

## ETUDE EXPERIMENTALE DU TRANSFERT THERMIQUE EN EBULLITION NUCLEEE EN VASE LORS DE LA COALESCENCE DES BULLES

ABDOULAYE COULIBALY<sup>1</sup>, [coolby448@gmail.com](mailto:coolby448@gmail.com)

<sup>1</sup>Ecole Normale Supérieure, Département de physique et chimie, BP 241, Bamako, Mali

### Résumé

Cette étude se focalise sur l'analyse de la dynamique des bulles lors de la coalescence pendant l'ébullition nucléée en vase ainsi que de ses effets sur le transfert thermique. L'étude consiste en des investigations expérimentales pour caractériser la dynamique des bulles, les écoulements fluides et les effets thermiques dus à la coalescence pendant l'ébullition nucléée. Les investigations ont été faites en utilisant une plaquette de micro-éléments chauffants de dimensions 100µm x 100µm gravée sur un substrat de verre, pour obtenir des mesures de flux thermiques dans le temps et dans l'espace. Le but est de décrire la dynamique du mouvement fluide aussi bien que les interactions thermiques avec et sans coalescence entre deux ou trois bulles en croissance ou se détachant de la surface. Les investigations ont été effectuées pour différentes surchauffes de la surface. Les investigations expérimentales sur la coalescence des bulles ont analysé les mécanismes favorisant la coalescence des bulles et l'effet de la coalescence sur le transfert thermique de la surface. Le flux thermique lors de l'ébullition avec la coalescence fluctue beaucoup plus que pour le cas de l'ébullition à bulle unique due à la vaporisation de la microcouche liquide piégée entre les bulles qui coalescent.

**Mots-clés** : microéléments chauffant, coalescence de bulles, dynamique de bulle, transfert thermique.

### Abstract:

This study focuses on analyzing the bubble dynamics during coalescence in nucleate pool boiling and its effects on the heat transfer. The study uses experimental investigation to characterize the bubble dynamics, fluid flows and thermal effects due to coalescence during nucleate pool boiling. The investigations use using various types of microheaters 100µm x 100µm in size etched on glass substrates to obtain time and space resolved heat transfer measurements. The purpose is to describe the dynamics of the fluid motion as well as the thermal interactions with and without coalescence between two or three growing and departing bubbles. The investigations are performed for different wall superheats. The experimental investigations of the bubble coalescence will analyze the mechanisms promoting bubble coalescence and the effect of coalescence on the wall heat transfer. The heat flux for boiling with coalescence fluctuated much more than for single bubble boiling due to the vaporization of the liquid layer trapped between the bubbles.

**Keywords:** micro heater array, bubble coalescence, bubble dynamics, heat transfer.

## 1. Introduction

Les technologies utilisées sur terre et dans l'espace continuent à évoluer vers la miniaturisation croissante. En conséquence, ces technologies exigent plus d'énergie par unité de surface et ont, ainsi, des problèmes thermiques considérables qu'il est difficile de résoudre avec les outils habituels. En conséquence, une attention très détaillée a été prêté ces dernières années au transfert thermique lors d'ébullition dans de petits dispositifs en ce sens que l'ébullition produit de très petites différences de température et des flux de chaleur élevés. De telles caractéristiques sont d'intérêt principal pour beaucoup de champs, tels que le refroidissement des composants électroniques et le refroidissement des gicleurs de fusée où le changement de phase fournit des taux significatifs de transfert thermique. Ainsi, la compréhension des mécanismes d'ébullition pour différentes conditions de fonctionnement est d'importance primaire dans la recherche des solutions thermiques fiables, économiques et efficaces à l'avenir. Par conséquent, une approche fondamentale et, en particulier, une étude plus localisée de la dynamique de bulle de vapeur est nécessaire.

Le transfert thermique par ébullition nucléée est employé dans beaucoup d'applications industrielles à cause de son rendement élevé. Les mécanismes physiques liés à ce mode de transfert thermique sont très complexes. Ainsi, le flux de chaleur est habituellement évalué par des corrélations théorico-empiriques. Des tentatives nombreuses ont été faites pendant plusieurs années pour prévoir la croissance d'une bulle unique isolée sans considération sérieuse de ses interactions avec les bulles voisines. Cependant, ces interactions sont bien connues pour être importantes. Il reste beaucoup de questions liées aux mécanismes fondamentaux du transfert thermique se produisant pendant l'ébullition nucléée.

La coalescence des bulles de vapeur est habituellement censée améliorer le transfert thermique en raison de l'évaporation d'une microcouche liquide supplémentaire qui se forme entre les bulles qui fusionnent. Cependant, la coalescence pendant l'ébullition sur une surface chauffée n'a pas fait l'objet de beaucoup d'attention dans les recherches.

De nombreuses études ont été faites pour étudier le comportement des bulles de vapeur sur différents types de surfaces pour observer les effets des conditions extérieures sur le transfert thermique. (Bonjour et al, 2000). [1] dans une étude expérimentale du phénomène de coalescence, ont fait des investigations pour diverses courbes d'ébullition avec et sans la coalescence pour trois positionnements de sites artificiels de nucléation sur un duralumin vertical (AU4G). Les résultats indiquent que la coalescence des bulles pour les trois positionnements a eu comme conséquence des coefficients de transfert thermique plus élevés que dans le cas de l'ébullition à site unique. (Chen et al, 2002) [2] ont expérimentalement étudié la coalescence des bulles sur des microéléments chauffants en ébullition nucléée en vase. La température de chaque élément étant contrôlée électroniquement pendant que les flux de chaleur de surface étaient mesurés lors de la coalescence des bulles. Ils ont constaté que la fréquence de départ des bulles augmentait et que le taux de transfert thermique à la surface était considérablement en augmentation pour la coalescence des bulles. (Christopher et Jiang, 2009) [3] ont illustré l'accroissement du transfert thermique dû au mouvement d'une bulle le long d'une surface par un modèle analytique de mouvement de bulles le long des fils chauffés. Leurs résultats ont vérifié que le mouvement de la bulle est conduit par la différence de température

entre le haut et le bas de la bulle, qui cause l'écoulement Marangoni. (Coulibaly et al, 2014). [4] ont étudié les effets de la coalescence des bulles sur le flux de chaleur pendant l'ébullition nucléée en vase. Une plaquette de micro éléments chauffants a été employée pour produire des bulles de vapeur dans le liquide FC-72 avec comme conditions aux limites, température de surface constante, tandis que le flux de chaleur en des positions choisies était mesuré pour diverses surchauffes en utilisant un système d'acquisition de données à grande vitesse. Un modèle mécaniste a été développé pour prévoir les conditions pour lesquelles les flux de chaleur n'augmentent pas pendant la coalescence. Un nombre adimensionnel,  $N_{coal}$  (nombre de coalescence), a été défini comme étant le rapport entre les rayons de la bulle lors de la croissance contrôlée par transfert thermique et la croissance contrôlée par l'inertie.

Les mesures de transfert thermique par (Demiray et Kim, 2004) [5] sous les bulles en formation avec de bas et hauts sous-refroidissements de liquides ont prouvé que le diamètre de la bulle unique et le transfert d'énergie est plus grand avec de bas sous-refroidissements. (Hermann, 2013) [6] a également étudié la croissance des bulles dans un champ électrique et a prouvé que la pesanteur et le champ électrique affectent de manière significative la coalescence et le diamètre de départ des bulles. (Myers et al, 2005). [7] ont effectué des mesures spatio-temporelles du flux surfacique de chaleur dans l'ébullition nucléée en vase en utilisant un des micro-éléments chauffant de 100  $\mu\text{m}$ . Leurs données ont également indiqué que la majeure partie de l'énergie exigée pour la croissance de bulle vient de la couche surchauffée autour de la bulle.

Sielaff et al, (2014) [8] ont étudié l'effet de la pression sur la coalescence des bulles et leur étude a révélé un fort effet de pression sur la fréquence de coalescence et qu'une petite gouttelette pourrait se former à l'intérieur de la bulle de fusion due à la micro couche liquide piégée entre les bulles fusionnantes. (Siedel et al, 2016) [9] ont étudié l'effet des forces électro hydrodynamiques sur la coalescence latérale de bulles pendant l'ébullition nucléée en vase et ont prouvé que les forces électro hydrodynamiques ralentissent de manière significative et empêchent même la coalescence pour leurs conditions.

Une recherche expérimentale menée par (Ozbey et al, 2017) [10] a étudié l'effet des nanoparticules dans le fluide sur le mouvement de la bulle le long d'un microfil chauffé. Tandis qu'il y a de nombreuses études de la dynamique et du transfert thermique pendant l'ébullition nucléée avec les bulles uniques, il y a peu d'études mesurant les effets de diverses conditions sur les flux de chaleur pendant la coalescence des bulles. Le présent article rapporte des observations montrant expérimentalement comment, le sous-refroidissement et la surchauffe des macroéléments affectent la dynamique des bulles et les taux de transfert thermique lorsque des bulles coalescent.

## 2. Matériel et méthodes

### 2.1 Dispositif expérimental

Le schéma de la figure.1 montre le dispositif expérimental. Le système inclus cinq parties principales qui sont indiquées comme suit :

Lecture pression

Réglage pression

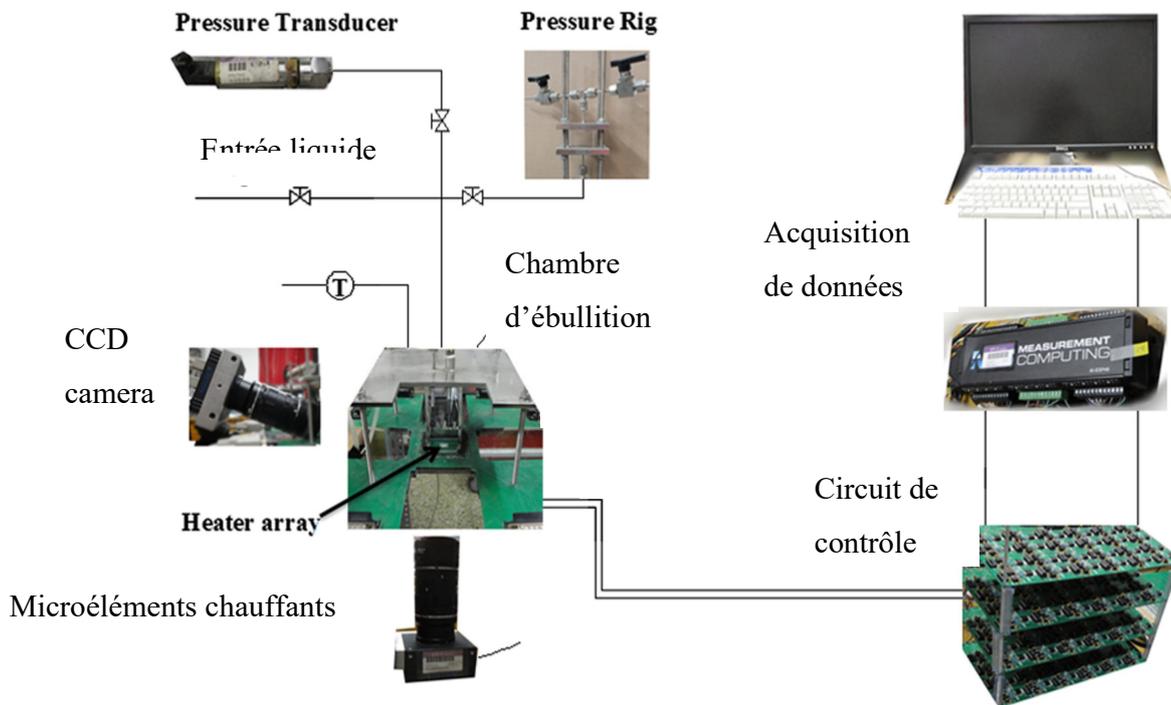


Figure 1 : Schéma de l'appareil d'ébullition

- Plaquette de macroéléments chauffants
- Système de capture d'images vidéo
- La chambre d'ébullition remplie du fluide FC-72
- Système d'acquisition de données
- Instrument de commande

## 2.2 La plaquette de micro éléments chauffants

Le fluide de travail a été chauffé sur une plaquette de micro éléments chauffants composée de 23 micro éléments semblables à ceux employés par Kim et son groupe de recherche [5]. Les micro éléments ont été construits en déposant et en gravant des couches de matériel conducteur et isolant sur un substrat pour former les chemins conducteurs sur la surface qui s'échauffent quand ils sont traversés par le courant électrique. Les éléments chauffants sont maintenus à une température constante par un système de commande électronique. La surface de chauffage pour chaque micro-élément est d'environ 100 mm x100 mm avec des résistances d'environ 1k $\Omega$ . Les températures sont maintenues constantes par des circuits de retro contrôle (ponts de Wheatstone). Un des circuits est illustré par la figure 2.

Les résistances des éléments chauffants ainsi que leur température sont contrôlées en changeant la valeur de la résistance variable du semi-conducteur du système de contrôle (Dallas DS1267). La résistance du potentiomètre est commandée par une interface série de trois-fils relié aux sorties numériques du système d'acquisition de données. Le signal numérique est alors utilisé

pour fixer la résistance du DS1267 qui donnera la résistance désirée de l'élément chauffant pour la température désirée.

Ceci est fait automatiquement pour chaque canal par un programme informatique interne qui commande le système électronique.

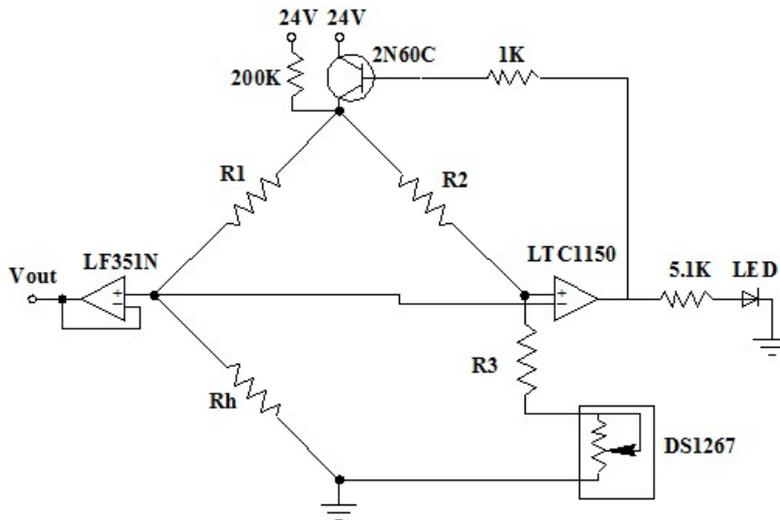


Figure 2 : Boucle électronique de retro contrôle

### 2.3 Le calibrage des micro-éléments chauffants

Les résistances des éléments chauffants ont été d'abord calibrées en fonction de la température en mesurant les résistances de chaque élément aux diverses températures maintenues constantes avec la plaquette de micro-éléments chauffants dans un récipient isolé thermiquement. Ces calibrages ont été alors employés pour choisir les résistances appropriées pour les circuits de commande. Pour chaque microélément, le circuit de commande a été calibré sur une gamme de températures pour obtenir une relation mathématique entre la résistance variable du potentiomètre (semi-conducteur Dallas modèle DS1267) et la température de l'élément chauffant.

Après le calibrage, les circuits de commande sont alors automatiquement contrôlés par le système d'acquisition de données, (le USB 1616HS) géré par ordinateur qui commande le potentiomètre DS1267. Une corrélation température-résistance pour chaque canal a été alors établie pour commander automatiquement les températures des micro-éléments chauffants pendant les expériences. Tous les micro-éléments chauffants ont été calibrés ainsi. La relation entre la température et la résistance d'un micro-élément chauffant est donnée par la formule :

$$R_h = R_{25}[1 + \alpha_t(T - 25)] \quad (1)$$

$R_{25}$  est la résistance du micro-élément à 25°C,  $R_h$  est la résistance du micro-élément à la température  $T$  et  $\alpha_t$  le coefficient de température du macroélément chauffant. Le flux de la chaleur dégagée au niveau de chaque micro-élément chauffant,  $q_h$ , a été obtenu à partir des tensions à travers chaque élément et sa résistance. Une partie de ce flux de chaleur  $q_c$ , est perdue par conduction à travers le substrat. Puisque l'élément chauffant est maintenu à une température

constante,  $q_c$  est constant pendant les mesures. Le flux de chaleur,  $q$  transféré de l'élément chauffant au liquide est alors :

$$q = q_h - q_c \quad (2)$$

## 2.4 La procédure expérimentale

La chambre d'ébullition a été remplie de fluide diélectrique fluorinert FC-72. Le liquide a été dégazé à l'aide d'une pompe à vide. La compression du dispositif au-dessus de la chambre d'ébullition (Bellows) permet d'augmenter la pression dans la section test pour obtenir le sous-refroidissement désiré du liquide. Les résistances des micro-éléments chauffants et, ainsi que, leurs températures ont été alors fixées à l'aide d'un ordinateur pour faire varier individuellement les résistances du potentiomètre DS1267 pour chaque canal. Les ponts de Wheatstone maintiennent alors automatiquement les éléments chauffants aux températures désirées. Un appareil de capture d'images (CCD camera : Charge Coupled Device camera) a été employé pour enregistrer des images du processus d'ébullition à 1000 images par seconde.

Les tensions à travers chaque micro-élément pendant les expériences ont été enregistrées dans l'ordinateur par le système d'acquisition de données à une vitesse de 5000 lectures par seconde par canal. Ces tensions ont été alors converties en flux de chaleur provenant des micro-éléments en utilisant la relation :

$$q_h = \frac{U_h^2}{R_h A} \quad (5)$$

Où  $A$  est l'aire nominale de l'élément chauffant,  $U_h$  est la tension à travers le microélément et  $R_h$  sa résistance à la température  $T$ .

Les images vidéo ont été visionnées préalablement pour rechercher la dynamique intéressante des bulles après quoi les images ont été sauvegardées. La dynamique observée des bulles est alors corrélée avec les mesures de flux de chaleur pour caractériser les variations de flux de chaleur pendant la nucléation, la croissance, la coalescence et le départ des bulles.

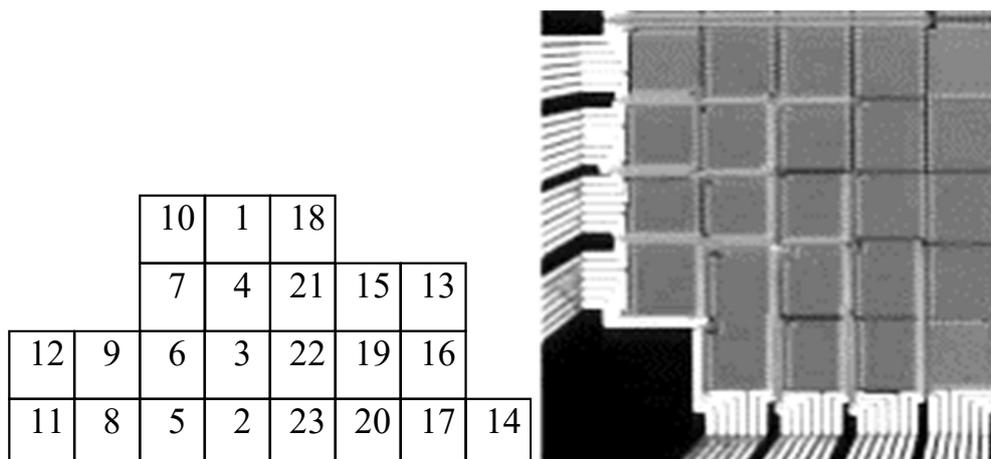


Figure 3 : (a) Arrangement des microéléments (b) photo de la plaquette de microéléments chauffants sur la plaquette.

En fait, les microéléments chauffants faisaient partir d'une plaquette de 96 éléments [5] ayant 4 tableaux de commande avec un contrôleur pour ce groupe de microéléments chauffants de la figure 3.

Les microéléments chauffants sont très petits de sorte que chaque bulle peut couvrir plusieurs éléments. Les expériences peuvent mesurer les taux de transfert thermique en différentes régions de la bulle.

La numérotation des micro-éléments est faite pour aider la numérotation des canaux du système de commande de température et de mesure de flux de chaleur. La forme de ce groupe de micro-éléments est due au fait que le groupe utilisé fait partir d'un plus grand ensemble de micro-éléments non chauffés qui n'ont pas été utilisés dans l'ensemble des expériences.

### 3. Résultats et discussion

#### 3.1 Effet de la coalescence des bulles sur le transfert thermique

Deux des vingt-trois microéléments chauffants (n°7 et n°15), dont les positions sont indiquées sur la figure 3, ont été portés à 95°C tandis que les autres étaient portés à 30°C. La température du liquide était de 27°C et la pression de 32 kPa. La température de saturation  $T_{\text{sat}}$  à 32 kPa est 26°C ; ainsi, le sous-refroidissement était de 1°C et la surchauffe pour les éléments 7 et 15 était 69°C. L'ébullition s'est produite quand les éléments 7 et 15 ont été portés à 95°C avec la dynamique de croissance des bulles.

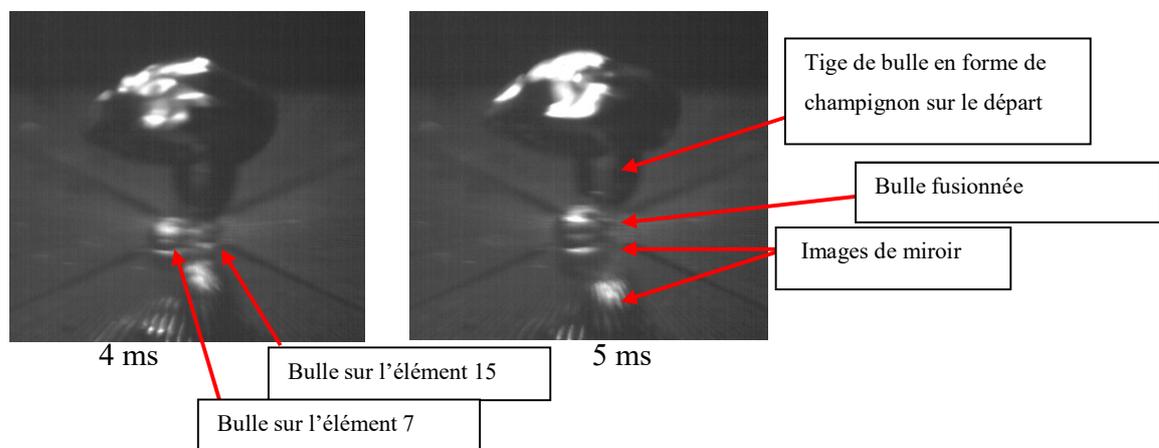


Figure 4 : Nucléation rapide et coalescence de deux bulles sur les éléments chauffants 7 et 15 à 95°C.

On voit par moment se former deux bulles très rapidement et fusionner en 1ms. Ceci est précédé par le départ d'une grande bulle. La bulle fusionnée ne s'est pas détachée juste après la coalescence, mais fait des mouvements de va-et-vient sur la surface de l'élément chauffant, donnant lieu à des remouillages répétés, la nucléation de nouvelles bulles et des coalescences additionnelles entre ces nouvelles bulles et celle issue de la première coalescence.

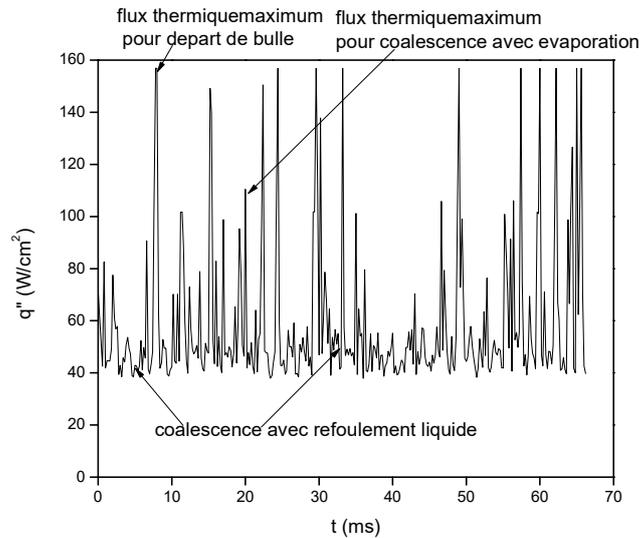


Figure.5. Variations des flux thermiques sur l'élément chauffant 15 durant les processus de nucléation, coalescence et départ.

Pendant le départ des bulles, le flux de chaleur est dû à la micro convection résultant du mouvement des bulles. Et le flux de chaleur pour surchauffer le liquide arrivant à la surface chaude après le départ de la plus grande bulle est dû à la conduction transitoire. Ces flux sont plus importants que le transfert de chaleur lors de la coalescence avec refoulement du liquide entre les bulles qui fusionnent qui s'est produite à environ 8 ms, et 32 ms (Figure 5).

La coalescence avec refoulement de liquide se produit quand les bulles se développent très rapidement jusqu' à la coalescence. C'est ce que nous avons également appelé la coalescence rapide. Dans ce cas-ci, la couche liquide est éliminée par la bulle à croissance rapide sans s'évaporer. Ainsi le flux de chaleur n'augmente pas. Si le processus de coalescence est plus lent, une couche liquide d'évaporation se forme sous la bulle, ce qui augmente sensiblement le flux de chaleur comme c'est le cas à environ 20 ms sur la figure 6. Le rapport de la croissance thermique à la croissance inertielle,  $N_{coal}$ , a été employé par Coulibaly et al. [4] pour caractériser les processus de croissances rapides et lents :

$$N_{coal} = \frac{2Ja\sqrt{3\pi\alpha_l}}{\pi t^{1/2} \left[ \frac{2(T_w - T_{sat})}{3T_{sat}} \frac{h_{lv}\rho_v}{\rho_l} \right]^{1/2}} \quad (6)$$

- $N_{coal}$  est le nombre de coalescence
- $Ja$ , nombre de Jacob
- $t$ , le temps entre la nucléation et la fusion des bulles
- $T_w$ , la température du micro-élément chauffant
- $T_{sat}$ , la température de saturation du fluide
- $h_{lv}$ , la chaleur latente de vaporisation du fluide
- $\rho_l$ , densité du fluide liquide
- $\rho_v$ , densité de la vapeur du fluide
- $\alpha_l$ , diffusivité thermique du fluide liquide

### 3.2 Effet de la surchauffe

Les flux de chaleur moyens expérimentalement mesurés pendant l'ébullition avec la coalescence croient avec la surchauffe comme le montrent les figures 6 et 7 pour des bulles se formant sur les éléments chauffant 7 et 15. Pour l'élément 7, le flux thermique croît lentement aux faibles surchauffes comme l'illustre la figure 6, alors que le flux thermique augmente beaucoup plus à de hautes surchauffes. Pour l'élément 15, le phénomène inverse est observé, comme le montre la figure 7, avec le flux de la chaleur augmentant plus rapidement à des surchauffes inférieures. Les flux de chaleur augmentent plus rapidement aux basses surchauffes. Sur le microélément 7 du au faite que pendant la coalescence, la majeure partie du flux de chaleur (dû à l'évaporation de la microcouche entre les bulles) est absorbé par la plus grande bulle qui se trouve alors sur ce micro-élément . La plus petite bulle se trouvant sur l'élément 15.

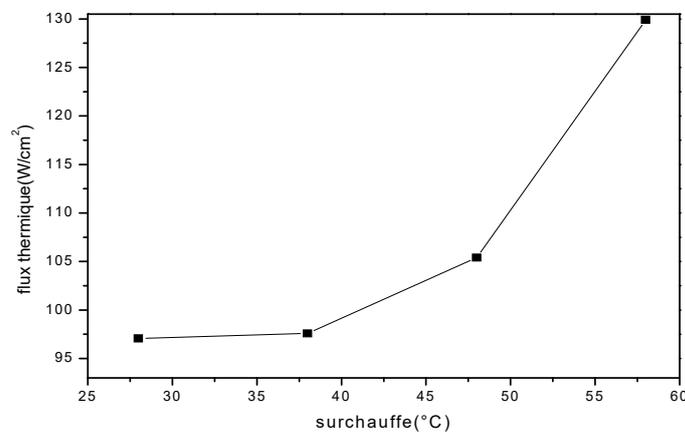


Figure 6 : La variation moyenne du flux de la chaleur en fonction la surchauffe pour l'élément n°7

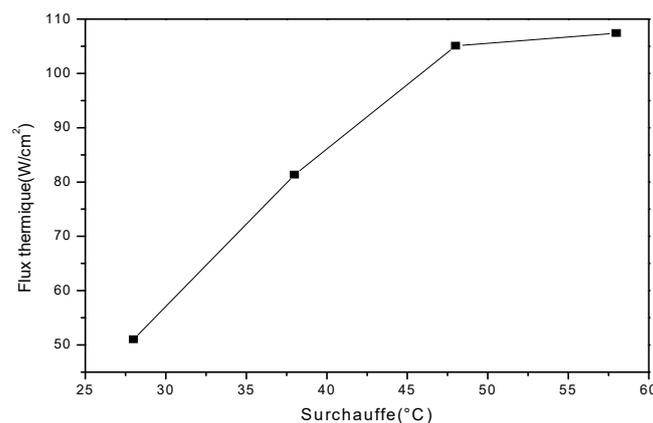


Figure.7 : La variation moyenne du flux de la chaleur en fonction la surchauffe pour l'élément n°15

## Nomenclature

$A$	Aire du microélément chauffant ( $m^2$ )
$D$	Diamètre de départ de la bulle (m)
$h$	Taille de la bulle (m)
$h_{lv}$	Chaleur latente de vaporisation ( $W/m^2K$ )
$Ja$	Nombre de Jacob
$N_{coal}$	Nombre de coalescence
$q_c$	Chaleur perdue conduction ( $W/m^2$ )
$q_h$	Chaleur fournie par l'élément chauffant ( $W/m^2$ )
$R_{25}$	Résistance à $25^\circ C$
$d$	Distance entre sites de nucléation (m)
$t$	Temps (s)
$t_{trans}$	Echelle de temps pour la transition de croissance par l'inertie à la croissance par transfert thermique (s)
$T$	Température ( $^\circ C$ )
	$\alpha_t$ Coefficient de température du macroélément chauffant
$U_h$	Tension électrique aux bornes d'un microélément chauffant (V)

## 4. Conclusion :

Le mouvement et les oscillations des bulles sur la surface des miro-éléments chauffants entraînent de fréquents remouillages de la surface et des coalescences entre les bulles voisines. La coalescence conduit éventuellement au départ de bulle, ce qui a comme conséquence des augmentations significatives des flux de chaleur.

Les flux thermiques moyens mesurés pendant l'ébullition avec coalescence croient avec la surchauffe, avec le flux de chaleur augmentant beaucoup plus à de hautes surchauffes. Le phénomène inverse est observé avec le flux de la chaleur augmentant plus rapidement à de petites surchauffes.

Les résultats expérimentaux indiquent que les pics de flux de chaleur pour la nucléation et le départ sont généralement plus grands que les pics de flux de chaleur pour la coalescence qui sont plus grandes que les pics de flux de la chaleur pour le remouillage après la coalescence pendant le mouvement de bulle fusionnée.

## Références

Bonjour, et al. 2000: Experimental study of the coalescence phenomenon during nucleate pool boiling, *Exp. Thermal Fluid Science*, 20, 180–187.

Chen T. et Chung J.N. 2002: Coalescence of bubbles in nucleate boiling on microheaters, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 45, 2329–2341.

Christopher D. M. et Jiang J. 2009: Bubble sweeping and interactions on wires during subcooled boiling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 52, 5020–5028.

Coulibaly, A et al. 2014: Effect of bubble coalescence on the wall heat transfer during subcooled pool boiling, *Int. J. Thermal Sciences*, 76, 101-109.

Demiray F et Kim J. 2004: Microscale heat transfer measurement during pool boiling of FC-72: effect of subcooling, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 47, 3257–3268.

Herman, C. 2013: Bubble formation and coalescence under the influence of electric fields, *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Vol 8c, San Diego.

Myers J.G et al. 2005: Time and space resolved wall temperature and heat flux measurements during nucleate boiling with constant heat flux boundary conditions, *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, 2429–2442.

Ozbey, A et al. 2017: Changing bubble dynamics in subcooled boiling with TiO<sub>2</sub> nanoparticles on a platinum wire, *J. Molecular Liquids*, 242, 456-470.

Sielaff, A et al. 2014: The influence of system pressure on bubble coalescence in nucleate boiling, *Heat Transfer Engineering*, 35 (5), 420-429.

Siedel, S. et al., 2016: Coalescence of bubbles in the presence of a DC electric field, *Int. Communications Heat Mass Transfer*, 76, 127-132.