

Etude expérimentale des transferts de chaleur en ébullition nucléée sur un site artificiel isolé : Influence de l'orientation de la paroi

Mohamed ZAMOUM^{1,2*}, Lounès TADRIST², Hervé COMBEAU³, Mohand KESSAL¹

¹Laboratoire de Génie Physique des Hydrocarbures, Université M'hamed Bougara, Boumerdès, Algérie

²Aix-Marseille Université, Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 7343, Marseille Cedex 13, France

³Institut Jean Lamour, Dép. SI2M, UMR CNRS 7198– Université de Lorraine, Nancy, France

* (auteur correspondant : mzamoum@polytech.univ-mrs.fr)

Résumé - L'objectif de cette étude est de contribuer à une meilleure compréhension des transferts de chaleur en régime d'ébullition nucléée. Il s'agit de déterminer les paramètres caractéristiques des transferts de chaleur avec des conditions opératoires bien maîtrisées. Les investigations expérimentales sont menées dans les régimes de convection naturelle et d'ébullition nucléée. Un dispositif expérimental a été conçu et mis en œuvre. Il permet de réaliser des expériences sur une paroi orientable allant de 0 à 180° (L'angle 0° correspond à une paroi horizontale avec un flux de chaleur vertical orienté vers le haut) pour étudier l'influence de l'inclinaison de la paroi sur le phénomène de nucléation. Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence le phénomène de nucléation, croissance et détachement de bulles générées sur un site de nucléation artificiel unique. Nous présentons les caractéristiques thermiques au niveau de la paroi en présence de convection naturelle et d'ébullition nucléé. Nous étudions ces phénomènes à la transition entre ces deux régimes grâce aux potentialités de l'ébulliomètre que nous avons conçu et mis en œuvre. Les résultats préliminaires obtenus nous permettent d'apporter des nouveaux éléments de compréhension du mécanisme d'ébullition et des transferts de chaleur associés.

1. Introduction

Le processus d'ébullition nucléée et les transferts de chaleur associés jouent un rôle important dans des nombreuses applications technologiques et environnementales. Depuis quelques décennies, les nouvelles technologies imposent des extractions de densités de puissances calorifiques de plus en plus importantes. C'est seulement au début des années trente que les chercheurs ont souligné le potentiel de l'ébullition pour transférer des quantités de chaleur importantes. La description proposée par Nukiyama [1] de la courbe d'ébullition est souvent considérée comme le point de départ des recherches sur le processus d'ébullition. Cependant, la compréhension détaillée des transferts de chaleur entre une paroi et un liquide en ébullition reste extrêmement limitée à cause de la complexité des phénomènes et du grand nombre de paramètres physiques mis en jeu.

L'étude des mécanismes de base, comme la nucléation, la croissance de bulles, la dynamique de la ligne de contact n'a pas cessé de susciter des recherches aussi bien expérimentales que théoriques depuis le milieu du siècle dernier ([2], [3], [4], [5]). Plusieurs auteurs ont focalisé leur travaux sur la détermination des lois de transfert de chaleur ([6], [7], [8]...) tandis que d'autres se sont intéressés à la description détaillée des phénomènes qui se produisent dans des conditions d'ébullition ([9], [10], [11]).

De nombreux travaux sur l'ébullition en microgravité ont été conduits au cours des dernières décennies ([12], [13], [14]). Les résultats obtenus sont spécifiques aux configurations étudiées et semblent contradictoires suivant les auteurs. En particulier pour ce qui concerne les transferts de chaleur, ils sont améliorés lorsque la gravité est fortement réduite pour certains auteurs tandis que pour d'autres ils sont détériorés. Par ailleurs, plusieurs

investigateurs ont cherché à comprendre l'influence de différents paramètres gouvernant les transferts de chaleur en ébullition nucléée comme l'état de surface de la paroi chauffante ([15], [16]), la pression du fluide ([17], [18]), la nature du fluide [19], l'orientation de la surface chauffante par rapport à la gravité ([20], [21], [22], ...)

Parmi les travaux récents sur l'ébullition nucléée sur un site isolé, Golobic et al. [23] ont déterminé expérimentalement les distributions de température de la paroi durant la croissance de la bulle sur une surface mince chauffée. Cheng et Burkhardt [24] ont proposé une méthode pour l'identification et le suivi des bulles lors de l'enregistrement de l'ébullition. Van der Geld [25] a prédit théoriquement la dynamique de l'angle de contact d'une bulle sphérique lors de sa croissance sur une surface chauffée. Cet angle peut conduire à la détermination du volume de détachement. Vasquez et al. [26] ont comparé trois techniques de mesure pour la détermination de la taille des bulles aux détachements. Siedel et al [27] ont utilisé une caméra haute vitesse pour étudier la croissance et le détachement des bulles sur un site de nucléation isolé, et sur deux sites de nucléation adjacents dans diverses conditions de surchauffe de la paroi. Moghaddam et Kiger [28] ont étudié la dynamique du transfert de chaleur lors du processus de nucléation de liquide FC-72 saturé. Les résultats expérimentaux fournissent un nouvel aperçu sur la nature physique des phénomènes de transfert de chaleur au niveau du site de nucléation pendant le processus d'ébullition nucléée.

Grace au développement d'un nouveau dispositif expérimental permettant une mesure plus précise du flux de chaleur et de la température à la surface de la paroi chauffante, nous avons commencé à étudier le déclenchement de l'ébullition nucléée et le régime intermédiaire qui le suit. Une première série d'expériences ont été réalisées dans la situation de la nucléation multisites. Les résultats déjà publiés dans la littérature ont été confirmés ([20], [21], [22], ...). Le but de cet article est de présenter les résultats expérimentaux obtenus pour des expériences d'ébullition sur un site isolé. Pour cela une procédure expérimentale a été réalisée et présentée dans la section suivante. Les résultats expérimentaux obtenus sont analysés dans la quatrième partie avant de récapituler les principaux résultats et dresser quelques perspectives dans le paragraphe dédié à la conclusion.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental a déjà fait l'objet d'une description détaillée dans une publication antérieure [18]. Dans ce qui suit nous rappelons les principaux éléments nécessaires à la compréhension du protocole expérimental. Le dispositif est constitué de plusieurs éléments. Il s'agit pour l'essentiel de la cellule, environnée de plusieurs composants pour assurer le contrôle de la température de saturation du fluide, et de l'élément permettant de provoquer l'ébullition.

La cellule de test est constituée d'une enceinte de forme cubique de 100 mm de côté (figure 1). Sa structure est en téflon et ses faces en plexiglas transparent. Les dimensions des faces carrées sont de 100mm de côté et de 10mm d'épaisseur. Le téflon et le plexiglas sont de faibles conducteurs de la chaleur pour minimiser les pertes thermiques tout en permettant de visualiser à travers toutes les faces la dynamique de l'ébullition. Le volume intérieur de la cellule est de 750 ml. Elle est quasiment remplie de liquide (Fluorinert FC-72). Dans la phase liquide, l'enceinte est équipée d'une résistance chauffante et d'un serpentin dans lequel circule un fluide frigoporteur pour maintenir le liquide à la température de saturation désirée. Dans la zone vapeur, un condenseur permet de condenser la vapeur produite. Un tube à double enveloppe est installé sur la face supérieure de l'enceinte pour évacuer les condensats. La canalisation centrale, reliée à l'enceinte à une extrémité, est occupée par la vapeur et d'éventuels gaz incondensables provenant de gaz dissous dans la phase liquide. L'extrémité opposée est reliée à l'atmosphère par une vanne pour éliminer les gaz incondensables.

Le fluide utilisé pour étudier le phénomène d'ébullition est le Fluorinert FC-72 (3M™). C'est un fluide thermiquement et chimiquement stable, sa température d'ébullition est relativement basse (56,6 °C sous 1 bar) et sa chaleur latente est de 93096J/Kg à 25°C. Quatre thermocouples de type K placés dans l'enceinte permettent de contrôler la température du fluide. Les pressions dans l'enceinte sont mesurées à l'aide de deux capteurs de type SCX 15DN. Un capteur placé en partie basse mesure la pression du liquide et un autre placé en partie haute mesure la pression de la phase vapeur. Pour provoquer l'ébullition et analyser les différents phénomènes de nucléation, de dynamique des bulles et des transferts de chaleur associés un dispositif approprié nommé «ébulliomètre» est implanté à l'intérieur de l'enceinte dans la zone liquide. Grâce à un passage tournant étanche, l'ébulliomètre peut être incliné suivant un angle allant de 0° (la paroi d'ébullition est alors surmontée du liquide) à 180° (la paroi d'ébullition est située au dessus du liquide).

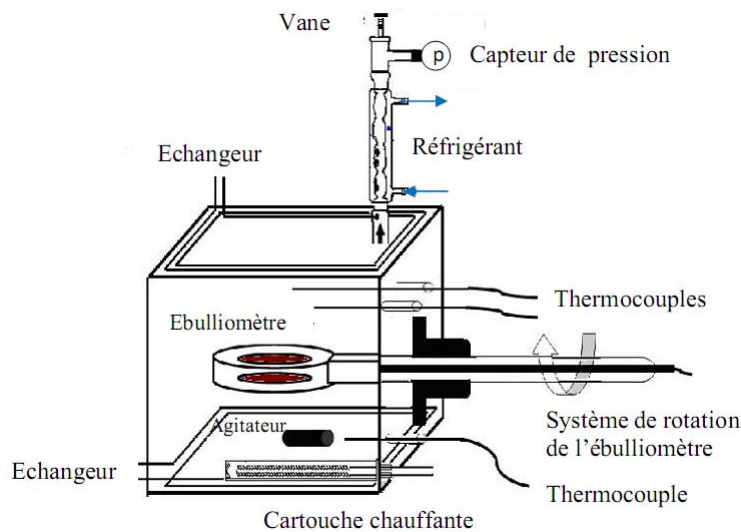


Figure 1 : Cellule test

L'ébulliomètre est un élément de forme cylindrique conçu et fabriqué au laboratoire. Il est composé de trois fluxmètres, deux pastilles en cuivre et un film résistif pour provoquer le chauffage de l'ébulliomètre par effet joule (Fig. 2). Deux fluxmètres identiques sont placés sur les faces supérieure et inférieure de l'ébulliomètre. Ils ont la forme d'un disque circulaire de 20mm de diamètre et de 0,4mm d'épaisseur instrumentés de deux capteurs de flux et de température afin de mesurer le flux de chaleur transmis au fluide et la température de la surface du fluxmètre. Un troisième fluxmètre de forme rectangulaire de 50mm de longueur, 5mm de largeur et 0,4mm d'épaisseur est installé sur le bord latéral de l'ébulliomètre. Pour minimiser les pertes thermiques latérales, une résine isolante est moulée sur la partie latérale externe de l'ébulliomètre. Dans cette étude une des 2 faces de l'ébulliomètre est isolée afin d'étudier l'ébullition sur la surface non isolée de l'ébulliomètre.

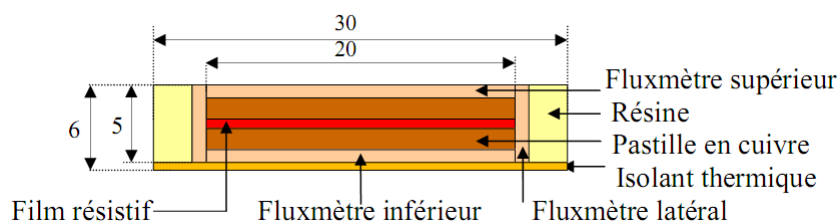


Figure 2 : Schéma d'une coupe transversale de l'Ébulliomètre

Protocole expérimental : Avant de procéder aux expériences, on commence par remplir partiellement la cellule de Fluorinert (FC72) et l'on procède à l'élimination des gaz dissouts contenus dans liquide. La procédure retenue consiste à chauffer progressivement le liquide en utilisant la cartouche chauffante immergée tout en brassant le liquide à l'aide d'un agitateur magnétique. Au bout de quelques instants, la température et la pression augmentent dans la cellule. Dès que le liquide avoisine les conditions de saturation, il y a formation de vapeur et dégazage du liquide. Le mélange vapeur-air se retrouve dans la zone supérieure de l'enceinte surmontée d'un échangeur dans lequel circule un liquide de refroidissement. Une fraction importante de la vapeur est alors condensée, l'autre fraction mélangée aux gaz incondensables est évacuée hors de l'enceinte à travers le condenseur double tube monté d'une vane actionnée manuellement. Cette opération est répétée jusqu'à obtenir les conditions thermodynamiques correspondantes à l'état de saturation du fluide pur. Le chauffage de l'enceinte par la cartouche est alors arrêté. Le fluide se refroidit naturellement jusqu'à la température désirée. Comme l'enceinte est étanche et que le fluide est en état de saturation, la diminution de sa température conduit à la diminution de la pression. Après avoir vérifié les conditions de saturation du fluide à la température désirée, nous fixons l'orientation de la paroi d'ébullition à l'angle désiré et nous provoquons le chauffage de la paroi pour étudier les transferts de chaleur en présence de nucléation de bulles sur le site artificiel.

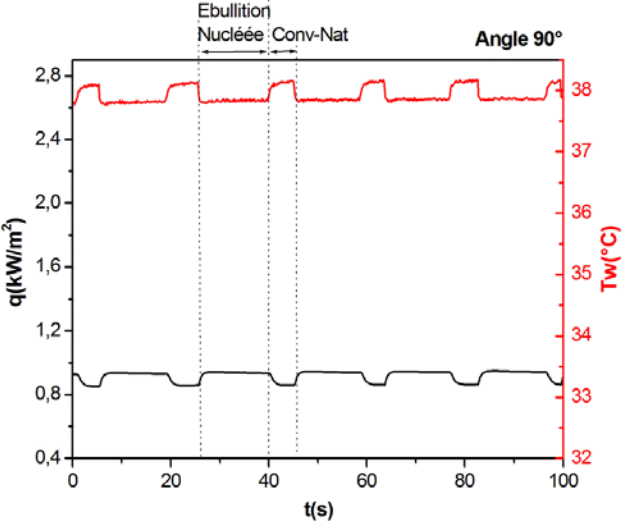
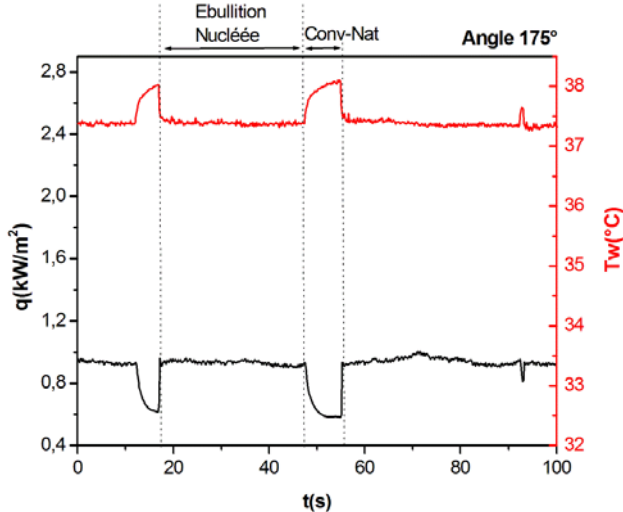
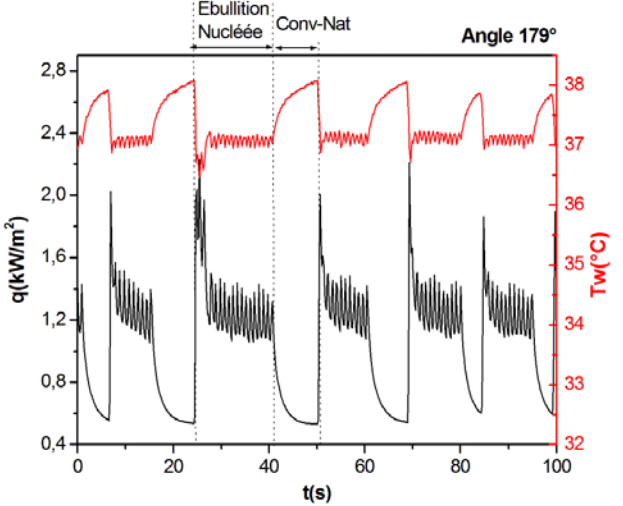
Pour activer ce site situé au centre de la paroi de nucléation, on opère de la manière suivante. Nous imposons d'abord un flux de chaleur par effet Joule relativement élevé (supérieur à 16kW/m^2). Ce flux de chaleur permet d'activer un grand nombre de sites de nucléation ainsi que le site de nucléation artificiel au centre de la surface de nucléation. Nous réduisons alors progressivement le flux de chaleur imposé. Tous les sites de nucléation se désactivent au fur et à mesure jusqu'à n'obtenir que le site de nucléation artificiel activé. Une fois le régime permanent établi pour ces conditions, la température de la paroi, le flux de chaleur échangé entre la surface de nucléation et le liquide et la pression du fluide sont enregistrés. La dynamique des bulles créées sur la paroi est également filmée avec une caméra vidéo.

3. Résultats

Pour une meilleure compréhension du comportement de l'ébullition mono-site en fonction de l'inclinaison de la paroi, quatre inclinaisons de la paroi de l'ébulliomètre ont été étudiées: 0° , 90° , 175° et 179° , où l'angle 0° correspond à une paroi horizontale avec un flux de chaleur vertical orienté vers le haut. Pour toutes les expériences rapportées ici, les conditions de saturation ont été fixées à : $T_{\text{sat}} = 34^\circ\text{C}$, $P_{\text{sat}} = 0,44\text{ bar}$. Après avoir vérifié les conditions de saturation du fluide à la température désirée (34°C) et activé le site de nucléation situé au centre de l'ébulliomètre, nous procédons aux enregistrements de flux de chaleur de la paroi et de la température de la paroi (Fig3). Pendant l'expérience, nous avons observé l'apparition des bulles de vapeur sur le site de nucléation (activation du site de nucléation) durant une période et puis elles disparaissent durant une seconde période (désactivation du site de nucléation) pour le même flux de chaleur imposé. Ces deux périodes se succèdent alternativement pendant toute la durée de l'expérience.

La figure 3 montre les évolutions instantanées du flux de chaleur échangé entre la paroi chauffante et le liquide et de la température de la paroi chauffante en fonction du temps à puissance calorifique imposée constante dans l'élément chauffant. Ces courbes ont été enregistrées en présence et en absence de bulles de vapeur sur le site artificiel unique situé au centre de la paroi chauffante pour quatre inclinaisons de la paroi 0° , 90° , 175° et 179° . Quelle que soit l'orientation de la paroi, il existe deux régimes de transfert de chaleur: le premier régime correspond au transfert de chaleur en présence des bulles de vapeur émises du site de nucléation. Le second régime correspond à la convection naturelle en phase liquide. La

transition entre le régime de convection naturelle et celui de d'ébullition monosites, est caractérisée par une augmentation brutale du flux de chaleur échangé entre la paroi et le fluide. Elle s'accompagne par ailleurs d'une diminution brutale de la température de la paroi chauffante. Ces changements brusques résultent de l'apparition de bulles de vapeur sur le site de nucléation. Cette transition correspond au passage du régime de convection naturelle à celui de l'ébullition nucléée sur un site isolé.



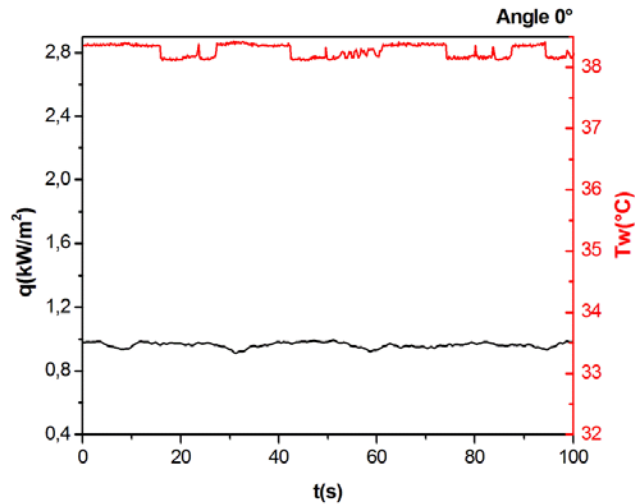


Figure 3 : Evolution temporelle du flux de chaleur et de la température de la paroi chauffante pour les orientations de la paroi 179, 175, 90° et 0° à $T_{sat}=34^{\circ}\text{C}$, $P_{sat}=0,44\text{bar}$

L'écart entre le flux moyen échangé entre la paroi et le liquide en régime d'ébullition nucléée (q_B) et flux moyen échangé en régime de convection naturelle (q_{CV}) en fonction de l'inclinaison de la paroi est représenté sur la figure 4. On remarque que cet écart augmente avec l'inclinaison de la paroi. Il passe de 30W/m^2 à 0° à 692W/m^2 à 179° .

En régime d'ébullition nucléée sur site isolé, Le transfert de chaleur est gouverné par la taille et la fréquence d'émission des bulles au niveau de la paroi. A 0° , la taille de la bulle formée avant son détachement est faible ($\approx 1\text{mm}$) tandis que la fréquence d'émission des bulles est très élevée ($\approx 4\text{hz}$). Dans ces conditions le comportement des bulles de vapeur modifie la couche limite au niveau de la paroi. Cette modification est d'autant plus prononcée que l'angle d'inclinaison de la paroi augmente. En effet la taille des bulles croit et la fréquence diminue d'autant plus que l'angle d'inclinaison croit. Les flux de chaleur transférés en présence de bulles sont d'autant plus importants que l'angle d'inclinaison croit. A 179° les bulles formées ont une taille de détachement avoisinant 1 cm et une fréquence de 1 Hz . Au cours de leur croissance elles sont aplaties sur la paroi par les effets de poussée d'Archimède et occupent une surface importante de la paroi avant leur détachement. La dynamique de ces bulles engendre des modifications importantes de la couche limite thermique au voisinage de la paroi. Il s'ensuit une augmentation des transferts de chaleur en présence de bulles plus importante que dans le cas d'un angle d'inclinaison de 0° .

La figure 5 représente l'écart entre la température de la paroi en régime d'ébullition nucléée monosite (T_{WB}) et en régime convection naturelle (T_{WCV}) en fonction de l'orientation de la paroi chauffante. On observe qu'une augmentation de l'angle d'inclinaison de la paroi chauffante engendre un écart de température plus conséquent. Il passe de $-0,2^{\circ}\text{C}$ pour une inclinaison de 0° à $-0,9^{\circ}\text{C}$ à 179° . Ces lois de variations résultent du comportement du fluide au voisinage de la paroi. La couche limite thermique est modifiée en présence des bulles. Elle est d'autant plus perturbée que la taille de la bulle croit.

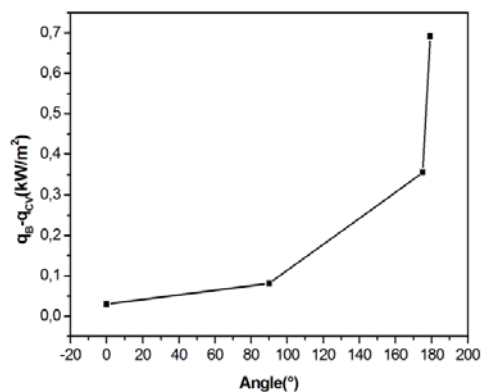


Figure 4 : Ecart entre le flux de chaleur en régime d'émission de bulle et de convection naturel en fonction de l'orientation de la paroi

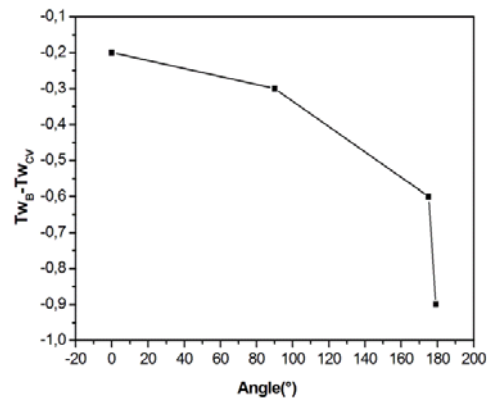


Figure 5 : Ecart entre les températures en régime d'émission de bulle et de convection naturel en fonction de l'orientation de la paroi

4. Conclusion

Dans ce travail, nous avons étudié les transferts de chaleur dans un liquide saturé (CF-72), en régime de convection naturelle et d'ébullition nucléée sur un site isolé. La première conclusion est relative à la mise en œuvre de l'ébulliomètre et ses capacités à mesurer l'évolution du flux de chaleur et de la température à la paroi en contact avec le fluide. La sensibilité de ce capteur permet une analyse approfondie du processus d'ébullition sur un site isolé même dans des conditions de déclenchement de l'ébullition nucléée (ONB).

Nous avons présenté les résultats préliminaires. Ils concernent les caractéristiques temporelles de transfert de chaleur pour les deux régimes. Nous avons montré l'influence de l'orientation de la paroi sur les transferts de chaleur pour un site de nucléation unique. Les expériences nous ont permis de mettre en évidence la forte influence de l'inclinaison sur le transfert de chaleur en présence de changement de phase liquide-vapeur, dans le cas d'un site de nucléation unique.

Références

- [1] Nukiyama. (1934). Maximum and minimum values of heat q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 37, pp. 367–374.
- [2] Forster., Greif. (1959). Heat transfer to a boiling liquide - mechanisms and correlations, *Journal of heat transfer*, Vol. 81, pp. 43–53.
- [3] Rohsenow. (1962). A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids, *Transaction ASME*, Vol. 84, pp 969–976.
- [4] Han., Griffith. (1965). The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—part I: Bubble initiation, growth and departure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 8(6), pp. 887–904.
- [5] Siegel, R. and Keshock, E. G. (1965). Nucleate and film boiling in reduced gravity from horizontal and vertical wires. *NASA Technical Report R-216*
- [6] Cooper. (1969). The microlayer and bubble growth in nucleate pool boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 12(8):915–933, 1969. 0017-9310 doi: DOI: 10.1016/00179310(69)90155-0. 16, 61
- [7] Stephan, K. and Abdelsalam, M. (1980). Heat-transfer correlation for natural convection boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer* Vol. 23, pp. 73–87.
- [8] Gorenflo, D. (1993). Pool boiling, *VDI Heat Atlas*, (Chapter HA)

- [9] Stephan, P. and Kern, J. (2004). Evaluation of heat and mass transfer phenomena in nucleate boiling, *International Journal of Heat and Fluid Flow* Vol. 25, pp. 140–148
- [10] Demiray, F., Kim, J. (2004). Microscale heat transfer measurements during pool boiling of FC-72: effect of subcooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 47, pp. 3257–3268
- [11] Manickam, S., Dhir, V. (2012). Holographic interferometric study of heat transfer to a sliding vapor bubble. *International Journal of Heat and Mass Transfer* Vol. 55, pp. 925–940
- [12] Steinbichler, Micko, and Straub (1998). Nucleate boiling heat transfer on a small hemispherical heater and a wire under microgravity. In *11th International Heat Transfer Conference*, Vol. 2, pp. 539–544.
- [13] Straub., Hartnett, J. P. (2001). Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity, In *Advances in Heat Transfer*, Vol. 35, pp. 57–172.
- [14] Kannengieser, O., Colin, C., Bergez, W. (2010). Influence of gravity on pool boiling on a flat plate: Results of parabolic flights and ground experiments, *Experimental Thermal and Fluid Science*, doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.04.010
- [15] Chang, J. H., You, S. M. (1996). Heater orientation effects on pool boiling on micro-porous-enhanced surfaces in saturated FC-72, *J Heat Transfer*, Vol. 118, pp. 937–43.
- [16] Parker, J. L., El-Genk, M. S. (2006). Subcooled Boiling of Dielectric Liquids on Porous Graphite at Different Orientations, *Proceedings 13th In Heat Transfer Conference*, Paper No. BOI-36, Sydney, Australia.
- [17] Kwark, S. M., Amaya, M., Kumar, R., Moreno, G., You, S. M. (2010). Effects of pressure, orientation, and heater size on pool boiling of water with noncoated heaters, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 5199-5208
- [18] Zamoum, M., Tadrist, L., Combeau, H., Kessal, M. (2012). Etude expérimentale des transferts de chaleur en ébullition nucléée : Influence de la pression de saturation du fluide, *Congrès français de thermique, SFT2012*, Bordeaux-Talence 29 mai - 01 juin 966-973
- [19] Schlindwein, A. R., Martin Jr, F.O., Misale, M., Passos, J. C. (2009). Nucleate boiling of FC-87/FC-72 zeotropic mixtures on a horizontal copper disc, *Heat Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 937-944S
- [20] Nishikawa., Fujita., Satoru., Ohta. (1984). Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 27(9), pp. 1559–1571
- [21] Priarone. A, (2005). Effect of surface orientation on nucleate boiling and critical heat flux of dielectric fluids, *Int J Thermal Sci*, Vol. 44, pp. 822–31.
- [22] Zamoum, M., Tadrist, L., Rahli, O., Kessal, M., Combeau, H. (2011). Etude expérimentale des transferts de chaleur en ébullition nucléée : Influence de l'orientation de la paroi de nucléation, *Congrès français de thermique, SFT2011*, Perpignan 24-27 mai 923-928
- [23] Golobic, I., Petkovsek, J., Baselj, M., Papez, A., Kenning, D. B. R. (2006). Experimental determination of transient wall temperature distributions close to growing vapor bubbles, in: *ECI International Conference on Boiling Heat Transfer*, Spoleto, 2006.
- [24] Cheng, D. C., Burkhardt, H. (2006). Template-based bubble identification and tracking in image sequences, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 45, pp. 321–330.
- [25] Van der Geld, C. W. M. (2004). Prediction of dynamic contact angle histories of a bubble growing at a wall, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25, pp. 78–80.
- [26] Vasquez, A., Sanchez, R.M., Salinas-Rodriguez, E., Soria, A., Manasseh, R. (2005) A look at three measurement techniques for bubble size determination, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 30, pp 49–57
- [27] Siedel, S., Cioulachtjian, S., Bonjour, J. (2008). Experimental analysis of bubble growth, departure and interactions during pool boiling on artificial nucleation sites, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 32, pp. 1504-1511
- [28] Moghaddam, S., Kiger, K. (2009). Physical mechanisms of heat transfer during single bubble nucleate boiling of FC-72 under saturation conditions-I. Experimental investigation *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 1284–1294