

Etude expérimentale des transferts de chaleur en ébullition nucléée : Influence de l'orientation de la paroi de nucléation.

Mohamed ZAMOUM^{1, 2*}, Lounès TADRIST², Ouamar RAHLI², Mohand KESSAL¹, Hervé COMBEAU³

¹Département Transport et Equipements des Hydrocarbures, Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, Université M'hamed Bougara, Boumerdès, 35000, Algérie

²Polytech'Marseille, Laboratoire IUSTI, UMR CNRS 6595, Technopôle de Château Gombert, 5 rue Enrico Fermi, 13453 Marseille Cedex 13, France

³Institut Jean Lamour, Dép. SI2M, CNRS – Nancy-Université – UPV-Metz, Ecole des Mines de Nancy, Parc de Saurupt CS 14234, F-54042 Nancy cedex, France

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

Résumé - Les travaux réalisés dans le cadre de cette étude ont pour but d'accéder à une meilleure compréhension des transferts de chaleur en ébullition nucléée. Un dispositif expérimental a été réalisé pour générer l'ébullition d'un liquide sur une paroi chauffante orientable par rapport à la gravité et instrumentée. Des mesures de température, de pression et de flux de chaleur associées à des observations du phénomène d'ébullition sont mises en œuvre. Les premiers résultats obtenus permettent de mettre en évidence une influence de l'orientation de la surface sur les transferts de chaleur en ébullition nucléée.

1. Introduction :

Le processus d'ébullition et les transferts de chaleur associés ont une grande importance dans de nombreuses applications industrielles et environnementales. Un nombre important de recherches ont été conduites depuis plusieurs décennies pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu lors de l'ébullition et pour l'établissement de lois de transferts de chaleur associées [1], [2] à des fins de dimensionnement des composants mécanique, énergétique ou thermique. 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 [3] et [4]. Par ailleurs de nombreux travaux sur l'ébullition en microgravité ont été conduits au cours des dernières décennies [5], [6] et [7]. 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. La présente étude a pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension du phénomène d'ébullition multi-sites en étudiant l'influence des paramètres dominants sur les mécanismes d'ébullition et les transferts de chaleur associés. Nous focalisons dans la présente étude nos travaux sur l'influence de l'orientation de la paroi par rapport à la gravité sur la dynamique de l'ébullition et les transferts de chaleur. Dans ce domaine Githinji et Sabersky [8], Marcus et Dropkin [9], Littles et Wallis [10] et Li-Ting Chen [11] ont étudié l'influence de l'orientation d'une paroi en cuivre sur les transferts de chaleur en ébullition. Les résultats les plus aboutis sont ceux de Nishikawa et al [12]. Ces auteurs ont étudié l'ébullition de l'eau sur une paroi de cuivre plane orientable de 0 à 175° par rapport à l'horizontale. Ils ont montré que l'orientation de la surface a une influence remarquable sur le transfert de chaleur dans les régions de faible flux où le coefficient d'échange de chaleur augmente avec l'augmentation de l'angle d'inclinaison.

Dans le présent travail, nous étudions l'ébullition multi-sites en réalisant des investigations dans des conditions opératoires parfaitement contrôlées. Le dispositif expérimental 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. Nous accédons ainsi à l'établissement de la courbe caractéristique des transferts de chaleur en régime d'ébullition nucléée dans un bain de FC-72. Nous mettons en évidence l'influence de l'orientation de la surface chauffante sur les transferts de chaleur en ébullition nucléée. Dans une première partie, nous décrivons le dispositif expérimental mis en œuvre et l'instrumentation pour étudier les transferts de chaleur. Nous présenterons les résultats expérimentaux préliminaires et nous discuterons ces résultats en les comparant avec les résultats de la littérature.

2. Dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est conçu de manière à contrôler les conditions thermodynamiques du fluide qu'il faut maintenir dans des conditions de saturation. Il faut donc réaliser l'ébullition sur une paroi dont l'état de surface est contrôlé ainsi que les conditions thermiques imposées. Pour atteindre ces objectifs le dispositif est constitué de plusieurs composants. Il s'agit pour l'essentiel de la cellule, environnée de plusieurs éléments pour assurer le contrôle de la température et de la saturation du fluide, et de l'élément permettant de provoquer l'ébullition. La figure 1 représente une vue synoptique du dispositif expérimental.

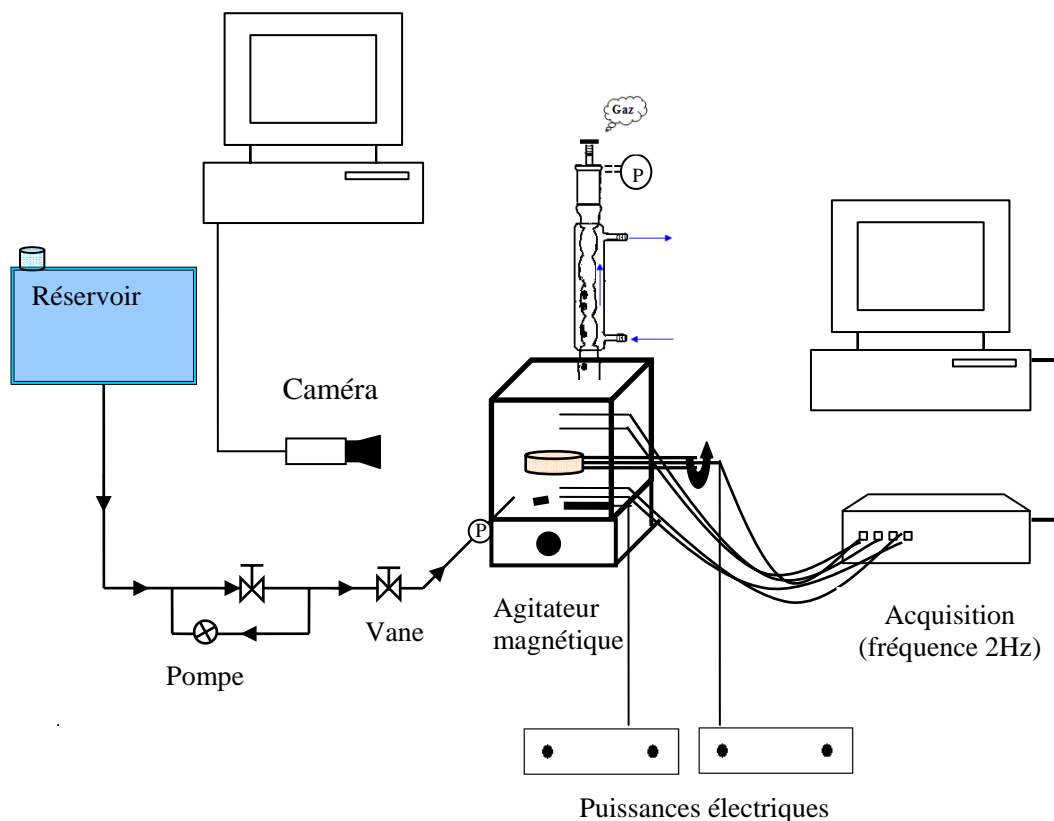


Fig. 1 dispositif expérimental

2. 1. Cellule de test et son environnement (Fig. 2) : La cellule de test réalisée au laboratoire est constituée d'une enceinte de forme cubique de 100 mm de côté. 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 quasiment remplie de liquide (Fluorinert FC-72). Cette cellule est conçue pour être étanche dans la gamme de pressions absolues allant de 0,1bar à 2bars. Dans la phase liquide, elle est équipée d'une résistance chauffante et d'un serpentin dans lequel circule un fluide frigoporteur. Ces deux éléments permettent de maintenir le liquide à température de saturation désirée lors de l'ébullition du liquide. Dans la zone vapeur, un condenseur permet de condenser la vapeur produite par ébullition et de maintenir l'enceinte dans les conditions de saturation. Pour évacuer les incondensables, un tube à double enveloppe est installé sur la face supérieure de l'enceinte. 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. Dans la zone annulaire le liquide de refroidissement permet de condenser seulement la vapeur et de la séparer ainsi des gaz incondensables. Ces gaz sont ensuite évacués vers le milieu extérieur par la vanne supérieure de la canalisation.

Le fluide test choisi pour étudier les phénomènes 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. Comparée à celle de l'eau elle est 26 fois inférieure. Les conditions opératoires d'études sont plus faciles à réaliser et à maîtriser pour ce fluide, ce qui en justifie le choix. Pour assurer une température homogène dans la phase liquide, un agitateur magnétique posé sur le fond de l'enceinte dans la zone liquide, permet d'homogénéiser la température du liquide lorsque cela est nécessaire. 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 «ébullomètre» est implanté à l'intérieur de l'enceinte dans la zone liquide. Grâce à un passage tournant étanche, l'ébullomètre peut être incliné par rapport à l'horizontale avec un angle quelconque.

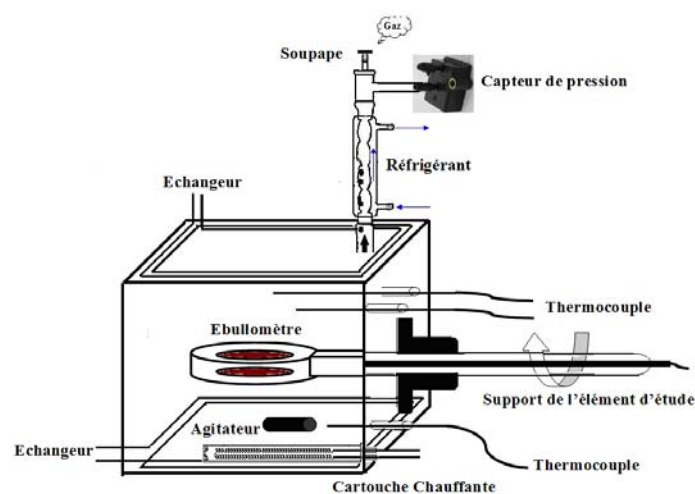


Fig. 2 Cellule test

2. 2. Ébullomètre : C'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'ébullomètre par effet joule (Fig. 3). Deux fluxmètres identiques sont placés sur la face supérieure et inférieure de l'ébullomètre. 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'ébullomètre. Ce capteur permet de mesurer le flux de chaleur transmis à travers la surface latérale de l'ébullomètre. Ainsi ce dernier permet de réaliser des investigations de l'ébullition dans des conditions parfaitement contrôlées : pour les transferts de chaleur au niveau des parois planes et de l'état de surface pour lesquelles il est possible de réaliser un traitement de surface (dépôt, sites artificiels, ...) afin de maîtriser les conditions de nucléation.

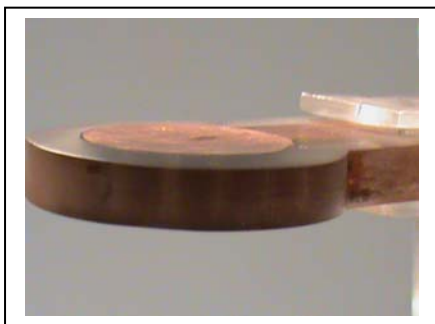


Photo de l'ébullomètre

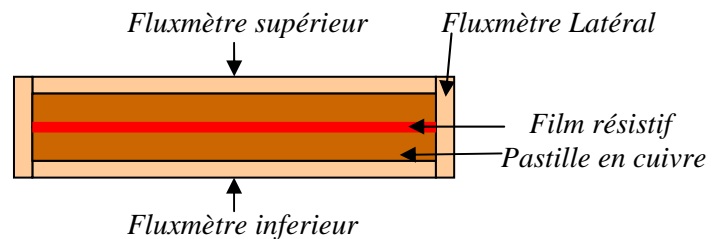


Fig. 3 Coupe verticale de l'Ébullomètre

2.3. Protocole expérimental : Avant de procéder aux expériences, on commence par remplir partiellement la cellule de Fluorinert (FC72) liquide. La première opération est le dégazage complet du 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 montée d'une soupape actionnée manuellement. Cette opération est répétée plusieurs fois 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 ambiante. 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 ambiante, nous procédons aux expériences d'ébullition. Pour cela un apport de chaleur par effet joule est amené progressivement à l'aide du film résistif situé au cœur de l'ébullomètre. Le flux de chaleur dissipé peut atteindre au maximum 20 Watts. De faibles valeurs de flux de chaleur sont nécessaires étant donné que l'ébullition est générée dans un liquide de faible chaleur latente et dans des conditions de saturation avec de très faibles déperditions de chaleur. Chaque condition d'expérience consiste à imposer un flux de chaleur constant. Un transfert de chaleur s'installe entre l'ébullomètre et le liquide. Une fois le régime établi l'ensemble des données thermodynamiques et thermiques : le flux échangé à travers la surface de nucléation, la

température de la surface de nucléation, la température et la pression du bain sont enregistrés. La dynamique de l'ébullition engendrée sur la paroi de l'ébullomètre est également filmée à l'aide d'une caméra. Cette opération est renouvelée pour plusieurs valeurs du flux de chaleur sur toute la gamme accessible. Les limitations sont essentiellement dues à la résistance des matériaux constituant l'enceinte et l'ébullomètre. Ici l'élément limitant et le film résistif pour lequel la température ne doit pas excéder 100°C.

3. Résultats :

A titre d'illustration des capacités de la cellule d'étude, nous présentons des résultats montrant l'influence de l'orientation de la surface chauffante par rapport à la gravité sur les transferts de chaleur. La figure 4 montre les courbes caractéristiques d'ébullition à flux croissant pour plusieurs inclinaisons de la paroi. Quelle que soit l'orientation de la paroi, les courbes caractéristiques présentent la même allure exceptée pour l'angle de 180°. Nous observons pour toutes les orientations, l'existence de trois domaines qui correspondent pour le premier aux plus faibles surchauffes à un régime de convection naturelle, faisant place après un régime de transition à un régime d'ébullition nucléée. A faible surchauffe de la paroi les caractéristiques de transfert de chaleur sont très voisines. En revanche au fur et à mesure que l'angle d'inclinaison augmente, de 0° à 180°, la surchauffe nécessaire au déclenchement de l'ébullition diminue. Cette diminution est d'autant plus marquée que l'angle d'inclinaison est important. La valeur la plus faible (7,5°C) est obtenue pour un angle égal à 180°. Pour une inclinaison nulle cette surchauffe atteint la valeur de 22°C.

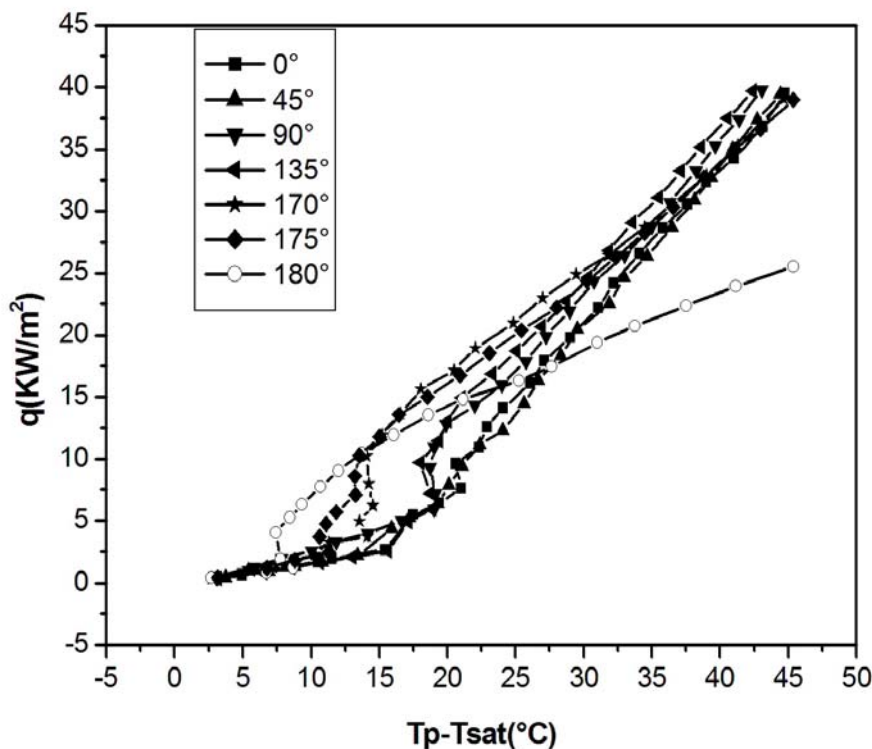


Fig. 4 Effet de l'orientation de la paroi sur la courbe caractéristique de l'ébullition nucléée du FC-72 à la température de saturation de 25°C

Pour les densités de flux importantes les courbes caractéristiques présentent sensiblement les mêmes variations avec cependant une croissance d'autant plus faible que l'inclinaison est

importante. Cet effet est le plus marqué pour une inclinaison égale à 180° . Ces résultats peuvent être interprétés comme étant dus à la combinaison de plusieurs effets. Nous tentons ici d'avancer les premières hypothèses pour expliquer ces observations. En effet les mécanismes de transferts de chaleur sont gouvernés par le comportement du mélange diphasique liquide vapeur dans la couche limite au voisinage immédiat de la paroi. Ce mélange diphasique engendre des transferts d'autant plus importants que la fraction volumique de la vapeur est importante jusqu'à une certaine valeur au delà de laquelle la vapeur devient limitante aux transferts de chaleur. Il y a donc une compétition de deux effets : un effet de remouillage de la paroi par le liquide qui tend à expulser la vapeur et un autre effet d'assèchement induit par une production de vapeur importante.

4. Conclusion :

Dans ce travail, nous avons étudié les caractéristiques des transferts de chaleur dans un liquide dans les conditions de saturation en présence de convection naturelle et d'un régime ébullition nucléée. Pour cela nous avons mis en œuvre un dispositif expérimental original comportant un ébullomètre. Cet ensemble permet d'étudier l'ébullition mono et multi-sites dans des conditions opératoires parfaitement contrôlées. Il est maintenant possible de réaliser des investigations nouvelles pour fournir des données de références sur le phénomène de nucléation, d'ébullition nucléée et des transferts de chaleur induits. Les résultats préliminaires présentés ici laissent présager des développements importants sur la base de l'expérience mise en œuvre. Nous montrons en particulier un résultat original sur l'influence de l'orientation de la paroi. Ces travaux nous permettront sans doute de revisiter le phénomène d'ébullition et d'interpréter des résultats de la littérature inexpliqués à ce jour.

Références

- [1] Nukiyama. Maximum and minimum values of heat q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure. *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*; (37), 367–374, (1934).
- [2] Forster and Greif. Heat transfer to a boiling liquide - mechanisms and correlations. *Journal of heat transfer* 81 :43–53, (1959).
- [3] Rohsenow. A method of correlating heat transfer data for surface boiling of liquids; *Transaction ASME*, 84, 969–976, (1962).
- [4] Han and Griffith. The mechanism of heat transfer in nucleate pool boiling—part I: Bubble initiation, growth and departure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 8(6), 887–904, (1965).
- [5] Siegel and Keshock. Effects of reduced gravity on nucleate boiling bubble dynamics in saturated water. *Journal of AIChE*, 10(4) :509–517, (1964).
- [6] Straub and James P. Hartnett. Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity. In *Advances in Heat Transfer*, volume Volume 35, pages 57–172. Elsevier, (2001)
- [7] O. Kannengieser, C. Colin, W. Bergez. Influence of gravity on pool boiling on a flat plate: Results of parabolic flights and ground experiments. *Experimental Thermal and Fluid Science* (2010), doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.04.010
- [8] P. M. Githinji and R. H. Sabersky, Some effects of the orientation of the heating surface in nucleate boiling, *Trans. Am.Soc. Mec. Engrs, Series C, J; Heat Transfer* 85(4), 379, (1963)
- [9] B. D. Marcus and D. Dropkin. The effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 6, 863–866, (1963)
- [10] J. W. Little and H. A. Wallis. Nucleate pool boiling of Freon 113 at reduced gravity levels, ASME paper, 70-HT-17 (1970)
- [11] L. T. Chen. Heat transfer to pool-boiling Freon from inclined heating plate. *Lett. Heat Mass Transfer* 5(2), 111-120(1978)
- [12] Nishikawa, Fujita, Satoru, and Ohta. Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 27(9): 1559–1571, 1984