

Caractéristiques de l'ébullition basse pression dans le cadre des machines à sorptions : comparaison avec l'ébullition à pression atmosphérique.

Florine Giraud^{1,2}, Romuald Rulliere^{1*}, Cyril Toublanc²,
Marc Clausse¹, Jocelyn Bonjour¹

¹ Université de Lyon, CNRS, INSA-Lyon, CETHIL, UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France
Université Lyon 1, F-69622, France

² Laboratoire de Chimie moléculaire, génie des procédés chimiques et énergétiques (CMGPCE – EA 21), CNAM, ICENER, case 2D3P20, 292 rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03, France

* (auteur correspondant : romuald.rulliere@insa-lyon.fr)

Résumé - Utiliser des machines frigorifiques à sorption permet de substituer une part importante de l'énergie mécanique nécessaire au bon fonctionnement de l'installation par de l'énergie thermique. La plupart permettent également d'utiliser des fluides frigorigènes naturels tels que l'eau. Cependant utiliser de l'eau comme fluide frigorigène pour le refroidissement d'air nécessite de travailler à des pressions de l'ordre de 1 kPa dans l'évaporateur afin d'avoir une température d'évaporation proche de 10 °C ($P_{\text{evap}}/P_{\text{triple}} = 1.5$). Or, à de telles pressions, les phénomènes d'ébullition sont différents de ceux observés à pression atmosphérique. Cette différence est due à la forte variation des propriétés thermophysiques de l'eau dans ces faibles gammes de pressions ainsi qu'à la forte inhomogénéité en pression de l'environnement d'ébullition. Les bulles observées sont de taille centimétrique (jusque 15 cm à 1.2 kPa) et présentent une forme particulière de champignon. Seule la première étape de la croissance de bulle, la croissance isotherme, est observée. Les bulles croissent rapidement et leur détachement n'est non plus gouverné principalement par les forces de gravité et les forces capillaires mais plus probablement par les forces de gravité et d'inertie. Le rapport des forces n'est donc plus le même et la plupart des corrélations existantes ne sont plus applicables à très basse pression.

L'objectif de la présente étude est de mettre en évidence ces différences entre ébullition à pression atmosphérique et ébullition à très basse pression afin de pouvoir envisager, à terme, d'optimiser la conception des échangeurs utilisés jusque maintenant dans les systèmes à sorption. Un banc expérimental a été mis en place afin de pouvoir caractériser l'ébullition de l'eau sur une surface de cuivre sur une large gamme de pression. La surface d'échange est de 19.6 cm². Une analyse thermique ainsi qu'une analyse de la croissance de bulle a été réalisée pour différentes pressions. Trois grands régimes d'ébullition ont été mis en évidence lorsque la pression diminue : un régime de convection naturelle, un régime caractérisé par de long temps d'attente (jusque 400 s) entrecoupé d'apparitions cycliques de bulles de diamètres de détachement variés, et un régime d'ébullition nucléée établie. Ces régimes dépendent de la pression ainsi que du flux imposé. Ils ont une influence non négligeable sur le coefficient de transfert de chaleur moyen ainsi que sur la fatigue du matériau utilisé, car on observe des oscillations de la température de surface pouvant atteindre 14 K. La dynamique de croissance de bulle est étudiée par vidéographie rapide. On montre en particulier que l'évolution du diamètre de détachement des bulles avec la pression présente un maximum.

Nomenclature

g	accélération de l'apesanteur, $m.s^{-2}$
h	hauteur, m
P	pression, kPa
q	flux, $W.cm^{-2}$
T	température, K
t	temps, s
z	distance, m

symboles grecs

ρ masse volumique, $kg.m^{-3}$

Indices et exposants

hydr hydrostatique

l liquide

sat saturation

v vapeur

w paroi

1. Introduction

Utiliser de l'eau comme fluide frigorigène dans des machines à sorption nécessite de travailler au niveau de l'évaporateur à des pressions de l'ordre du kilopascal. À de telles pressions, le phénomène d'ébullition est très différent de celui rencontré à pression atmosphérique. La bulle croît dans un milieu fortement inhomogène en pression et en sous-refroidissement entraînant une forte variation des propriétés thermophysiques du fluide dans le milieu [1]. Malgré ces grandes différences, les connaissances sur ce sujet restent limitées et la conception d'évaporateur basse pression reste très empirique.

L'objectif de la présente étude est d'aller plus loin dans la caractérisation des différences entre l'ébullition à pression atmosphérique et à pressions subatmosphériques. Dans cette optique, un dispositif permettant l'étude de l'ébullition de l'eau sur une surface de cuivre horizontale de $19,6\text{ cm}^2$ pour des pressions de 100 kPa et 1,2 kPa est utilisé.

2. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé ([1], [2]) est constitué d'une enceinte en acier inoxydable de 200 mm de diamètre intérieur et de 420 mm de hauteur. Quatre hublots de 100 mm sont insérés sur la paroi latérale de l'enceinte afin de permettre la visualisation. Un orifice de même diamètre se situe en bas de l'enceinte et permet l'insertion de l'échantillon (Fig. 1).

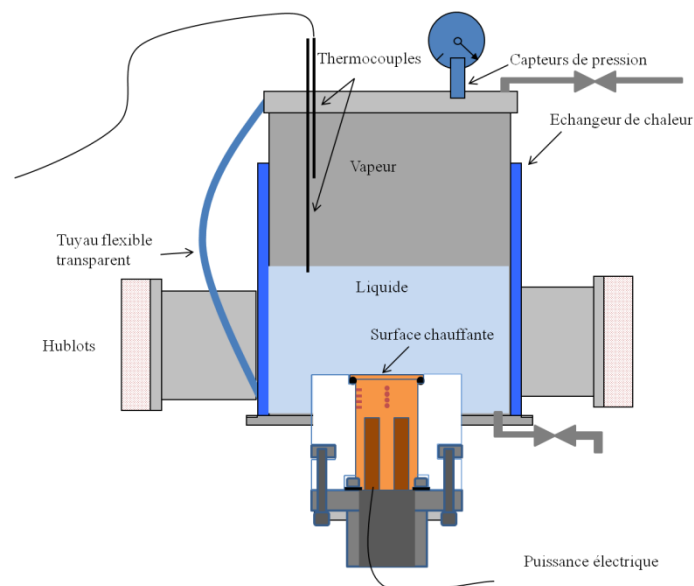


Figure 1: Schéma du dispositif expérimental

L'enceinte est remplie d'eau distillée. Un tuyau flexible transparent relié à l'enceinte permet de contrôler le niveau de liquide. Un échangeur de chaleur situé dans la double peau de l'enceinte permet de contrôler la température du liquide et ainsi la pression dans l'enceinte préalablement mise sous vide. Deux thermocouples de type K permettent de mesurer la température de vapeur et de liquide. Ce dernier thermocouple est situé à 100 mm de la surface chauffante. Deux capteurs de pression allant respectivement de 0 à 1 bar et de 0 à 0,16 bar permettent de mesurer la pression de vapeur.

L'élément chauffant est un bloc de cuivre de 40 mm et de 78 mm de haut présentant une ailette de 50 mm de diamètre et de 1.5 mm d'épaisseur à son sommet (Fig. 2a). Deux cartouches chauffantes de 600 W chacune sont insérées en bas du cylindre. Le tout est entouré de Teflon afin d'assurer une bonne isolation thermique (Fig. 2b). Deux rangées de quatre thermocouples sont insérées dans le cylindre de cuivre afin d'estimer la température de surface ainsi que le flux transmis au fluide à l'aide respectivement d'une méthode inverse 1D et de la loi de Fourier. Négligeant les déperditions thermiques, la température en chaque point de l'échantillon peut ainsi s'écrire sous forme d'un polynôme du premier degré, le coefficient directeur étant proportionnel au flux surfacique et l'ordonnée à l'origine étant la température de surface. La surface d'échange est de 19,6 cm². Cette surface est polie jusqu'à atteindre une rugosité moyenne $R_a = 0,4 \mu\text{m}$ (mesurée à l'aide d'un microscope confocal). En son centre, un site de nucléation artificiel conique de 110 μm de diamètre et 73 μm de profondeur est créé.

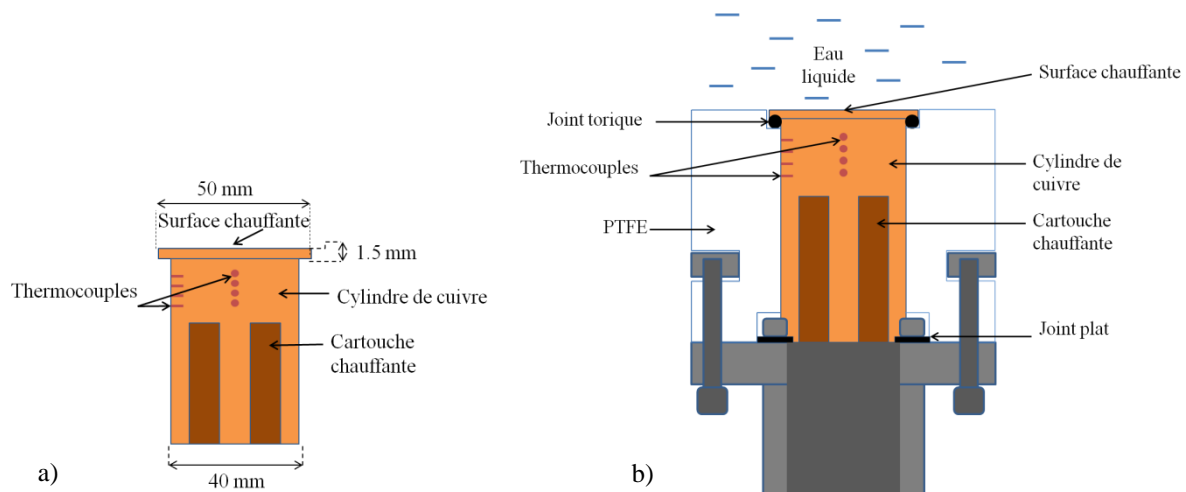


Figure 2: *Détail a) échantillon de cuivre b) support échantillon*

La visualisation de la croissance de bulle se fait par ombroscopie. Une lampe de 400 W est placée proche d'un des hublots alors qu'une caméra rapide permettant de faire des acquisitions de plus de 1000 images par secondes est placée près du hublot opposé.

3. Inhomogénéité en pression et sous-refroidissement du milieu d'ébullition

3.1 Inhomogénéité du milieu en pression

Travaillant à des pressions très faibles devant la pression atmosphérique, l'influence de la pression hydrostatique ne peut être négligée. Ainsi, au niveau de l'interface libre, la pression est égale à la pression de vapeur P_v alors qu'au niveau de l'échantillon celle-ci est égale à $P_v + \rho gh$ avec h la hauteur de remplissage du liquide. Au vu des conditions de travail ($P_v = 1,2\text{kPa}$), 10 cm de liquide suffisent à

doubler la pression au niveau de l'échantillon. Observant des bulles de plusieurs centimètres, la pression vue par le dôme est par conséquent très différente de la pression vue par le pied de bulle.

3.2 Inhomogénéité du milieu en sous-refroidissement

Comme la température de saturation du liquide dépend de la pression, une inhomogénéité en pression du milieu induit également une inhomogénéité du milieu en température de saturation. Or la température de liquide dans l'enceinte (avant toute chauffe) est homogène et égale à la température de saturation de P_v . L'ébullition au niveau de l'échantillon est par conséquent sous-refroidie et pour des conditions données, plus la hauteur de liquide est importante, plus le sous-refroidissement est important. Cependant, la variation de la température de saturation en fonction de la pression suit une loi logarithmique. Le sous-refroidissement maximal (c'est à dire au niveau de l'échantillon) ne dépend donc pas seulement de la hauteur de liquide imposée mais également de la pression de vapeur (cf Fig. 3).

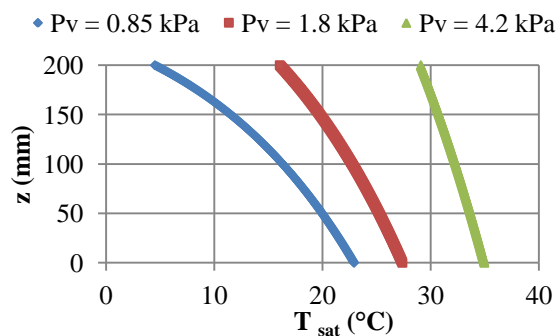


Figure 3: Evolution de la température de saturation dans l'enceinte en fonction de la hauteur pour trois P_v différentes

La figure 3 permet également de mettre en évidence la disparité des gradients de sous-refroidissement en fonction de la hauteur z à laquelle on se situe mais également en fonction des conditions expérimentales. Ainsi le gradient de sous-refroidissement (ainsi que le sous-refroidissement maximal) est plus important à $P_v = 0,85$ kPa qu'à $P_v = 4,2$ kPa. De même qu'à $P_v = 0,85$ kPa, le gradient de sous-refroidissement est plus important dans les centimètres proches de la surface libre qu'au niveau de l'échantillon.

3.3 Conséquences sur les conditions opératoires

Comme vu précédemment, jouer sur la hauteur de liquide et la pression de vapeur permet d'imposer les conditions désirées dans l'enceinte. Cependant, faire varier un de ces paramètres a des conséquences sur trois autres: le sous-refroidissement maximal, le gradient de sous-refroidissement et la pression au niveau de la surface chauffante. Au vu de la taille des bulles observées, aucun de ces paramètres n'est négligeable et ceci est d'autant plus vrai que la pression de vapeur est basse et que par conséquent le sous-refroidissement est important. Ainsi, en deçà d'une certaine pression, le sous-refroidissement est tel que son influence sur la croissance de bulle pourrait être bien plus importante que l'influence due aux variations des propriétés thermophysiques de l'eau telles que la chute de la masse volumique de la vapeur et/ou l'augmentation de la tension superficielle. Il est par conséquent nécessaire de bien définir les conditions opératoires afin de déterminer l'importance de chaque paramètre sur la croissance de bulle.

4. Dynamique de croissance de bulles

À pression atmosphérique deux phases sont présentes durant la croissance de bulle ; une phase dite « isotherme » contrôlée uniquement par l'inertie du liquide et une seconde phase dite « isobare » contrôlée par la diffusion de chaleur à travers la bulle ; seule la première phase existe à basse pression. En raison de la valeur de la masse volumique de la vapeur à si basse pression ($0,009 \text{ kg/m}^3$ à 10°C , contre $0,6 \text{ kg/m}^3$ à 100°C), la croissance de bulle est bien plus rapide qu'à pression atmosphérique. La variation de volume étant très importante, les forces d'inertie et de gravité deviennent rapidement prédominantes, gouvernant le détachement de la bulle. À pression atmosphérique, les bulles restant de taille millimétrique, les forces gouvernant le détachement de la bulle sont les forces capillaires et les forces de gravité.

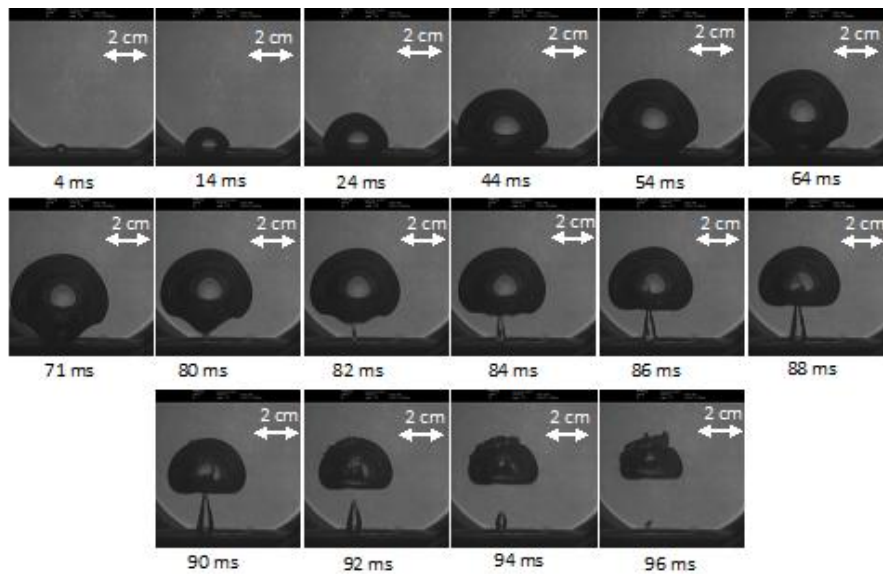


Figure 4: *Dynamique de croissance de bulle avec jets de liquide et de vapeur suivant le départ de la bulle ($P_v = 1,2 \text{ kPa}$, $T_l = 10^\circ\text{C}$, $q = 14,48 \text{ W.cm}^{-2}$)*

L'environnement de la bulle étant très différent à basse pression qu'à pression atmosphérique, les phénomènes mis en jeu sont également différents. Ceci se répercute sur la forme de la bulle. Alors qu'à pression atmosphérique la bulle a une forme globalement sphérique voir légèrement allongée lors du détachement, la bulle à pression subatmosphérique présente une forme de « champignon ». Lors de ses premiers instants de croissance, en raison de la prédominance des forces de tension superficielle, la croissance de bulle et la forme sont globalement similaires à pression sub et atmosphérique. Cependant très rapidement ($t < 14 \text{ ms}$ sur la figure 4), alors que le volume de la bulle augmente, la bulle prend la forme d'un hémisphère aplati au niveau de la base afin de diminuer son énergie. Le volume de la bulle devenant important (plusieurs centimètres), le centre de gravité de la bulle s'élève. Alors qu'elle s'élève, le diamètre du pied de bulle initialement important diminue. Lors de son détachement, un jet de liquide est observé. Ce jet entre dans la bulle par sa base. Rapidement après, un germe de vapeur croît au centre de la zone précédemment asséchée et suit l'ascension de la bulle. La bulle ainsi formée présente la même forme que les bulles obtenues par cavitation. Celle-ci peut atteindre la première bulle avant de se recondenser ou non. Ceci dépend du flux imposé et du degré de sous-refroidissement de l'environnement. Croissant dans un milieu sous-refroidi, la bulle se recondense ensuite.

Le jet de liquide est, d'après [3], une conséquence directe d'une chute de pression due au départ de la bulle. Comme de la vapeur a été surchauffée à cet endroit et qu'une forte dépression est créée au niveau de la surface, la croissance du germe de vapeur surchauffé est facilitée. La taille de cette seconde bulle dépend de la taille de la zone asséchée par la première bulle [4]. Le fait que cette seconde bulle ne soit pas présente à partir d'une certaine pression (13 kPa d'après [3], 15 kPa dans cette étude) est dû d'après les mêmes auteurs à, d'une part la diminution de la zone asséchée, de l'autre à une diminution de la chute de pression entraînée par le départ de la bulle.

5. Analyse thermique

Plusieurs auteurs ([3], [5]) ont observé de larges fluctuations de la température de surface durant la croissance de bulle. McGillis *et al.* [5] expliquent ces fluctuations comme étant la conséquence de la recirculation de liquide froid au départ de la bulle. Que ce soit par McGillis *et al.* [5] ou Van Stralen *et al.* [3], ces fluctuations n'ont été expliquées que lors de la croissance d'une large bulle de temps en temps. Or, comme mentionné par Labunstov *et al.* [6], et comme observé durant cette étude, l'ébullition à basse pression s'avère être très irrégulière, spécialement pour des très faibles gammes de pressions et de faibles flux imposés. Contrairement à l'ébullition à pression atmosphérique, un régime d'ébullition ne peut être caractérisé par la taille de ces bulles et la fréquence de détachement de celles-ci mais par des cycles d'ébullition entrecoupés de longs temps d'attente. Durant ces cycles, le départ d'une large bulle est observé suivi du départ de plusieurs bulles avec des fréquences et des diamètres de détachement différents. Malgré ces apparentes irrégularités, des fluctuations régulières de la température de surface sont observées. De telles fluctuations ne sont pas observées durant les expériences conduites à pression atmosphérique (Fig. 5).

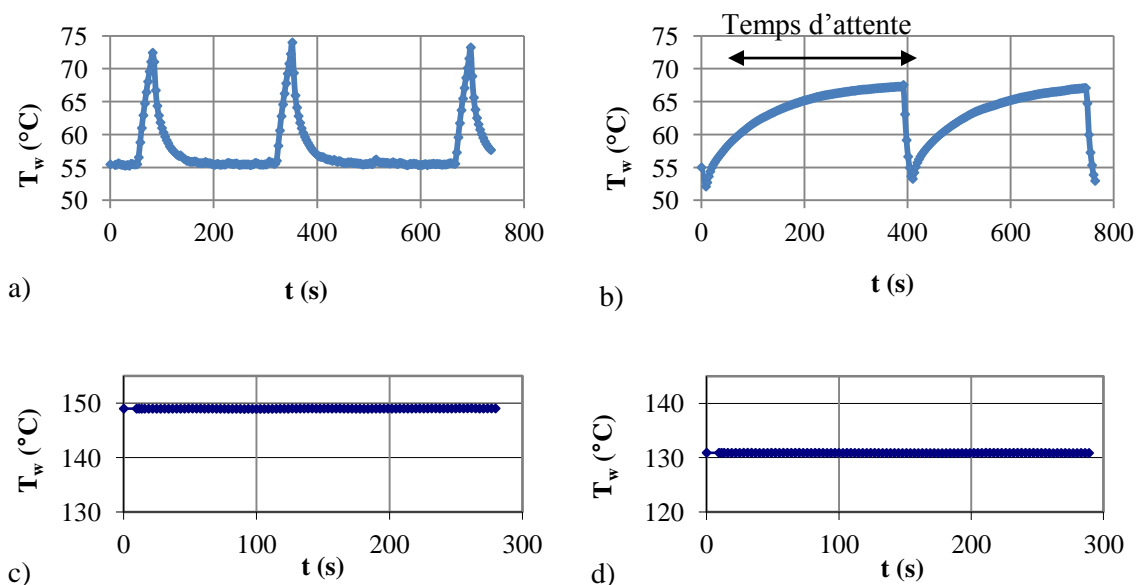


Figure 5: Fluctuations de la température de paroi pour 1,2kPa a) 14,7 $W.cm^{-2}$, b) 6,0 $W.cm^{-2}$; et 100 kPa c) 13,5 $W.cm^{-2}$, d) 6,3 $W.cm^{-2}$, $h_l = 200$ mm

Bien que la surface d'échange ait été polie et qu'un site de nucléation d'une taille donnée ait été créé en son centre, ces fluctuations sont attendues quel que soit l'état de surface du moment que la pression est assez basse. Elles sont dues aux conditions d'ébullition à basse pression et plus particulièrement au sous-refroidissement. Comme mentionné par McGillis [5], lors du départ de la bulle, du liquide fortement sous-refroidi est ramené dans son sillage, refroidissant la surface. Le liquide froid ainsi ramené doit être ensuite réchauffé avant d'atteindre les conditions nécessaires au

déclenchement de l'ébullition. Cette période est appelée par la suite « temps d'attente ». Durant cette période, comme le transfert de chaleur est faible, une grande quantité d'énergie est stockée dans la paroi, augmentant ainsi sa température. Une fois la température suffisante au déclenchement de l'ébullition, l'énergie est retransmise au fluide avec un fort coefficient d'échange. C'est la période d'ébullition.

Le temps d'attente dépend des conditions de pression dans l'enceinte ainsi que du flux imposé. Il peut dépasser 400 s. Pour de faible flux, le temps d'attente est plus important que le temps d'ébullition. Au contraire, pour de fort flux, le temps d'attente est très faible voire même inexistant. À ce moment là, l'ébullition est pleinement établie et le régime observé est similaire à celui observé à pression atmosphérique. La figure 6 représente les courbes d'ébullition obtenues à 1,2 kPa et à pression atmosphérique. Ces courbes représentent le flux instantané estimé versus la surchauffe pariétale instantanée. Les points sont relevés toutes les 3 secondes pendant 10 minutes une fois le régime stable établi.

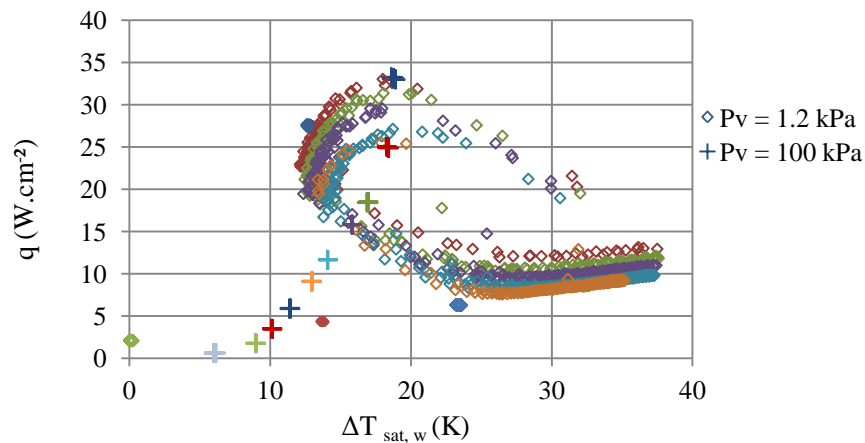


Figure 6: Courbes d'ébullition à $P_v = 100 \text{ kPa}$ et $P_v = 1,2 \text{ kPa}$; $h_l = 200 \text{ mm}$

Comme plus de 200 points sont représentés pour chaque flux imposé, il est visible que pour certaines conditions aucune disparité n'est observée. C'est toujours le cas à pression atmosphérique mais c'est également le cas à très faible flux ou au contraire à haut flux à 1,2 kPa. Ceci peut s'expliquer en étudiant les régimes d'ébullition obtenus. À 1,2 kPa, pour des flux imposés inférieurs à $10 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, la chaleur est transférée par convection. La même phase est observée à 100 kPa pour des flux inférieurs à $0,5 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. Au-delà de ces points, la chaleur est transférée par changement de phase. L'ébullition se déclenche pour des surchauffes pariétales proches de 6 K à pression atmosphérique alors qu'une surchauffe pariétale de 30 K est nécessaire pour déclencher l'ébullition à 1,2 kPa. Une fois l'ébullition déclenchée à pression atmosphérique, les bulles obtenues ont une taille et une fréquence de détachement quasi constantes pour un flux donné. Ce n'est pas le cas à 1,2 kPa. À cette pression, avant d'atteindre $25 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, flux pour lequel des bulles de fréquence de détachement et de diamètre de détachement sont constants comme à pression atmosphérique, l'ébullition est entrecoupée de temps d'attente plus ou moins long. C'est durant ce régime que sont observées les plus fortes fluctuations de température pariétale. Durant ce régime, les fluctuations peuvent atteindre 20 K et le coefficient de transfert de chaleur peut être sévèrement dégradé.

Ces fluctuations sont observées pour chaque expérience réalisée à pression subatmosphérique. Leur amplitude augmente lorsque la pression d'étude diminue pour une hauteur de liquide donnée. L'importance de ces fluctuations est à relier au degré de sous-refroidissement maximal atteint dans l'enceinte.

Ainsi, étant en ébullition sous-refroidie, les surchauffes nécessaires au déclenchement de l'ébullition sont plus importantes à basse pression qu'à pression atmosphérique. Cependant, une fois l'ébullition pleinement établie, les coefficients d'échange sont nettement meilleurs dans ce premier cas que dans le second. Une large gamme de flux imposé compris entre le déclenchement de l'ébullition et l'ébullition pleinement établie présente néanmoins des coefficients d'échange qui peuvent être fortement dégradés par rapport aux coefficients d'échange obtenu à 100 kPa, la surchauffe pariétale pouvant varier de plus de 20 K pour un même flux imposé.

6. Conclusion

Un dispositif expérimental permettant la caractérisation de l'ébullition de l'eau sur une surface horizontale de cuivre pour des pressions allant de 100 kPa à 1,2 kPa est utilisé. Comme la principale particularité de l'ébullition à pression subatmosphérique repose sur l'inhomogénéité du milieu d'ébullition, un paragraphe est dédié à l'explication de ce phénomène. La forme des bulles obtenues à pression sub et atmosphérique sont comparées et analysées. La croissance de bulles à pression subatmosphérique est rapide et fait intervenir seulement la phase de croissance inertielle. Les bulles observées présentent une forme de champignon avec un jet de liquide pénétrant par la base de celle-ci et entraînant la naissance d'une seconde bulle par cavitation. Les bulles ont une taille centimétrique. Enfin une analyse thermique est réalisée : de fortes fluctuations de la surchauffe pariétale pour des flux donnés sont observées à 1,2 kPa, alors qu'aucune fluctuation n'est enregistrée à pression atmosphérique. Ces fluctuations sont à relier au régime d'ébullition observé au même moment. Pour des régimes d'ébullition communs aux deux pressions (transfert par convection naturelle, régime d'ébullition établie), aucune fluctuation n'est observée. Par contre pour un régime propre à l'ébullition basse pression et caractérisé par le départ d'une large bulle suivi du départ de plusieurs bulles de différentes tailles entrecoupé de plus ou moins long temps d'attente, des fluctuations pouvant atteindre 20 K sont enregistrées.

Références

- [1] F. Giraud, R. Rullière, C. Toubanc, M. Clause, J. Bonjour, Experimental evidence of a new regime for boiling of water at subatmospheric pressure, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 60 (2015) 45-53
- [2] R. Rullière, B. Siedel, P. Haberschill, 2012. Experimental evaluation of bubble growth of water at very low pressure. *ECI 8th Int. Conf. On Boiling and Condensation Heat Transfer*. Lausanne. Switzerland.
- [3] Van Stralen S. J. D., Cole R., Sluyter W. M., Sohal M. S., 1975. Bubble growth rates in nucleate boiling of water at subatmospheric pressures. *Int. J. Heat Mass Transfer*. vol. 18, p. 655-669.
- [4] Clark J. A., Merte H., 1973. Private communication with Van Stralen. University of Michigan.
- [5] McGillis R., Carey V. P., Fitch J. S., Hamburg W. R., 1991. Pool boiling enhancement techniques for water at low pressure. *Proceedings of the Seventh IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium*. Phoenix, Arizona. P. 64-72.
- [6] Labuntsov D. A., Jagov V. V., Gorodov A. K., 1978. Critical heat fluxes in boiling at low pressure region. *Proc. 6th Int. Heat Transfer Conf. Vol 1*, p 221-225.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier l'ANR pour le financement de cette étude ainsi que tous les partenaires du projet ANR ECOSS (contract n°: ANR-11-SEED-0007-001). Ce projet a pour objectif de comprendre les phénomènes mis en jeu dans les évaporateurs des machines à sorption utilisant de l'eau comme fluide frigorigène afin d'optimiser leur taille.