

Intensification des échanges thermiques par l'utilisation de nanofluides SiO₂ / eau (partie 1)

Sébastien FERROUILLAT¹, Biran WANG², João-Paulo RIBEIRO², Olivier SORIANO², Olivier PONCELET², Jean Antoine GRUSS², André BONTEMPS^{1*}

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

²CEA / LITEN / LETH - GRETh

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 SiO₂/eau dans un échangeur coaxial cylindrique à température de paroi imposée. L'exploitation des résultats est réalisée en prenant en considération les propriétés thermo-physiques des nanofluides qui ont été préalablement déterminés expérimentalement. Les résultats obtenus montrent que les pertes de pression suivent globalement des lois classiques si les propriétés thermo-physiques réelles des nanofluides sont prises en compte. En revanche, l'étude des coefficients d'échange convectif semble mettre en évidence une augmentation des performances thermiques avec l'utilisation des nanofluides.

Nomenclature

| | | | |
|----------------------|-------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| h | coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | Λ | coefficient de Darcy |
| K | coefficient d'échange global, $W.m^{-2}.K^{-1}$ | <i>Indices et exposants</i> | |
| Re | nombre de Reynolds | e | externe |
| T | température, K | i | interne |
| <i>Symboles grec</i> | | f | fluide de base (eau) |
| λ | conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$ | nf | nanofluide |

1. Introduction

Récemment, une nouvelle classe de fluides appelée « nanofluide » a été développée et testée, avec une croissance exponentielle de publications sur ce sujet ces dernières années. Les nanofluides sont des solutions colloïdales composées de particules de taille nanométrique (1-100 nm) en suspension dans un liquide. L'augmentation substantielle de la conductivité thermique des nanofluides contenant une petite quantité de particules, métalliques ou non, a été signalée.

En outre, certains auteurs ont mesuré une augmentation des coefficients d'échange thermique par rapport aux liquides de base, au-delà de l'effet de la conductivité thermique [1-2]. Toutefois, à ce jour, les résultats de la littérature scientifique sont trop dispersés pour établir des tendances sur l'augmentation du transfert de chaleur en régime laminaire ou turbulent en fonction du type et/ou de la taille des particules et sur les explications physiques de ces phénomènes [3]. Certains travaux ont permis de mettre en évidence une bonne cohérence entre les résultats des performances thermo-hydrauliques des nanofluides et les corrélations classiquement utilisées à condition de prendre correctement en considération les propriétés thermophysiques des nanofluides [4]. La conductivité thermique semble augmenter avec la taille des particules, mais d'autres expériences semblent néanmoins nécessaires pour établir une telle tendance en ce qui concerne l'augmentation de transfert de chaleur. Une étude a donc été entreprise pour évaluer les performances de nanofluides soit dans des conditions de température imposée (partie 1) soit dans des conditions de flux imposé

(partie 2). L'objectif de la première partie de cette étude est de qualifier les performances thermo hydrauliques d'un nanofluide SiO_2/eau au sein d'un échangeur coaxial cylindrique à température de paroi imposée.

2. Caractérisation du nanofluide

2.1.Choix du nanofluide

Dans le cadre de cette étude, il a été décidé de choisir un nanofluide à base de silice disponible facilement dans le commerce et dont la reproductibilité des propriétés est bien établie. Il s'agit du LUDOX TMA disponible auprès de la société Sigma Aldrich. La concentration massique de SiO_2 est de 34% et la taille moyenne des particules est de 22 nm. Après dilution dans de l'eau déminéralisée, deux autres solutions de 16% et 5% ont été préparées.

2.2.Propriétés physiques

Dans le cadre d'une étude expérimentale des performances thermiques d'un nanofluide en convection forcée, il est primordial de connaître précisément les propriétés thermo physiques du nanofluide. C'est pourquoi nous avons réalisé la caractérisation de ces différentes propriétés thermo-physiques.

La masse volumique ainsi que la capacité thermique massique ont été déterminées en utilisant les relations usuelles qui ont été validées pour les nanofluides.

Concernant la conductivité thermique, les résultats de la littérature sont très divergents [1-2]. Ces résultats ont été comparés à la théorie de Maxwell [5] ou à celle d'Hamilton – Crosser [6] avec des différences notables. Il nous est donc apparu important de réaliser une caractérisation expérimentale avec l'utilisation du conductimètre KD2 Pro de Decagon Inc. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure 1 et permettent de constater que le modèle de Maxwell représente assez bien nos mesures de conductivité thermique en les surestimant légèrement.

La mesure de la viscosité dynamique, dans un premier temps en fonction de la température, a également été réalisée et ceci afin de comparer ces résultats aux modèles disponibles dans la littérature scientifique. Deux rhéomètres ont été utilisés afin de consolider nos résultats expérimentaux, (Rhéomètre Brookfield et Low shear 30). La Figure 2 montre que les mesures de viscosité des nanofluides effectuées à l'aide des deux rhéomètres sont comparables.

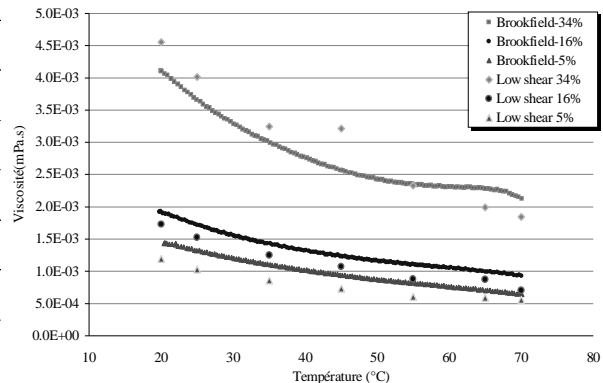
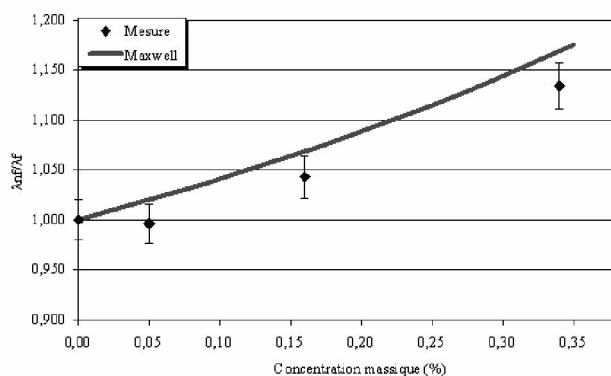


Figure 1: Rapport de la conductivité du nanofluide sur celle de l'eau en fonction de la concentration

Figure 2: Comparaison de la viscosité en fonction de la température pour deux rhéomètres

La comparaison de ces résultats au modèle d'Einstein [7], très souvent utilisé pour la détermination de la viscosité des nanofluides, a permis de montrer que ce modèle n'est pas valable pour ce nanofluide. De plus, l'influence du taux de cisaillement a été testée et a permis de montrer que ce nanofluide peut être considéré comme Newtonien pour des taux de cisaillement compris entre 100 et 1000 s^{-1} .

3. Moyens expérimentaux

Dans l'objectif d'étudier les performances thermo hydrauliques des nanofluides, un banc d'essais a été conçu permettant de modifier le gradient de température près de la paroi, à la fois en mode chauffage et en mode refroidissement du nanofluide (Figure 3). D'éventuels effets de microconvection ou de thermophorèse pourront ainsi être analysés.

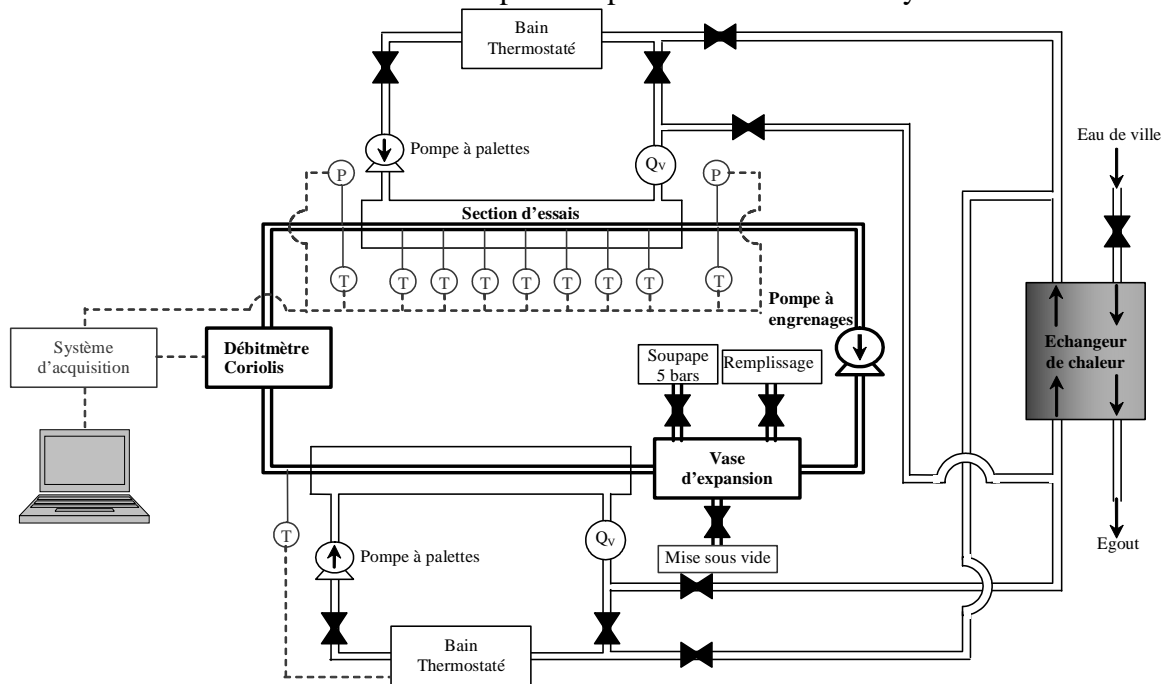


Figure 3 : Schéma fonctionnel du banc d'essais

L'échangeur de chaleur coaxial (section d'essais) est composé d'un tube primaire d'alliage de cuivre (CuAl1) de 0,5 m de long et 4 mm de diamètre intérieur et 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. Plusieurs thermocouples de type K, avec une précision de 0,1 °C après étalonnage, ont été installés dans la boucle, deux thermocouples ont été insérés à l'entrée et à la sortie de la section d'essais pour mesurer les températures du fluide étudié. Le débit massique est mesuré par un débitmètre Coriolis (CFM10), qui a été calibré par le constructeur dans la gamme de 0-80 $kg \cdot h^{-1}$. Les pertes de charge sont mesurées grâce à trois capteurs de pression différentiels fonctionnant dans une gamme de 0-1620 kPa avec une précision de 0,075% (étalonnage constructeur Rosemount). Un pH-mètre est inséré en aval de la section d'essais, afin de suivre l'évolution de pH de fluide étudié, avec une précision maximale de 0,01.

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 le nanofluide SiO_2 ont été effectués avec différentes concentrations, (34%, 16%, 5% en masse), dans différentes conditions (chauffage ou refroidissement du nanofluide), et à différentes températures imposées (20°C, 50°C, 70°C).

4.1. Résultats hydrauliques

Les premiers résultats hydrauliques obtenus permettent d'observer une bonne cohérence avec les corrélations classiques (Poiseuille $\Lambda = 64/\text{Re}$ et Blasius $\Lambda = 0,316\text{Re}^{-0,25}$). Cependant, des tests de vieillissement ont montré qu'en régime turbulent, la perte de pression a rapidement augmenté en fonction du temps pour atteindre une valeur maximale. La loi de Blasius n'est alors plus vérifiée comme le montre la Figure 4.

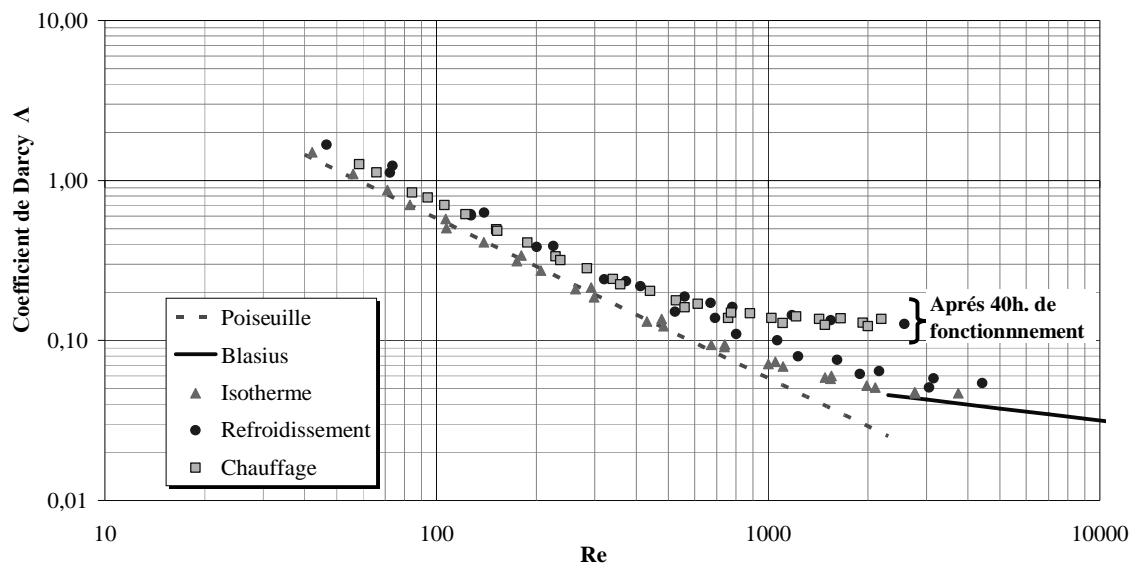


Figure 4 : Coefficient de Darcy en fonction du Reynolds (SiO_2/eau à 34% en masse)

Afin d'expliquer ce phénomène, nous avons supposé qu'il y avait un dépôt de particules sur la paroi. Nous avons ainsi utilisé une solution basique détergente afin de nettoyer le circuit primaire. Ensuite, deux expériences ont été menées avec une concentration de 5% de nanofluide SiO_2 . Les résultats ont mis en évidence qu'après le nettoyage, les pertes de pression et donc le coefficient de Darcy ont retrouvé des valeurs en accord avec les corrélations classiques.

4.2. Résultats thermiques

Les coefficients d'échange h_{nf} et h_f sont déduits de la détermination expérimentale du coefficient d'échange global K à partir d'un bilan de puissance global sur la section d'essais. Le coefficient d'échange sur le fluide secondaire, qui est pour tous les essais en régime turbulent, est estimé à l'aide des corrélations de Petukhov et Gnielinski [8].

4.2.1. Influence de la concentration

Afin de montrer une possible modification du coefficient d'échange thermique par rapport à celui du fluide de base, le ratio h_{nf}/h_f a été déterminé pour les trois concentrations massiques en condition de chauffage (température d'entrée du nanofluide $T_i = 20^\circ\text{C}$, et la température

d'entrée d'eau dans le circuit secondaire $T_e = 70^\circ\text{C}$) (Figure 5). On peut observer une amélioration significative du coefficient d'échange thermique avec le nanofluide par rapport au fluide de base en régime turbulent. De plus, on constate une forte influence de la concentration massique sur l'amélioration du coefficient d'échange.

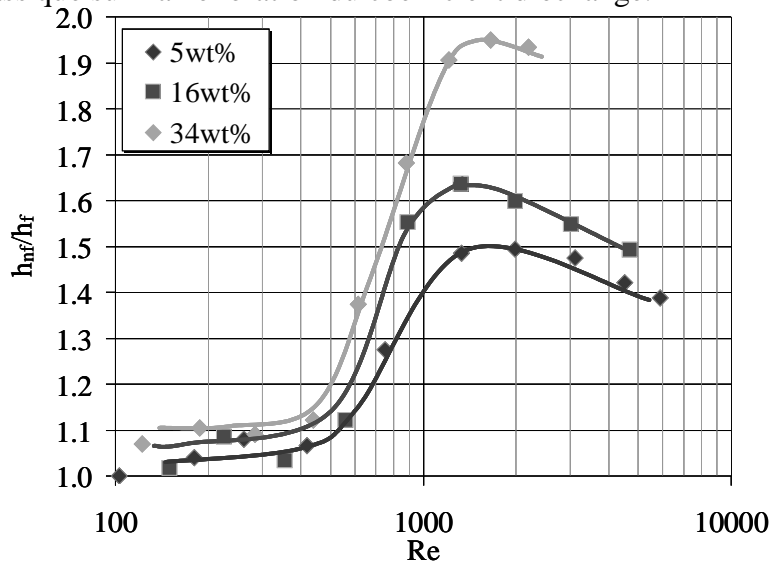


Figure 5 : Evolution du rapport h_{nf}/h_f en fonction du Reynolds en condition de chauffage

4.2.2. Influence du gradient de température transversal

La comparaison des résultats en mode de chauffage et de refroidissement du nanofluide permet de mettre en évidence un effet du gradient de température transversal. En effet, la Figure 6 illustre une augmentation du rapport h_{nf}/h_f en condition de refroidissement par rapport au chauffage (environ 1,6 en refroidissement contre 1,4 en chauffage).

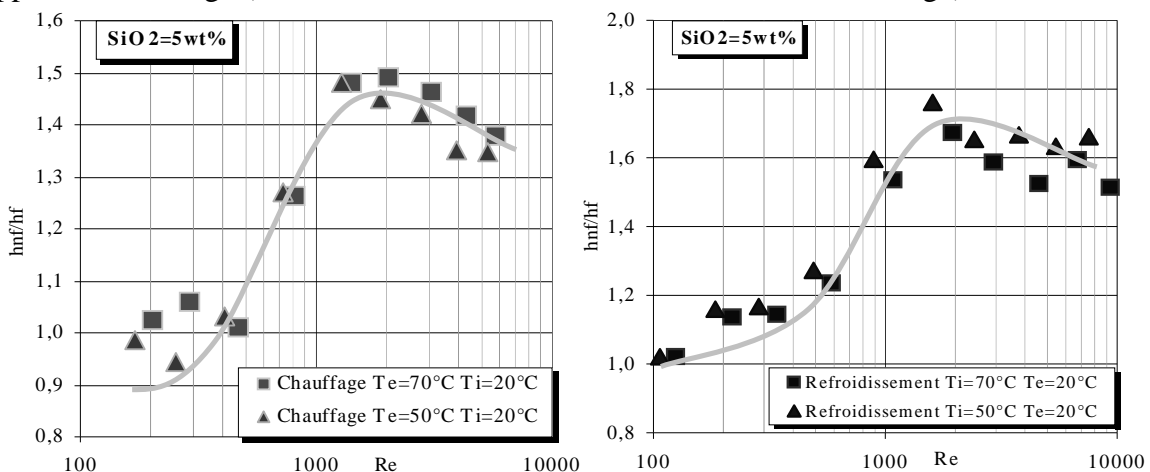


Figure 6: Comparaison du ratio h_{nf}/h_f (SiO_2 5% en masse) en chauffage et en refroidissement

4.2.3. Influence du temps de fonctionnement

Enfin, l'effet du temps de fonctionnement sur un éventuel dépôt de nanoparticules sur les parois a également été étudié. Comme l'illustrent la Figure 7 et la Figure 8, il a été observé une augmentation du coefficient d'échange thermique avec le temps et une diminution après le nettoyage. Ces résultats semblent montrer que les supposés dépôts de nanoparticules sur les parois pourraient être responsables de l'augmentation du coefficient d'échange thermique. L'augmentation simultanée des pertes de pression et du transfert thermique permet de consolider l'hypothèse d'un phénomène lié à l'état de la surface d'échange.

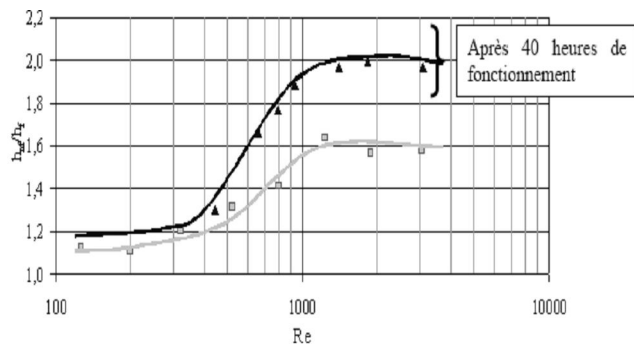


Figure 7 : Effet du dépôt sur le coefficient d'échange thermique (SiO_2 , 34%, condition chauffage)

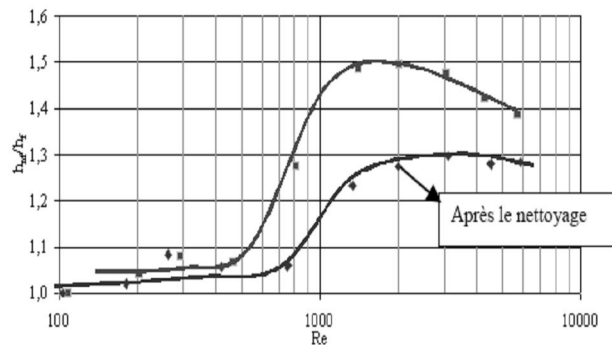


Figure 8 : Effet du nettoyage pour le coefficient d'échange (SiO_2 , 5%, condition chauffage)

5. Conclusions et perspectives

Ces travaux ont pour objectif l'étude expérimentale des performances thermo-hydrauliques d'un nanofluide SiO_2 /eau dans des conditions de température de paroi imposée (refroidissement ou chauffage du nanofluide) pour des régimes d'écoulement laminaire à turbulent. Les résultats montrent que les pertes de pression sont bien représentées par les corrélations classiques si les propriétés thermo-physiques du fluide sont correctement prises en considération. Le coefficient d'échange thermique semble être plus élevé que celui du fluide de base en régime turbulent. Enfin, il a été remarqué que le fluide à hautes concentrations de nanoparticules (34% en masse) conduit vraisemblablement à la modification de l'état de surface de la paroi, probablement en raison de dépôts de nanoparticules. Cette modification d'état de surface génère une augmentation des pertes de pression ainsi que du coefficient d'échange. Des essais complémentaires seront nécessaires afin de consolider ces premiers résultats et afin de comprendre ce probable phénomène de dépôt qui conditionne les performances thermo hydrauliques du nanofluide.

Références

- [1] X.Q. Wang, A. S. Mujumdar, Heat transfer characteristics of nanofluids : a review, *Int. J. of Thermal Sciences*, 46 (2007), 1-19.
- [2] 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.
- [3] J. Buongiorno, Convective Transport in Nanofluids, *Trans. ASME, J. Heat Transfer*, 128 (2006), 240-250.
- [4] 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 tubes , *Trans. ASME, J.Heat Transfer*, 130 (2008), 042412-1 042412-7.
- [5] J.C. Maxwell, A treatise on electricity and magnetism, 2nd ed., Clarendon press, Oxford, (1881).
- [6] R.L. Hamilton, O.K. Crosser, Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems, *I&EC Fund*, 1, 3, (1962), 197-191.
- [7] A. Einstein, Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen, *Ann. Physik*, 19 (1906), 289 - 306.
- [8] V. Gnielinski, New equation for heat and mass transfer in turbulent pipe and channel flow, *Int. Chem. Eng.*, 16, (1976)

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).