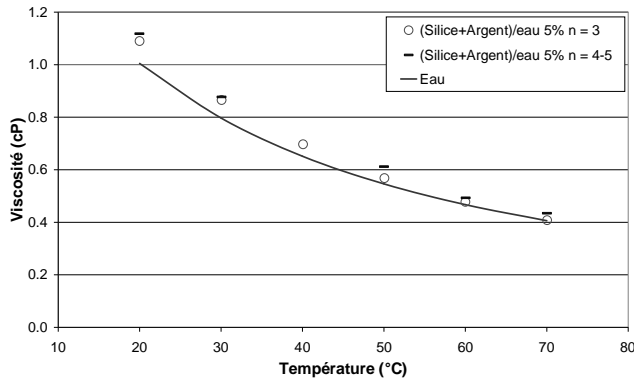


Figure 2: Viscosité en fonction de la température

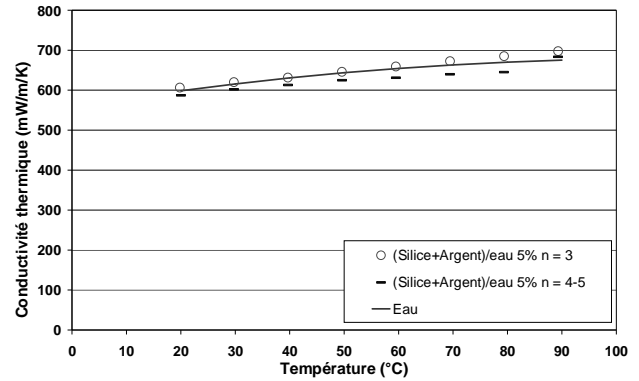


Figure 3: Conductivité thermique en fonction de la température

3. Moyens expérimentaux

Les performances thermo hydrauliques des nanofluides sont étudiées sur un banc d'essais permettant de modifier le gradient de température près de la paroi, à la fois en mode chauffage et en mode refroidissement du nanofluide (Figure 4).

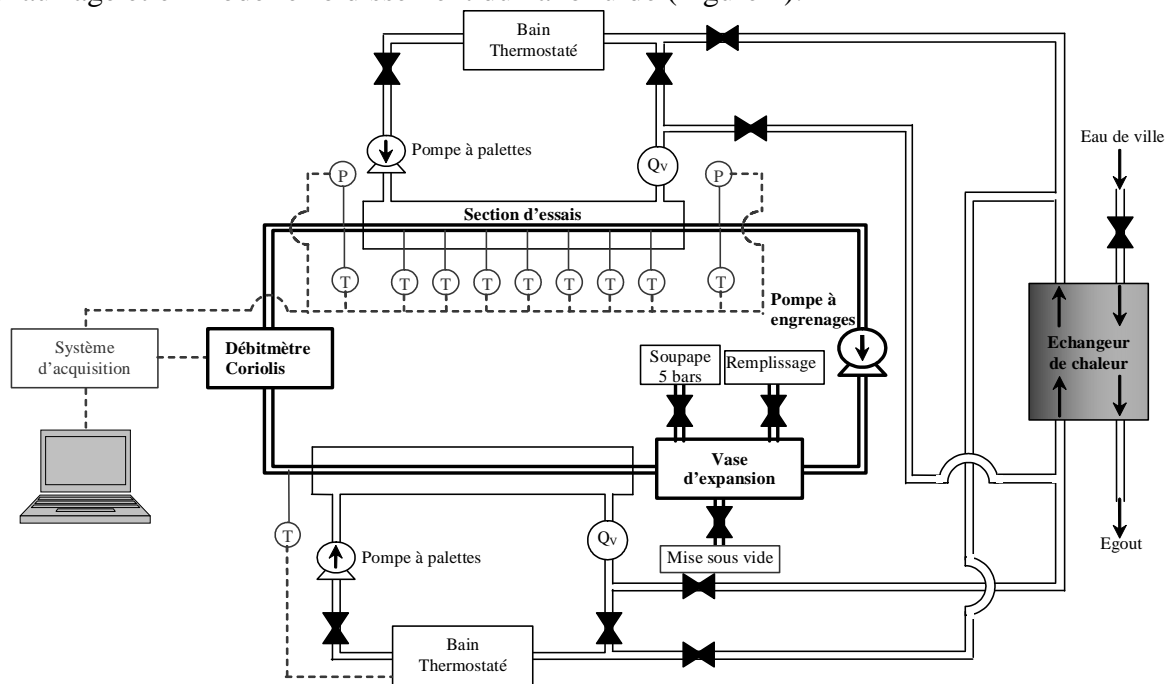


Figure 4 : Schéma fonctionnel du banc d'essais

L'échangeur de chaleur coaxial (section d'essais) est composé d'un tube primaire d'alliage de cuivre (CuA1) de 0,5 m de long, 4 mm de diamètre intérieur, 1 mm d'épaisseur, et d'un tube secondaire en acier inoxydable de 10 mm de diamètre intérieur et 1 mm d'épaisseur. Le nanofluide circule dans le tube intérieur et le fluide caloporteur (eau déminéralisée) dans l'espace annulaire. La température d'entrée du nanofluide peut varier entre 15 et 80 °C. Le

fluide caloporteur est mis en mouvement avec un débit très important pour imposer sa température à la paroi. La température de ce fluide caloporteur peut également varier dans la même fourchette de température (15 à 80 °C). Ceci permet de modifier le gradient de température entre le fluide et la paroi. Les détails de l'instrumentation de ces moyens expérimentaux ont été présentés dans une précédente communication de la SFT 2009 [3].

4. Résultats et discussions

Dans un premier temps, afin de valider les moyens expérimentaux, des essais ont été effectués avec de l'eau déminéralisée dans le circuit primaire. Ensuite, des essais avec les deux nanofluides préparés ont été effectués avec deux conditions de gradient de température en paroi :

- chauffage (nanofluide entrant à 20 °C avec une température de paroi imposée à 50 °C),
- refroidissement (nanofluide entrant à 50 °C avec une température de paroi imposée à 20 °C).

4.1. Résultats hydrauliques

La perte de pression mesurée ΔP a permis de déduire le coefficient de perte de charge

$$\text{régulière : } \Lambda = 2 \Delta P \frac{d_h \rho S_{pi}^2}{L \dot{m}^2} \quad (2)$$

La représentation graphique de ce coefficient en fonction du nombre de Reynolds ($Re = 4 \dot{m} / \pi d_h \mu$) pour les conditions de refroidissement (Figure 5) et de chauffage (Figure 6) permet de constater que ce dernier semble inférieur pour le nanofluide avec des particules ayant un facteur de forme de $n = 4-5$ en comparaison du fluide avec des particules sphériques ($n = 3$). L'énergie à fournir pour mettre en mouvement un nanofluide avec un facteur de forme important semble donc plus faible que pour un nanofluide de forme sphérique.

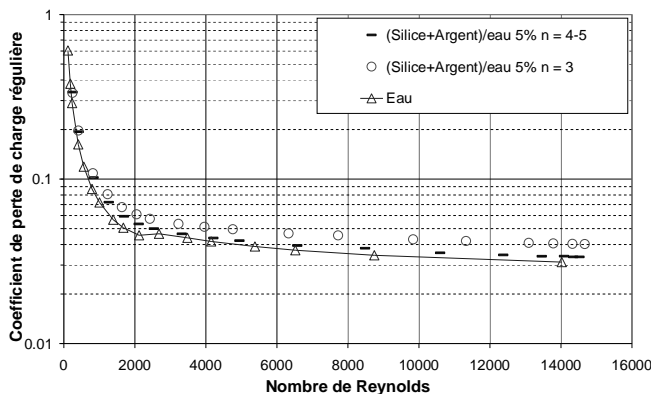


Figure 5: Coefficient de perte de charge régulière en fonction du nombre de Reynolds - Condition de refroidissement

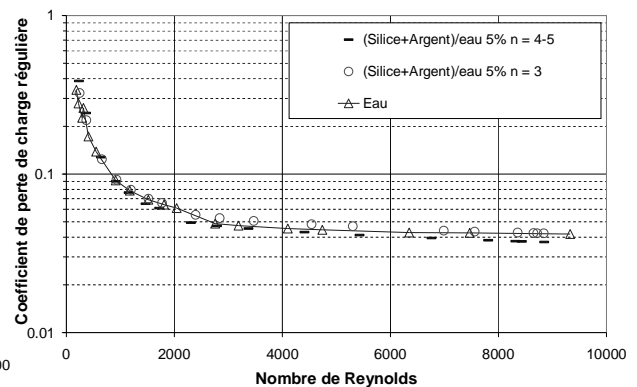


Figure 6: Coefficient de perte de charge régulière en fonction du nombre de Reynolds - Condition de chauffage

4.2. Résultats thermiques

Le bilan thermique global sur la section d'essais permet de déterminer le coefficient d'échange thermique du nanofluide h . Le nombre de Nusselt peut alors être déduit par :

$$Nu = \frac{h d_h}{\lambda} \quad (3)$$

Les résultats thermiques, représenté graphiquement par le nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds pour les conditions de refroidissement (Figure 7) et de chauffage (Figure 8) permettent de constater une amélioration des performances avec les deux nanofluides (jusqu'à 25 % d'intensification dans les conditions de chauffage). L'influence du facteur de forme sur l'intensification des transferts thermiques ne semble pas significative à la vue de ces résultats.

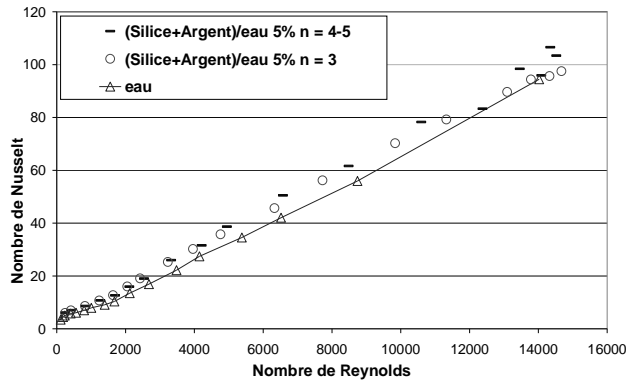


Figure 7: Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds - Condition de refroidissement

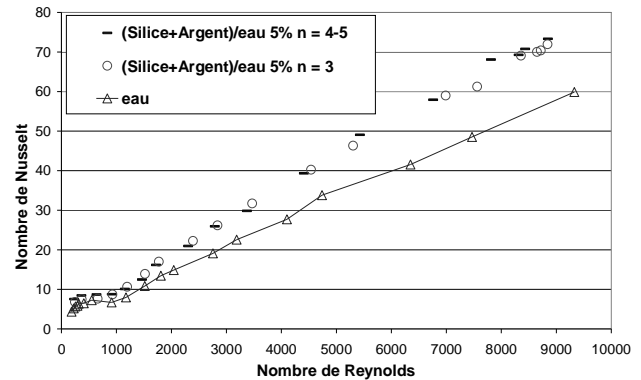


Figure 8: Nombre de Nusselt en fonction du nombre de Reynolds - Condition de chauffage

4.3. Critère de performance énergétique

Le choix d'un nanofluide ne doit pas être dicté uniquement par ses performances thermiques. L'addition de nanoparticules au sein d'un fluide permet d'augmenter la conductivité thermique mais malheureusement également la viscosité et par conséquent les pertes de pression au sein du système [5-6]. Ainsi, 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 :

$$PEC = \frac{\dot{m} \cdot C_p (T_s - T_e)}{\dot{v} \cdot \Delta P} \quad (4)$$

La figure 9 montre l'évolution de ce critère énergétique en fonction du nombre de Reynolds dans le cas de l'eau et des nanofluides étudiés. Nous avons également ajouté sur cette figure les résultats d'un nanofluide étudié lors d'une précédente étude [3-4]. Ce dernier est issu de la dilution dans l'eau déminéralisée d'une solution commerciale (Ludox TMA[®]) à base de silice, composée de nanoparticule sphérique ($n = 3$) de 22 nm, afin d'obtenir une concentration massique de 5% identique aux nanofluides étudiées dans cette étude.

Nous pouvons remarquer que toutes les mesures réalisées sur les nanofluides sont en dessous des mesures correspondant au cas de l'eau, ce qui signifie que le bilan énergétique, tel qu'il est défini à l'aide du PEC, des nanofluides étudiés est défavorable quelles que soient les conditions de fonctionnement. Cependant, ce PEC atteint au minimum des valeurs supérieures à 1000 pour des nombres de Reynolds de 10000. Autrement dit, pour ces régimes d'écoulement pleinement turbulent, l'énergie thermique échangée représente plus de 1000 fois l'énergie que l'on a fournie pour mettre en mouvement le fluide. Dans de nombreuses applications, l'augmentation de la puissance de pompage sera acceptable devant l'intensification des transferts thermiques apportée par l'utilisation des nanofluides étudiés.

Enfin, la comparaison des nanofluides étudiés semble mettre en évidence une amélioration de ce PEC pour le nanofluide avec des particules ayant un facteur de forme important ($n = 4 - 5$).

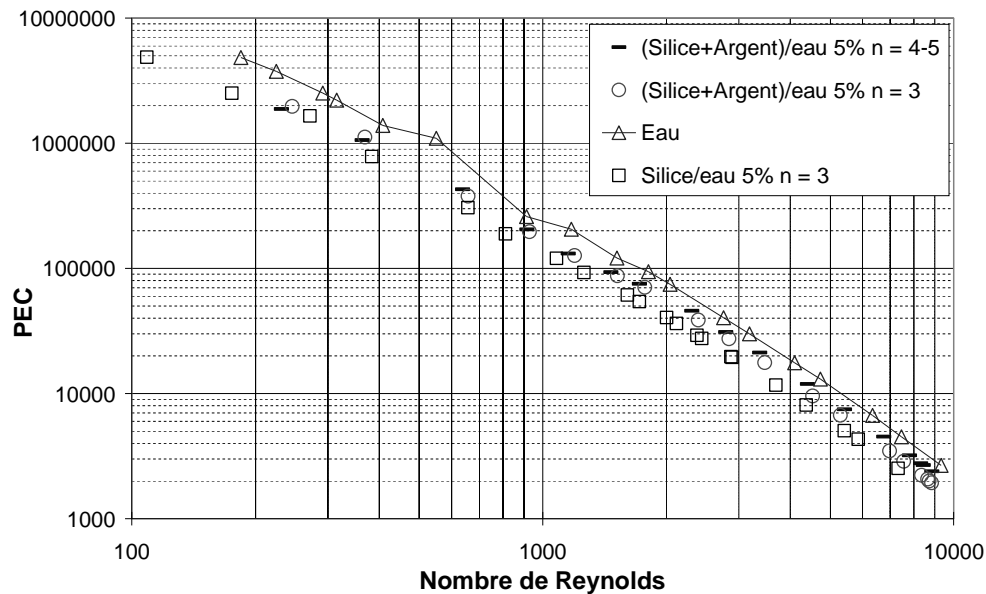


Figure 9: Critère de performance énergétique - Condition de chauffage

5. Conclusions et perspectives

Cette étude sur les performances thermo-hydrauliques d'un nanofluide a permis de montrer une amélioration du PEC pour les nanofluides avec des particules ayant un facteur de forme important. Le développement d'un nanofluide requiert une approche globale où les propriétés thermo-physiques devront être optimisées et où les performances thermiques et hydrauliques devront être comparées. En fonction des applications visées, un critère de performance adapté devra être utilisé afin de trouver le meilleur compromis entre une intensification des transferts thermiques et une augmentation raisonnable des pertes de pression.

Références

- [1] E.V. Timofeeva, J.L. Routbort, D. Singh, Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids, *J. Applied Physics*, 106, (2009), 014304, 1-10.
- [2] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *I & EC Fundamentals*, 1 (1962), 187-191.
- [3] S. Ferrouillat, B. Wang, J.-P., Ribeiro, O. Soriano, O. Poncelet, J.-A., Gruss, A. Bontemps Intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nanofluides (Partie 1).Comptes-rendus Congrès français de thermique, SFT 2009, Vannes,731-736.
- [4] J.-P., Ribeiro, S. Ferrouillat, B. Wang, O. Soriano, O. Poncelet, J.A. Gruss, A. Bontemps Intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nanofluides (Partie 2).Comptes-rendus Congrès français de thermique, SFT 2009, Vannes, 737-742.
- [5] X.Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *Int. J. of Thermal Sciences*, 46 (2007), 1-19.
- [6] W. Yu, D.M. France, J.L. Routbort, S.U.S. Choi, Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements, *Heat Transfer Engineering*, 29-5 (2008), 432-460.

Remerciements

Ce travail a été financé partiellement par le C.N.R.S. dans le cadre du Programme Interdisciplinaire Energie " Microcond " et par l'A.D.E.M.E. (N° 0566C00).