



Étude expérimentale des transferts de chaleur fluide-paroi induits par convection thermocapillaire : influence du nombre de Prandtl

Experimental study of fluid-wall heat transfer induced by thermocapillary convection: influence of the Prandtl number

Christelle Reynard *, Robert Santini, Lounès Tadrist

École polytechnique universitaire de Marseille, laboratoire I.U.S.T.I., UMR 6595, CNRS – Université de Provence, 5, rue Enrico Fermi, technopôle de Château Gombert, 13453 Marseille cedex 13, France

Reçu le 21 mars 2002 ; accepté après révision le 14 janvier 2003

Présenté par Sébastien Candel

Résumé

Les transferts thermiques induits par la convection thermocapillaire générée par une bulle d'air introduite sous une paroi chauffée dans une couche d'huile de silicone sont quantifiés expérimentalement sous gravité normale par mesures directes avec un fluxmètre. Une étude systématique est effectuée en fonction de la taille de la bulle et du gradient de température pour deux viscosités. Le régime d'écoulement autour de la bulle (stationnaire ou oscillatoire) est déterminé par ombroscopie. Deux comportements de transferts de chaleur sont mis en évidence. L'existence de ces comportements est conditionnée par le nombre de Prandtl et est indépendante du régime d'écoulement. *Pour citer cet article : C. Reynard et al., C. R. Mecanique 331 (2003).* © 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. Tous droits réservés.

Abstract

This article concerns heat transfer due to thermocapillary convection induced by an air bubble introduced under a heated wall into a silicone oil layer. An experimental study is carried out under normal gravity conditions with direct measurements by means of a heat fluxmeter. Effects of the bubble size and the temperature gradient are systematically investigated for two values of viscosity. The nature of the thermocapillary convection state (stationary or oscillatory) is determined by shadowgraphy. Two regimes of heat transfer are made evident. They depend on the Prandtl number but are independent of the state of the flow. *To cite this article: C. Reynard et al., C. R. Mecanique 331 (2003).*

© 2003 Académie des sciences/Éditions scientifiques et médicales Elsevier SAS. All rights reserved.

Mots-clés : Transferts thermiques ; Convection thermocapillaire ; Régime oscillatoire

Keywords: Heat transfer; Thermocapillary convection; Oscillatory state

* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : Christelle.Reynard@polytech.univ-mrs.fr (C. Reynard).

Nomenclature

λ	conductivité thermique	$d\sigma/dT$	coefficient de variation de la tension superficielle en fonction de la température
ρ	masse volumique	ν	viscosité cinématique
T	température	σ	tension superficielle
Pr	nombre de Prandtl	C_p	capacité calorifique
Ma	nombre de Marangoni	q_c	densité de flux sans bulle
Bo	nombre de Bond dynamique	q_b	densité de flux avec une bulle

Abridged English version

Experiments on boiling carried out under microgravity conditions have shown that heat transfer induced under these conditions has the same magnitude as under normal gravity. This leads to new question on the mechanism of boiling. It is important to consider in particular thermocapillary convection which is a flow induced by a surface tension gradient generated by a temperature gradient along an interface. This motivates the present experimental study of the heat transfer induced by thermocapillary convection. Configuration is that of an air bubble introduced under a heated wall into a silicone oil layer. In this configuration, two states of thermocapillary convection, denoted stationary and oscillatory, may occur [3,4]. Experiments have only been carried out on the contribution of the stationary thermocapillary convection to heat transfer [8]. It is then important to consider the influence of the flow state on heat transfer. Two silicone oils with Prandtl numbers equal to 16.7 and 220 are tested in the experimental cell. The cavity of the cell has an inner square section (40 mm \times 40 mm), and a 4.5 mm height. The upper and lower horizontal walls are made of aluminium and are maintained at a hot and a cold temperature respectively in order to establish a vertical temperature gradient in the silicone oil layer. The vertical walls are made of Plexiglass in order to visualize the phenomenon. The heat transfer induced by thermocapillary convection is investigated systematically for different bubble sizes, temperature gradients and the two Prandtl numbers. The heat flux is directly measured using a sensor. An effective gain in heat flux is deduced. It corresponds to the ratio between the heat flux density with bubble introduced in the silicone oil layer and the heat flux density without a bubble. For each operating conditions, the state of thermocapillary convection is determined by shadowgraphy. For the two Prandtl numbers, the effective gain is lower than 1.3 but at each Prandtl number corresponds a heat transfer regime. In the case of the low Prandtl number, the effective gain depends on bubble size and it seems to be independent of the temperature gradient. In the other case it depends on both. These two regimes are not induced by the state of the flow because for the low Prandtl number, the effective gain at a fixed bubble size remains the same when the temperature gradient is increased and the flow state changes. These behaviors are due to a different dominant effect according to the Prandtl number (thermocapillary effect for Pr = 16.7 and viscous effect for Pr = 220).

1. Introduction

Depuis plusieurs années, en particulier dans le domaine spatial, l'augmentation de la densité de puissance des composants électroniques pose des problèmes d'évacuation de la chaleur. Cependant avec le développement des expériences d'ébullition en microgravité, de nouvelles perspectives sont apparues. Le mécanisme d'ébullition semble demeurer un moyen très efficace pour le transfert de chaleur en microgravité [1]. Cette conclusion suscite des questions sur la compréhension même de ce mécanisme car elle s'avère être en opposition avec les extrapolations effectuées à partir des théories classiques [2]. Celles-ci accordent de l'importance à la poussée d'Archimède et prédisent une détérioration des transferts en microgravité. Il apparaît alors nécessaire de déterminer

le ou les phénomènes physiques responsables de l'importance des transferts effectivement constatés. La présente étude s'inscrit dans ce cadre. Cependant devant la complexité et le fort couplage des phénomènes mis en jeu (évaporation de la microcouche, coalescence, ...), nos travaux concernent un seul d'entre eux, la convection thermocapillaire.

Pour l'isoler, nous travaillons sans changement de phase, autour d'une seule bulle d'air introduite sous une paroi chauffée dans une couche d'huile de silicone. Différents régimes de convection thermocapillaire (stationnaire ou oscillatoire) peuvent apparaître selon le nombre de Prandtl [3,4]. Pour de l'huile de silicone à faible nombre de Prandtl, nos précédents travaux ont montré que le régime oscillatoire existait aussi sous gravité réduite [5]. Le régime stationnaire correspond à un écoulement axisymétrique autour de la bulle sous forme d'un rouleau toroïdal. Les champs de température et de vitesse sont stationnaires [6]. Par contre pour le régime oscillatoire le rouleau de convection thermocapillaire est déformé périodiquement dans l'espace et dans le temps en raison de la présence d'ondes progressives axiale et azimutale [7].

Expérimentalement seuls les transferts de chaleur induits par la convection thermocapillaire stationnaire peu intense ont été étudiés [8]. Par suite, notre intérêt s'est porté sur leur quantification dans le cas du régime oscillatoire au sol et sous gravité réduite [9,10]. Nous présentons uniquement les résultats obtenus sous gravité normale car dans ces conditions nous disposons de mesures pour deux huiles de silicone de viscosités différentes. L'objectif de cette étude est de déterminer la contribution aux transferts de chaleur de la convection thermocapillaire autour d'une bulle unique. L'influence de la taille de la bulle et du gradient de température a été testée. Pour les deux nombres de Prandtl étudiés, deux comportements sont mis en évidence et discutés.

2. Configuration expérimentale

La convection thermocapillaire est un mouvement de fluide induit par un gradient de tension superficielle le long d'une interface, causé par un gradient de température. Deux huiles de silicone de nombre de Prandtl différents ont été testées pour cette étude (cf. Tableau 1) dans la configuration expérimentale suivante : une bulle d'air est créée par surpression sous une paroi horizontale dans une cavité parallélépipédique, de section intérieure carrée $40 \times 40 \text{ mm}^2$ et de 4,5 mm de hauteur, remplie d'huile de silicone. Un gradient de température vertical est établi en maintenant la température des parois horizontales, supérieure et inférieure, respectivement à des températures chaude et froide. Le chauffage est assuré par une résistance bobinée à plat sur la paroi supérieure. Un module à effet Peltier produit le refroidissement de la paroi inférieure. Ces deux éléments sont couplés chacun à un système de régulation en température (sonde de température Pt 100, régulateur PID et module de puissance). Lorsque le régime conductif stationnaire (pas d'instabilité de Rayleigh–Bénard avec cette configuration thermique) est atteint (au bout d'environ 1000 s), une bulle est introduite sous la paroi supérieure chauffée, par un orifice en son centre. Dès l'introduction de la bulle, la convection thermocapillaire se développe à son voisinage. Du fluide chaud est alors entraîné vers le bas de la bulle créant ainsi une zone chaude. Cette zone se traduit par l'apparition de composantes horizontales du gradient de température qui entraînent des composantes horizontales du gradient d'indice de réfraction. La mise en évidence de cette zone peut être alors réalisée au moyen d'une méthode optique classique l'ombroscopie basée sur

Tableau 1
Propriétés thermophysiques des huiles de silicone à 25 °C.

Table 1
Thermophysical properties of the silicone oil at 25 °C.

Huile	ν (m^2/s)	ρ (kg/m^3)	λ ($\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$)	C_p ($\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$)	$d\sigma/dT$ ($\text{N}/(\text{m}\cdot\text{K})$)
Dow-Corning	1×10^{-6}	816	0,1	2050	$-8,24 \times 10^{-5}$
Rodhorsil	20×10^{-6}	950	0,14	1630	$-6,23 \times 10^{-5}$

la déviation lumineuse d'un faisceau de lumière parallèle (effet de prisme local) induite par une variation d'indice [11]. Le suivi de cette zone permet alors de déterminer le type de régime de convection thermocapillaire. Cette zone est stable dans le plan vertical pour le régime stationnaire. Dans le cas du régime oscillatoire, elle est animée d'un mouvement périodique [6,10].

Afin de déterminer les transferts thermiques induits par la convection thermocapillaire et l'influence du type de régime, un fluxmètre (de marque Captec) à gradient tangentiel de température, de 20 mm de diamètre, de 0,3 mm d'épaisseur et de $1,96 \mu\text{V}/(\text{W}/\text{m}^2)$ est utilisé. Il est collé au centre de la face supérieure de la paroi horizontale inférieure en son centre. L'enregistrement temporel du signal délivré est effectué à l'aide d'une centrale d'acquisition (HP35670A). Il permet de détecter l'établissement du régime conductif sans bulle, de mesurer la densité de flux correspondante, et de quantifier l'augmentation de la densité de flux induite par la convection thermocapillaire lorsque la bulle est introduite.

3. Résultats et discussion

Une étude des transferts de chaleur a été effectuée pour les deux types d'huiles. Les résultats sont obtenus à partir de l'enregistrement temporel du signal délivré par le fluxmètre (cf. Fig. 2).

Lorsque la bulle est introduite dans la couche de liquide en régime conductif établi, la densité de flux de chaleur initialement égale à q_c augmente et atteint un nouvel état stationnaire q_b . Cette augmentation de la densité de flux est induite par la convection thermocapillaire.

Le gradient de tension superficielle agit comme une contrainte appliquée par l'interface de la bulle sur les fluides adjacents (air et huile) et crée l'écoulement de convection thermocapillaire (stationnaire ou oscillatoire) dans la direction d'une augmentation de tension superficielle. Pour les deux huiles de silicone, la tension superficielle étant une fonction décroissante de la température (cf. Tableau 1), le fluide au voisinage de la bulle est mis en mouvement de la base de la bulle en contact avec la paroi chauffée vers le pôle de la bulle situé dans une zone plus froide. Du liquide chaud est donc entraîné vers le bas dans des zones plus froides et la stratification établie en régime purement conductif est alors détruite. Un schéma dans l'encart de la Fig. 1 montre les lignes de courant et les isothermes en absence et en présence de bulle. Il en résulte une augmentation des transferts de chaleur entre la

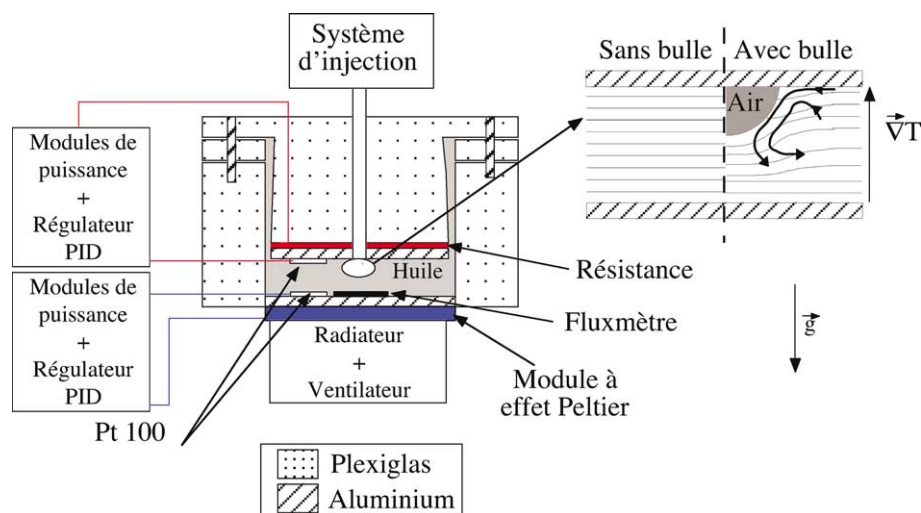


Fig. 1. Schéma de principe de la cuve de mesure.

Fig. 1. Principle sketch of the test chamber.

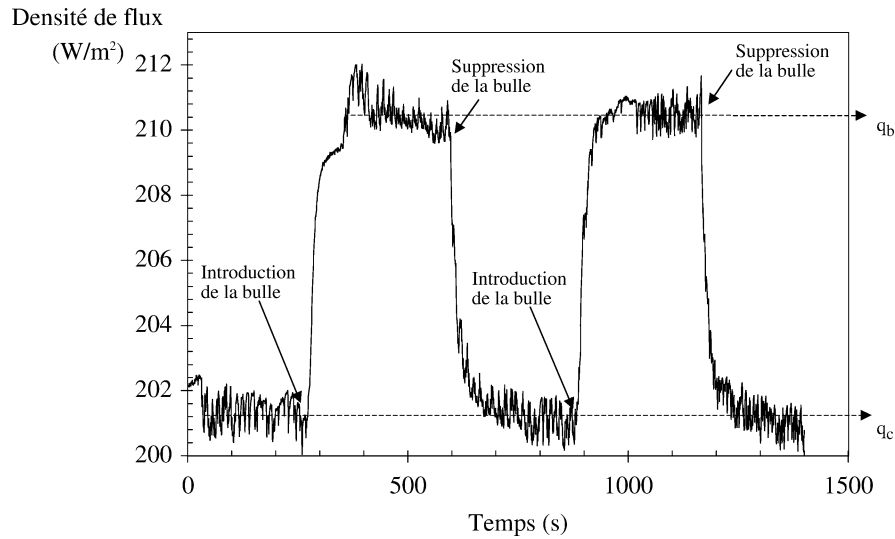


Fig. 2. Variation de la densité de flux de chaleur en fonction du temps, après introduction ou suppression d'une bulle (rayon de bulle 2,5 mm, gradient de température 2 K/mm, viscosité cinématique $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Fig. 2. Heat flux density variation versus time after bubble introduction or removal (bubble radius: 2.5 mm, temperature gradient: 2 K/mm, kinematic viscosity: $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

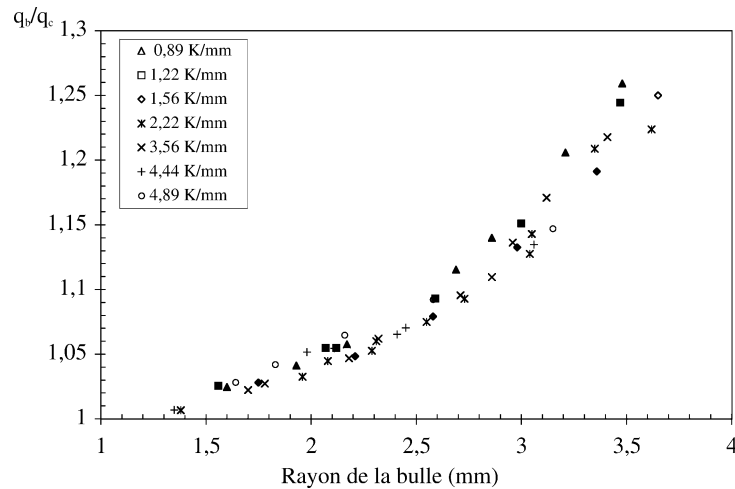


Fig. 3. Gain effectif de flux de chaleur en fonction du rayon de la bulle pour différents gradients de température dans le cas de l'huile de silicone de faible nombre de Prandtl ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 16,7$). Les symboles pleins correspondent au régime stationnaire, les autres symboles correspondent au régime oscillatoire.

Fig. 3. Effective gain in heat flux versus the bubble radius for different temperature gradients in the case of the low Prandtl number silicone oil ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 16,7$). The full symbols correspond to the stationary state, the other ones correspond to the oscillatory state.

paroi et le liquide. L'exploitation de cette courbe permet de quantifier un gain effectif sur les transferts thermiques. Celui-ci correspond au rapport entre les densités de flux mesurées en présence et en absence de bulle (q_b/q_c). Une étude paramétrique de ce gain effectif en fonction de deux grandeurs (la taille de la bulle et le gradient de température) a été réalisée. Les Figs. 3 et 4 regroupent respectivement les résultats obtenus pour l'huile de silicone

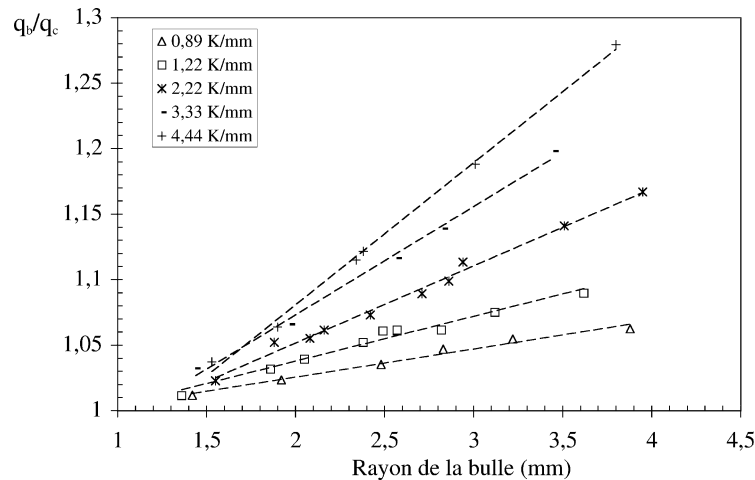


Fig. 4. Gain effectif en fonction du rayon de la bulle pour différents gradients de température dans le cas de l'huile de silicone de nombre élevé de Prandtl ($\nu = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 220$). Régime de convection thermocapillaire uniquement stationnaire.

Fig. 4. Effective gain versus the bubble radius for different temperature gradients in the case of the highest Prandtl number silicone oil ($\nu = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 220$). Occurrence only of the stationary state of thermocapillary convection.

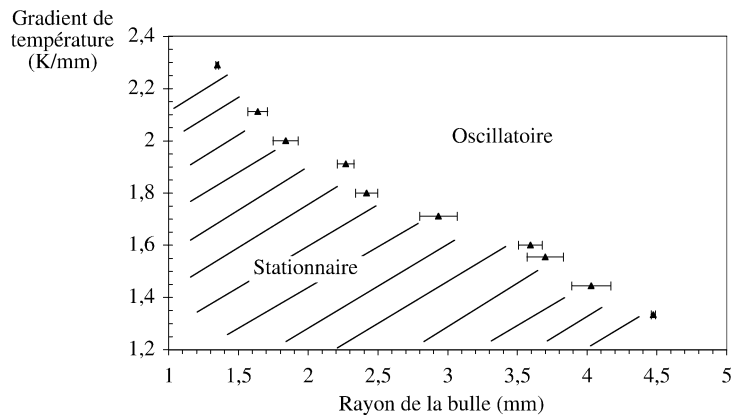


Fig. 5. Seuil d'apparition du régime oscillatoire en fonction du rayon de la bulle dans le cas de l'huile de silicone de faible nombre de Prandtl ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 16,7$).

Fig. 5. Occurrence threshold of the oscillatory state versus the bubble radius in the case of the lowest Prandtl number silicone oil ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\text{Pr} = 16,7$).

de faible viscosité ($\nu = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($\text{Pr} = 16,7$)) et de viscosité plus élevée ($\nu = 20 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ($\text{Pr} = 220$)). Pour les deux types d'huiles de silicone, les mêmes conditions opératoires ont été appliquées ($1,3 \text{ mm} < R < 4 \text{ mm}$ et $0,89 \text{ K/mm} < \vec{\nabla}T < 4,89 \text{ K/mm}$).

Le régime de convection thermocapillaire se développant autour de la bulle dépend du type d'huile. Dans le cas de l'huile de silicone de viscosité élevée, seul le régime stationnaire a été observé. Par contre dans le cas de la viscosité la plus faible, les deux types de régimes sont apparus. La Fig. 5 indique le type de régime qui s'établit dans le liquide selon la taille de la bulle et le gradient de température imposé. Pour une taille de bulle donnée, le régime oscillatoire succède au régime stationnaire et apparaît lorsque le gradient de température est supérieur à une valeur critique. Cette valeur critique diminue lorsque la taille de la bulle introduite dans le liquide est plus grande.

On constate tout d'abord que pour les deux types d'huile de silicone, la contribution des effets thermocapillaires aux transferts de chaleur est assez importante puisque le gain peut être de 30 % par rapport au régime conductif. De plus dans les deux cas, le gain effectif, à gradient de température imposé, augmente lorsque la taille de bulle augmente. En fait l'introduction d'une bulle de taille plus importante génère notamment un rouleau de convection thermocapillaire plus étendu. Par suite la surface d'échanges liée aux effets convectifs (étendue du système bulle + rouleau) est plus grande.

Par contre deux comportements sont mis en évidence lorsque le gradient de température imposé varie. Dans le cas de l'huile de silicone de faible viscosité, le gain effectif semble être, en première approximation, indépendant du gradient de température, alors que dans l'autre cas, une augmentation du gradient de température entraîne une intensification des transferts de chaleur. Cette différence de comportement thermique observée entre les deux huiles de silicone ne peut pas être attribuée au type de régime de convection thermocapillaire se développant au sein du fluide. En effet si l'on considère la Fig. 3, on constate que pour une taille de bulle imposée le gain effectif reste le même quel que soit le régime de convection thermocapillaire, oscillatoire ou stationnaire, lorsque le gradient de température est augmenté.

Cette différence de comportement est probablement induite par l'intensité de la convection thermocapillaire qui diffère selon l'effet prépondérant. En fait dans cette configuration d'étude, quatre effets entrent en jeu [9]. Le premier effet est déstabilisant, il correspond à l'effet moteur lié à la tension superficielle. Les trois autres effets sont stabilisants et sont les effets thermogravitationnels, diffusifs et visqueux. Les effets thermogravitationnels ($0,2 < Bo < 2$) et diffusifs sont équivalents pour les deux nombres de Prandtl. Sous les conditions opératoires imposées, pour l'huile de plus grand nombre de Prandtl, le nombre de Marangoni est inférieur à $2,5 \times 10^3$. L'effet prépondérant correspond alors à un effet stabilisant : l'effet visqueux. La convection thermocapillaire est dite peu intense. Dans le cas du nombre de Prandtl faible, pour les mêmes conditions opératoires, la gamme du nombre de Marangoni étudiée est plus étendue ($Ma < 1,2 \times 10^5$). L'effet prépondérant correspond à l'effet déstabilisant : l'effet thermocapillaire. La convection thermocapillaire est intense. La différence d'intensité peut conduire à une distribution différente des isothermes à l'interface de la bulle [6]. Dans le cas du nombre de Prandtl faible, l'intensité de la convection thermocapillaire engendre une uniformisation de la température. Ceci conduit probablement à une valeur limite de la vitesse interfaciale quelque soit le gradient de température. Ainsi les transferts thermiques ne sont plus conditionnés par l'intensité de l'écoulement, ils ne sont modifiés que par le changement de la taille de la bulle qui entraîne, comme déjà précisé précédemment, une modification de la surface liée aux échanges convectifs. Des expériences complémentaires devront être effectuées pour vérifier cette hypothèse.

4. Conclusion et perspectives

Tout d'abord, l'étude expérimentale réalisée sur les transferts thermiques induits par la convection thermocapillaire autour d'une bulle d'air pour des huiles de silicone de nombre de Prandtl différent montre l'existence de deux comportements. Pour le nombre de Prandtl faible, le gain effectif par rapport à un régime conductif est indépendant du gradient de température. Seule la taille de la bulle et par conséquent la taille du rouleau de convection thermocapillaire conditionne les transferts. Par contre dans le cas d'un nombre de Prandtl élevé le gradient de température joue également un rôle. La différence de comportement peut être attribuée à la nature de l'effet prépondérant selon le nombre de Prandtl (effets thermocapillaires pour $Pr = 16,7$ et effets visqueux pour $Pr = 220$).

Ensuite pour les deux types d'huile, la convection thermocapillaire induit une augmentation des transferts thermiques non négligeable (jusqu'à 30 % par rapport au régime conductif). Par conséquent, l'importance du rôle de la convection thermocapillaire au niveau des transferts thermiques va être approfondie en présence d'ébullition au moyen de prochaines campagnes d'expériences. Elles porteront sur une configuration analogue. Les transferts seront étudiés autour d'une bulle de vapeur isolée en croissance sous une paroi chauffée dans un liquide (Fluorinert FC72) sousrefroidi (condition thermique pour laquelle l'effet Marangoni a déjà été observé [12]).

Remerciement

Nous adressons nos remerciements à l'Agence Spatiale Européenne (E.S.A.) et au Centre National d'Études Spatiales (C.N.E.S.) pour leur support financier dans le cadre du contrat européen CIMEX (Convection and Interfacial Mass Exchange).

Références

- [1] P. Arlabosse, C. Reynard, L. Tadrist, Overview of pool boiling heat transfer studies in variable gravity, in: M.S. El-Genk (Ed.), AIP Conf. Proc. 504, Proceedings of STAIF (Space Technology and Applications International Forum), Albuquerque, USA, 2000, pp. 744–750.
- [2] W.M. Rohsenow, A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, *Trans. ASME* 84 (1962) 969.
- [3] C. Reynard, R. Santini, L. Tadrist, P. Arlabosse, The experimental study of the periodic instability of thermocapillary convection around an air bubble, in: M.S. El-Genk (Ed.), AIP Conf. Proc. 504, Proceedings of STAIF (Space Technology and Applications International Forum), Albuquerque, USA, 2000, pp. 878–884.
- [4] M. Kassemi, N. Rashidinia, Steady and oscillatory thermocapillary convection generated by a bubble, *Phys. Fluids* 12 (12) (2000) 3133–3146.
- [5] C. Reynard, R. Santini, L. Tadrist, Experimental study of the gravity influence on the periodic thermocapillary convection around a bubble, *Exp. Fluids* 31 (4) (2001) 440–446.
- [6] D. Raake, J. Siekmann, Ch.-H. Chun, Temperature and velocity fields due to surface tension driven flow, *Exp. Fluids* 7 (1989) 164–172.
- [7] Ch.-H. Chun, D. Raake, G. Hansmann, Oscillating convection modes in the surroundings of an air bubble under a horizontal heated wall, *Exp. Fluids* 11 (1991) 359–367.
- [8] P. Arlabosse, L. Tadrist, H. Tadrist, J. Pantaloni, Experimental analysis of the heat transfer induced by thermocapillary convection around a bubble, *J. Heat Transfer* 22 (2000) 66–73.
- [9] C. Reynard, Étude expérimentale de la convection thermocapillaire autour d'une bulle par méthodes optiques et thermiques. Influence de la gravité sur les régimes d'écoulement et les transferts de chaleur, Thèse de l'Université de Provence, Marseille, 2001.
- [10] C. Reynard, R. Santini, L. Tadrist, Experimental study of the thermocapillary convection around an air bubble. Flow and heat transfers using optical and thermal methods, in: 12th IHTC (International Heat Transfer Conferences), Vol. 3, Grenoble, France, 2002, pp. 467–471.
- [11] J.P. Prenel, P. Smigielski, Mécanique des fluides. Visualisation par variation d'indice. *Techniques de l'Ingénieur*. AF3 332.
- [12] J. Straub, Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity, *Adv. Heat Transfer*, 35, 57–171.