

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Master

Pour l'obtention du diplôme de Master en Energétique

**Etude expérimentale des transferts de chaleur lors de la
croissance et le détachement d'une bulle de vapeur**

Réalisé par :

Ibrahim Aissi

Sous la direction de :

Mr. Bouzid Benkoussas, M.C (A) ENP

Mr. Lounès Tadrist, Pr, AMU

Présenté et soutenu publiquement le : 22/06/2016

Composition du jury :

Président	Mr. Salah LARBI	Professeur, ENP, Alger
Promoteur	Mr. Bouzid BENKOUSSAS	M.C (A), ENP, Alger
Examineur	Mr. Mohamed BOUBAKEUR	Maitre-Assistant, ENP, Alger

ENP 2016

ملخص

يهدف هذا العمل لدراسة تجريبية حول النقل الحراري اثناء نمو وانفصال فقاعة بخار على موقع اصطناعي معزول لسطح مستوي من عنصر مسخن. لهذا الغرض، تم استعمال جهاز تجريبي يسمح بدراسة هذه الظاهرة. مختلف النماذج لنمو الفقاعات البخارية وضحت في هذا العمل مع آلية النقل الحراري المرافق لها. تمت بعد ذلك مجموعة من التجارب حول الغليان على موقع معزول حيث قمنا بتمثيل منحنى الحرارة والتدفق الحراري خلال دورة نمو وانفصال فقاعة البخار. تم تحليل النتائج المتحصل عليها ومقارنتها مع النتائج الحصرية في هذا المجال.

كلمات مفتاحية: النقل الحراري، نمو الفقاعة، موقع معزول.

Abstract

This work is an experimental study of heat transfer during the growth and detachment of a vapor bubble on a single nucleation site. That's why an experimental device made to this study has been used. Different models of growth of bubbles are shown in this study with the associated heat transfer. Thereafter, a series of experiments on boiling heat transfer in a single site has been made where the temperature and heat flux profiles were presented over the cycle of growth and detachment of the vapor bubble. The obtained results were analyzed and compared with recent results on the nucleation at a single site.

Key words : Heat transfer, bubbles growth, single site.

Résumé

Ce travail consiste à étudier expérimentalement les transferts de chaleur durant la croissance et le détachement d'un embryon de vapeur sur un site artificiel isolé d'une paroi plane d'un élément chauffant. Pour cela, un dispositif expérimental bien adapté à l'étude de ce phénomène a été utilisé. Différents modèles de croissance des bulles sont illustrés dans le cadre de ce travail ainsi que le mécanisme des transferts thermiques associés. Par la suite une série d'expériences sur les transferts de chaleur en ébullition sur un site unique a été faite où on a présenté les profils de température et de flux de chaleur lors d'un cycle de croissance et de détachement d'une bulle de vapeur. Les résultats obtenus ont été analysés et comparés avec des résultats récents concernant la nucléation sur un site unique.

Mots clés : Transferts de chaleur, croissance de bulles, site isolé.

Dédicaces

A la mémoire de ma Grand-mère,
A mes parents qui ont tout sacrifié pour leurs enfants,
A ma sœur qui est la source de ma motivation,

A toute ma famille,
A tous mes camarades et mes amis,

A tous mes professeurs,
A tous ceux qui m'ont soutenu de bon cœur,

Je dédie ce travail.

Ibrahim

Remerciements

Avant tout, je remercie DIEU tout puissant pour m'avoir donné le courage et la force pour arriver à ce stade et réaliser ce modeste travail.

Au terme de ce stage, je voudrais exprimer mon immense gratitude envers tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont fait de sorte que ce projet soit possible. Je voudrais particulièrement remercier Monsieur Lounès TADRIST avec qui j'ai eu l'honneur de travailler sur ce projet. Je voudrais le remercier pour sa présence malgré tous ses engagements, ses remarques et conseils judicieux, pour le savoir qu'il m'a transmis et pour son soutien tout au long de cette période.

Je voudrais aussi témoigner de ma profonde reconnaissance pour Monsieur Bouzid BENKOUSSAS, sans qui cette opportunité et ce travail n'auraient pas été possibles. Je voudrais le remercier d'avoir cru en moi, de m'avoir encadré malgré la distance qui nous sépare, je le remercie aussi pour ses remarques et ses critiques qui m'ont permis d'avancer et d'apprendre.

Je tiens aussi à remercier Monsieur Philippe BOURNOT pour avoir veillé sur le bon déroulement de mon stage, et avoir assuré mon confort et mon intégration. Je le remercie pour toutes ses interventions qui ont facilité et accéléré mon installation.

Je remercie également Monsieur Hervé Combeau, qui a suivi mon travail durant toute cette période et qui m'a orienté et conseillé à chaque réunion.

Grands remerciements à ceux avec qui j'ai partagé tant de temps dans le laboratoire, et avec qui j'ai partagé l'intégralité de cette expérience, particulièrement mes amis Firas DHAOUADI, et Rafik LANKRI ainsi que Eutychus. Merci à Pierre LANTOINE et Ouamar RAHLI du laboratoire de l'IUSTI qui ont toujours été là pour me soutenir quand j'ai rencontré des difficultés.

Je remercie également les membres du jury : Mr Salah LARBI et Mr Mohamed Boubakeur qui ont accepté d'examiner mon travail.

Je termine mes remerciements pour les personnes qui me sont les plus chères, ma mère, ma soeur et mon père, de m'avoir aidé et soutenu durant toutes ces années d'études qui s'achèvent par ce projet.

Table des matières

Table des figures

Nomenclature

Introduction générale.....	8
Chapitre 1 : Croissance d'une bulle de vapeur et transferts de chaleur associés	9
1.1 Revue bibliographique.....	9
1.2 Croissance d'une bulle.....	10
1.2.1 Régime inertiel et thermique.....	10
1.2.2 Equations primaires	11
1.2.3 Régime inertiel.....	12
1.2.4 Régime thermique	13
1.2.5 Croissance de bulles sur une paroi chauffée	14
1.6 Mécanisme de transfert durant la croissance et le détachement d'une bulle.....	16
1.7 Phases de croissance d'une bulle de vapeur piégée dans une cavité	18
Chapitre 2 : Partie expérimentale et résultats	19
2.1 Dispositif expérimental.....	19
2.2 Procédure de réalisation du site artificiel	22
2.3 Protocole expérimental	22
2.5 Résultats et interprétations.....	24
2.5.1 Etude de transferts de chaleur en ébullition sur site isolé	24
2.5.2 Analyse des résultats.....	25
2.5.3 Interprétation.....	28
2.5.4 Comparaison	29
2.6 Conclusion	31
Conclusion générale et perspectives	32
Bibliographie.....	33
Annexe	34

Liste des figures

Figure 1.1- Croissance du rayon d'une bulle de vapeur en fonction du temps en régime inertiel.....	12
Figure 1.2- Croissance du rayon d'une bulle de vapeur en régime thermique.	14
Figure 1.3- Modèle de croissance d'une bulle de vapeur sur une paroi chauffée.....	15
Figure 1.4- Modèle de croissance d'une bulle par évaporation de la micrcouche.....	16
Figure 1.5- Mécanisme de transferts de chaleur durant la croissance et le détachement d'une bulle.	17
Figure 1.6- Phases de croissance d'une bulle à partir d'une cavité.	18
Figure 2.1- Photo de la cellule test.	19
Figure 2.2- Photo de l'ébulliomètre.	20
Figure 2.3- Schéma des composants de l'ébulliomètre.	20
Figure 2.4- Distribution de températures dans l'ébulliomètre sous COMSOL.	20
Figure 2.5- Schéma de la cellule test.....	21
Figure 2.6- Photo du dispositif expérimental.....	21
Figure 2.7- Visualisation du mono-site.	22
Figure 2.8- Courbe de saturation du FC-72.....	23
Figure 2.9- Etapes du déclenchement du mono-site.....	23
Figure 2.10- Photos de croissance et détachement de l'embryon de vapeur prises par Camera Rapide.....	25
Figure 2.11- Variation temporelle de la température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur lors de la croissance et le détachement de l'embryon de vapeur.....	26
Figure 2.12- Variation temporelle de la température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur (deuxième expérience).....	27
Figure 2.13- Comportement de la densité de flux de chaleur et la température durant un cycle.	28
Figure 2.14- Identification des phases de croissance avec les courbes températures et de flux de chaleur.	29
Figure 2.15- Variation temporelle de la densité de flux de chaleur et de température d'un embryon de vapeur formé à partir d'une orientation de 179° de la paroi chauffante.	30
Figure 2.16- Distribution des transferts de chaleur durant une bulle en croissance.....	31

Nomenclature

Lettres latines :

C_p	Chaleur calorifique	[J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]
g	Accélération de la pesanteur	[m.s ⁻²]
h_{fg}	Chaleur latente	[J.kg ⁻¹]
Ja	Nombre de Jacob	[-]
k	Conductivité thermique	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
\dot{m}	Débit massique	[kg/s]
P	Puissance	[W]
p	Pression	[Pa]
q''	Densité de flux de chaleur	[W/m ²]
q	Flux de chaleur	[W]
R	Rayon	[m]
T	Température	[K]
t	Temps	[s]
u	Vitesse	[m/s]
V	Vitesse	[m/s]

Lettres grecques

α	Diffusivité thermique	[m ² .s ⁻¹]
γ	Tension superficielle	[N/m]
δ	Epaisseur de couche limite	[m]
ρ	Masse volumique	[kg.m ⁻³]

Indices

a	Attente
c	cavité
i	interface
l	liquide
sat	Saturation
v	vapeur
w	paroi

Introduction générale

L'ébullition, comme tout mécanisme de changement de phase, est un processus souvent rencontré dans la vie quotidienne ainsi qu'à l'échelle industrielle. Pourtant, ce phénomène n'a intéressé l'homme que sporadiquement par le passé. Ce n'est qu'avec la révolution industrielle et la découverte de la machine à vapeur que se sont développées le plus les études à ce sujet. Aujourd'hui, on estime que deux tiers de l'électricité produite dans le monde utilise les générateurs de vapeur. L'ébullition est aussi une application prometteuse dans le refroidissement des composants électroniques par contact direct et encore une diversité de domaines. Ce mécanisme permet de transférer des flux de chaleur importants tout en évitant les températures trop élevées pour le fonctionnement optimal des processus. En revanche, on peut citer des exemples de cas critiques où des études sont faites pour éviter certaines situations dangereuses, comme l'assèchement du cœur d'une centrale nucléaire qui pourrait causer des accidents très graves.

Ces exemples permettent de comprendre l'importance de la compréhension et la maîtrise de la physique du changement de phase, un domaine scientifique situé au croisement de la thermodynamique, de la mécanique des fluides, de l'étude des matériaux et la chimie.

Cependant, le mécanisme d'ébullition est très complexe et fait intervenir plusieurs paramètres. Sa compréhension est basée sur plusieurs concepts fondamentaux comme la dynamique de croissance des bulles et les transferts thermiques durant cette croissance. Ce phénomène ne peut être compris qu'en s'intéressant à un seul site de nucléation.

Le but de ce travail est d'étudier expérimentalement la croissance d'une bulle sur un site unique, et de tracer les courbes des transferts de chaleur associés tout en visualisant cette croissance par camera rapide permettant l'identification de chaque régime de la courbe caractéristique avec la configuration géométrique de la bulle.

L'étude développée dans le cadre de ce travail est structurée en deux chapitres. Le premier chapitre traite des généralités sur l'ébullition en monobulle (bulle unique sur site isolé) ou des modèles de croissance des bulles ont été introduits et commentés, ainsi que la théorie des transferts thermiques en ébullition mono site.

Le second chapitre est consacré à la partie expérimentale, où le dispositif utilisé pour cette étude est présenté suivi par le protocole expérimental, et enfin une présentation des résultats obtenus, analysés et comparés avec les résultats de certains auteurs qui ont travaillé sur ce domaine.

Finalement, une conclusion générale résume les résultats essentiels obtenus dans ce travail préliminaire sur l'ébullition en mono site, accompagnée de quelques perspectives.

Chapitre 1 : Croissance d'une bulle de vapeur et transferts de chaleur associés

Dans ce chapitre, on commence par faire un état d'art sur les travaux récents réalisés sur l'ébullition dans un site isolé et on présentera les différents régimes qui définissent les modèles de croissance d'une bulle de vapeur dans un liquide surchauffé ainsi que sur une paroi. On détaillera plus le processus de croissance d'une bulle sur une paroi non lisse et le mécanisme de transferts de chaleur durant la croissance et le détachement d'une bulle.

1.1 Revue bibliographique

Depuis plusieurs années, l'étude des phénomènes de nucléation, croissance et détachement d'une bulle a fait l'objet de plusieurs recherches, particulièrement au sein du laboratoire de l'IUSTI (Marseille) où le présent travail a été fait.

Lee et al. [1] ont étudié expérimentalement l'ébullition nucléée sur des fluides purs et du mélange de R11 et R113 saturés à température de la paroi constante. Ils ont utilisé une caméra CCD à haute vitesse dans le but de filmer la croissance de la bulle. Les résultats obtenus pour les mélanges binaires ont également été comparés avec les fluides purs. Ils ont obtenu un temps de départ de la bulle pour les mélanges binaires plus long que pour des fluides purs. De même pour la température de déclenchement de l'ébullition nucléée du mélange qui était également plus élevée que celle des fluides purs.

Nam et al [2] se sont intéressés à la dynamique des bulles uniques de l'eau sur deux types de surfaces, super hydrophile (avec des nanostructures CuO sur une surface de silicone) avec une surface en silicone uniquement, dont les sites de nucléation sont bien connus. Ils ont montré que le diamètre de détachement des bulles sur la surface super hydrophile est presque 2.5 fois plus petit que celle de silicone, et que le temps de croissance de la bulle est quatre fois plus court sur la surface super hydrophile que sur celle de silicone. Ces résultats mettent en évidence l'importance de la mouillabilité sur la nucléation.

Manickam et Dhir [3] ont étudié expérimentalement le transfert de chaleur associé à une bulle de vapeur glissant le long d'une surface chauffante inclinée de 75° par rapport à la verticale dans le but de comprendre les mécanismes qui contribuent à l'augmentation du transfert de chaleur au cours du mouvement d'une bulle glissant le long de la paroi, ils ont mesuré le taux de croissance du volume des bulles, ainsi que le taux de transfert de chaleur à l'interface de la bulle.

Zamoum [4] a étudié expérimentalement les transferts thermiques en ébullition sur un site isolé, en mesurant à la fois la densité de flux de chaleur et la température de la paroi pour plusieurs orientations entre 0 et 180°.

1.2 Croissance d'une bulle

En dehors de l'état d'équilibre thermodynamique, la croissance d'une bulle de vapeur se décompose en deux phases successives dont la première est une phase isotherme caractérisée par un régime inertiel vu qu'elle est contrôlée par les forces d'inertie du liquide. La croissance dans cette phase est très rapide. La seconde phase est isobare et est limitée par la diffusion thermique dans le liquide, la croissance dans cette phase est relativement lente.

Pour une croissance sur une paroi, ces deux phases se distinguent par un changement de forme géométrique de la bulle par un passage d'une forme hémisphérique vers une forme sphérique.

1.2.1 Régime inertiel et thermique

Considérons une bulle de vapeur de rayon R à la pression p_v et à la température T_v en équilibre dans un fluide immobile à température T_0 à la pression p_0 .

Les conditions d'équilibre thermodynamique de la bulle de vapeur sont :

$$T_v = T_0 \text{ et } p_v - p_0 = \frac{2\gamma}{R}$$

La moindre perturbation entraîne une croissance ou un collapse de la bulle. La croissance d'une bulle correspond à deux régimes successifs : inertiel et thermique.

Le premier régime (inertiel) correspond aux premières phases de croissance de la bulle, il est caractérisé par une faible différence de température entre la température de la vapeur et la température du liquide. La pression de la vapeur est proche de la pression de saturation $p_{\text{sat}}(T_0)$.

Le transfert thermique au niveau de l'interface est très rapide mais il n'est pas facteur limitant de la croissance de la bulle. C'est la différence de pression qui contrôle l'évolution de la bulle, à l'équilibre cette différence reste constante pendant un certain temps, elle diminue par la suite quand le rayon augmente (loi de Laplace). Ainsi l'écart de pression entre les deux phases tend à disparaître.

Quant au régime thermique, il est observé lorsque la pression de la vapeur à l'intérieur de la bulle est proche de p_0 . La température de la vapeur diminue et devient proche de la température de saturation de la phase liquide $T_{\text{sat}}(p_0)$. Par équilibre thermodynamique, il apparaît donc une différence de température entre les deux phases $\Delta T = T_0 - T_{\text{sat}}(p_0)$, ainsi une couche limite thermique se forme autour de la bulle et son évolution est contrôlée par le bilan de l'énergie à l'interface. Le mouvement à l'interface est ralenti par rapport au régime inertiel.

1.2.2 Equations primaires

1.2.2.1 Le bilan massique

Pour la phase liquide le bilan massique est donné par l'équation :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{V}) = 0 \quad (1.1)$$

En coordonnées sphériques, par symétrie et pour un fluide incompressible ($\rho = cste$) cette équation se simplifie à :

$$\frac{\partial}{\partial r}(r^2 u_r) = 0 \quad (1.2)$$

Ce qui donne :

$$u = u_r = \frac{F(t)}{r^2} \quad (1.3)$$

A l'interface, comme il n'y a pas un transfert de masse : [5]

$$\dot{m}_l + \dot{m}_v = 0 \quad (1.4)$$

Etant donné que $\rho_v \ll \rho_l$ il est possible de négliger le débit de vapeur à l'interface par rapport à celui du liquide et donc $\dot{m}_{li} = 0$ ou encore :

$$\rho_{li}(u_{li} - \dot{R}_b) = 0 \quad (1.5)$$

$$u_{li} = \dot{R} \quad (1.6)$$

En posant cette condition au limite on retrouve que :

$$u_l = \frac{dR}{dt} \frac{R^2}{r^2} \quad (1.7)$$

1.2.2.2 L'équation de quantité de mouvement

Pour le liquide, supposé incompressible, l'équation de quantité de mouvement s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (1.8)$$

En intégrant l'équation de la quantité de mouvement entre R et $r = \infty$ et en utilisant l'expression de la vitesse radiale on aboutit à :

$$R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{(p_{li} - p_0)}{\rho_l} = \frac{1}{\rho_l} \left(p_v - p_0 - \frac{2\gamma}{R} \right) \quad (1.9)$$

Cette équation est appelée Equation de Rayleigh.

1.2.3 Régime inertiel

Quand la différence de pression entre la phase vapeur et liquide reste constante, les effets capillaires sont négligeable devant cette différence de pression

Une résolution numérique sous Matlab de l'équation de Rayleigh (1.9) permet de tracer le graphe de variation du rayon au cours du temps pour une différence de pression et un rayon initial donnés.

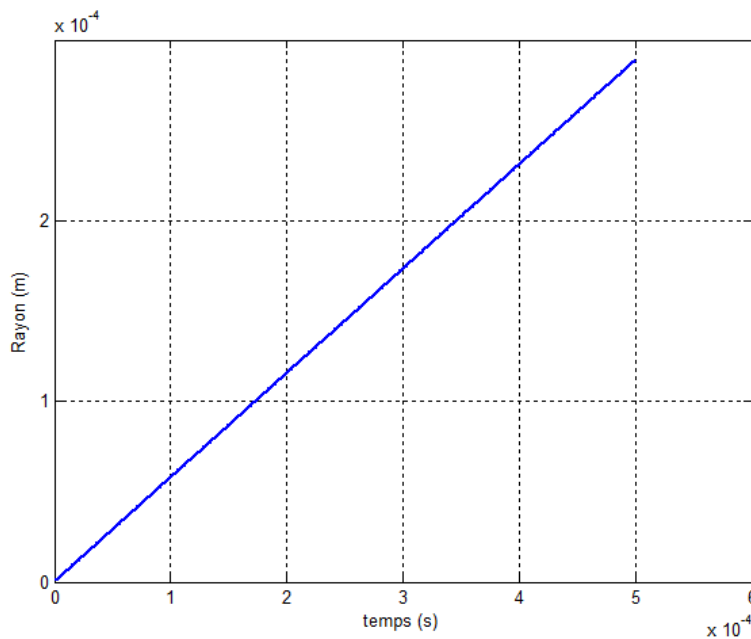


Figure 1.1- Croissance du rayon d'une bulle de vapeur en fonction du temps en régime inertiel.

On voit bien que l'augmentation du rayon est linéaire au cours du temps, ce qui correspond à la solution proposée dans la bibliographie qui a la forme :

$$R = \sqrt{\frac{2(p_v - p_0)}{3\rho_l} \cdot t} \quad (1.10)$$

1.2.4 Régime thermique

La croissance de la bulle ne peut pas être déterminée simplement par la résolution de l'équation précédente étant donné qu'il est nécessaire de calculer d'abord l'évolution instantanée de la couche limite thermique qui se forme à cause de la différence de température à l'interface. Il est par contre possible de déterminer la croissance asymptotiquement à l'aide d'un modèle physique simple, le développement le plus fréquemment utilisé en bibliographie est celui de celui de Plesset et Zwick [6] qui ont considéré une couche limite mince en utilisant un nombre de Jacob important, leurs résultats ont été généralisés par Scriven quelque soit le nombre de Jacob.

1.2.4.1 Analyse de Plesset et Zwick [6]

Plesset et Zwick ont démarré le raisonnement à partir de l'égalité entre le flux de chaleur produit et le flux de chaleur transmis par conduction à travers la couche limite :

$$\rho_v \frac{dR}{dt} h_{lg} = k_l \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R} \approx k_l \frac{T_0 - T_v}{\delta_T} \approx k_l \frac{T_0 - T_v}{\sqrt{\alpha t}} \quad (1.10)$$

On rappelle que l'épaisseur de la couche limite thermique est proportionnelle à la racine de la diffusivité thermique multiplié par le temps.

Et donc :

$$\frac{dR}{dt} = cste \frac{k_l}{\rho_v h_{lg}} \quad (1.11)$$

Plesset et Zwick [6] ont donné la valeur exacte de la constante évaluée à $\sqrt{\frac{3}{\pi}}$.

Cette loi d'évolution diffusive peut être exprimée en fonction d'un nombre appelé nombre de Jacob défini par :

$$J_a = \frac{\rho_l C_{pl}(T_0 - T_v)}{\rho_v h_{lg}} \quad (1.12)$$

Ce nombre exprime le rapport entre l'énergie qui peut être fournie par unité de volume du liquide sur l'énergie nécessaire pour obtenir une unité de volume de vapeur.

On aboutit ainsi à :

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{\frac{3}{\pi}} J_a \sqrt{\frac{\alpha}{t}} \quad (1.13)$$

Finalelement :

$$R(t) = \sqrt{\frac{12}{\pi} J_a \sqrt{\alpha_l t}} \quad (1.14)$$

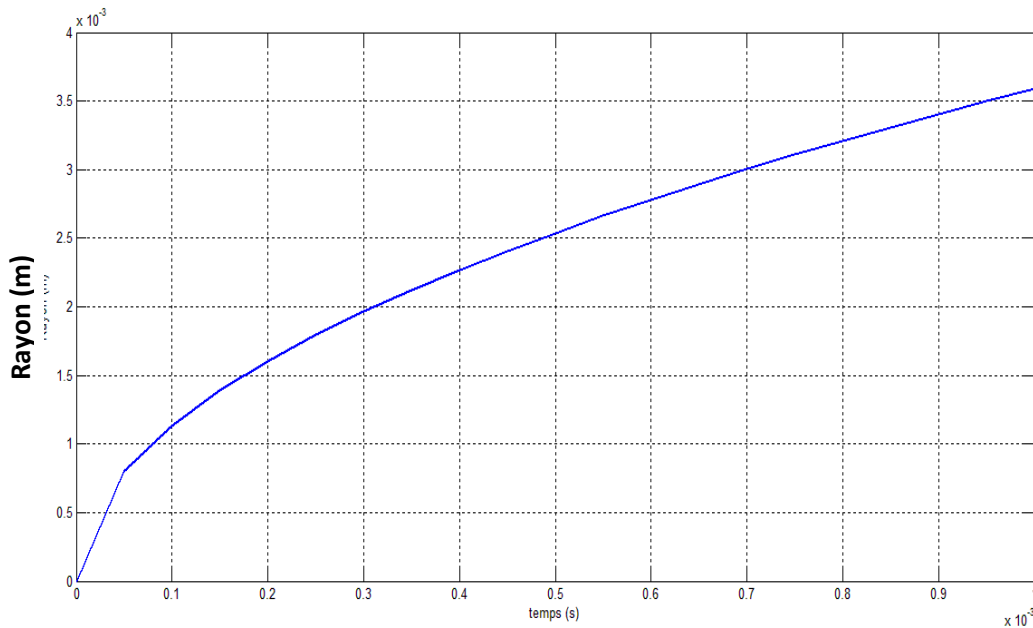


Figure 1.2- Croissance du rayon d'une bulle de vapeur en régime thermique.

1.2.5 Croissance de bulles sur une paroi chauffée

La croissance d'une bulle sur une paroi chauffée est un mécanisme très compliqué comparé à la croissance au sein d'un liquide, ceci est dû au non sphéricité de la bulle et du gradient de températures

De même que la croissance au sein du liquide, les deux régimes inertiel et thermique sont observés,

Comme on le voit sur la figure 1.3, juste après le détachement de la bulle, le liquide à une température T_0 entre en contact avec la paroi chauffée à une température $T_w > T_{sat}(p_0)$

La couche limite thermique se rétablit pendant un intervalle de temps très court appelé temps d'attente t_a durant lequel aucune bulle ne croit.

Par la suite, la croissance de la bulle démarre, le liquide adjacent surchauffé assure l'énergie nécessaire pour vaporiser le liquide à l'interface pendant le temps d'attente.

Durant cette phase, la bulle a une forme hémisphérique et la croissance est contrôlée par l'inertie du liquide.

Au cours de la croissance, le mécanisme de transfert de chaleur devient le mécanisme limitant de la croissance, l'inertie du fluide a faible influence et la forme de la bulle devient sphérique.

D'après Cooper et Lloyd [7] la bulle a une forme hémisphérique tant que l'inertie du liquide est supérieure à la force de tension superficielle :

$$\rho_l \left(R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right) \geq \frac{2\gamma}{R} \quad (1.15)$$

Plusieurs modèles de croissance de bulles sur une paroi chauffée ont été établis, certains considèrent que l'évaporation se produit sur toute la surface de la bulle alors que d'autres modèles considèrent l'évaporation de la microcouche du liquide située au pied de la bulle qui contribue à la croissance de la bulle.

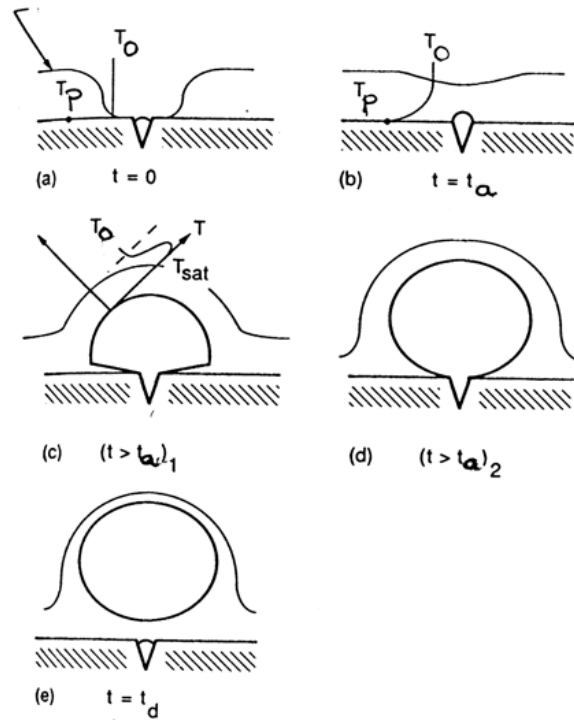


Figure 1.3- Modèle de croissance d'une bulle de vapeur sur une paroi chauffée. [8]

1.2.5.1 Croissance par évaporation sur toute la surface de la bulle

Ce modèle a été élaboré par Mikic et Roshenow [9] qui ont traité la croissance diffusive comme processus de conduction instationnaire monodimensionnelle ils ont obtenu une expression d'évolution du rayon comme :

$$R(t) = \frac{2J_a\sqrt{3\pi\alpha_l t}}{\pi} \left\{ 1 - \frac{T_w - T_0}{T_w - T_{sat}} \left[\left(1 + \frac{t_a}{t} \right)^{\frac{1}{2}} - \left(\frac{t_a}{t} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \right\} \quad (1.16)$$

Avec

$$J_a = \frac{\rho_l c_{pl}(T_0 - T_v)}{\rho_v h_{lg}} \quad (1.17)$$

L'expression du temps d'attente établie par les auteurs est :

$$t_a = \frac{1}{4\alpha_l} \left(\frac{r_c}{\operatorname{erfc}^{-1} \left[\frac{T_{sat} - T_0}{T_w - T_0} + \frac{2\gamma T_{sat}}{(T_w - T_0)r_c \rho_v h_{lg}} \right]} \right)^2 \quad (1.18)$$

Où erfc est la fonction erreur conjuguée et r_c est le rayon de la cavité.

1.2.5.2 Méthode d'évaporation de la microcouche

Quand la bulle a une forme hémisphérique au début, la vitesse à l'interface est très grande, une microcouche de liquide de quelques microns se forme sous la bulle, des modèles d'évaporation de la microcouche ont été proposés par Cooper et Lloyd [7] et Van Stralen et al. [10].

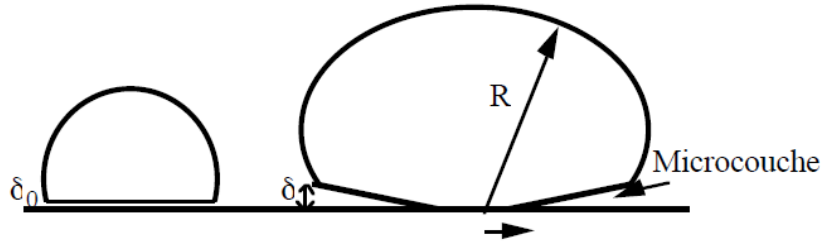


Figure 1.4- Modèle de croissance d'une bulle par évaporation de la microcouche [10]

La loi d'évolution du rayon de la bulle qui a été proposé pour ce modèle est :

$$R(t) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{k_w \rho_p C_{pp}}{k_l \rho_l C_{pl}}} J_a \sqrt{\alpha_l t} \quad \text{pour } k_w \gg k_l \quad (1.19)$$

1.6 Mécanisme de transfert durant la croissance et le détachement d'une bulle

La complexité du phénomène de nucléation sur une paroi rend très difficile l'étude avec précision des mécanismes qui sont mis en jeu lors de ce processus, à savoir les transferts de chaleur et de masse, la dynamique de croissance et de détachement ainsi que la variation de l'angle de contact. Tous ces paramètres sont liés entre eux, une variation de l'un entraîne une modification du mécanisme de nucléation.

Dans cette partie, on ne s'intéresse qu'à la manière dont la croissance d'une bulle affecte le transfert de chaleur sur une paroi chauffante.

Le changement de phase à l'interface liquide-vapeur fait croître la bulle, cette croissance rapide de la bulle hémisphérique sur la paroi est initialement contrôlée par l'inertie du fluide.

Une couche mince du liquide a tendance à être piégée entre la paroi chauffante et le liquide au voisinage, qui sera par la suite évaporée (micro couche) comme on l'a vu dans la partie précédente. La bulle peut aussi croître à travers la vaporisation du liquide surchauffé entourant l'interface. Un autre mécanisme de croissance est illustré au niveau de la ligne triple de contact des trois phases.

Ces modèles de croissances jouent un rôle important dans la perturbation du liquide situé au voisinage, et causent donc une déformation de la couche limite de convection naturelle créant une micro convection.

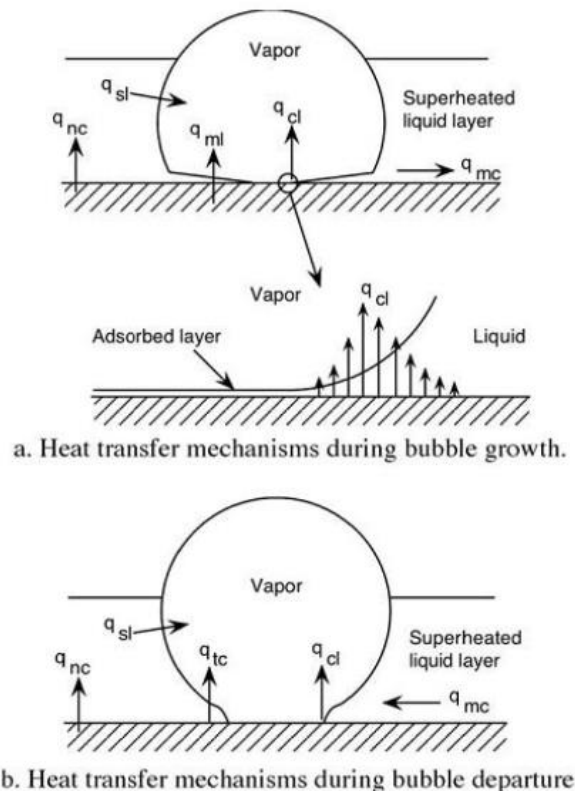


Figure 1.5- Mécanisme de transferts de chaleur durant la croissance et le détachement d'une bulle [9].

Durant le détachement de la bulle, si la microcouche n'est pas complètement sèche, le transfert de chaleur à travers la microcouche (q_{ml}) peut continuer.

De même pour le transfert de chaleur à travers le liquide surchauffé qui entoure la bulle (q_{sl}) peut aussi continuer si le fluide n'est pas sous refroidi.

Si une zone de vapeur se forme sur la surface à cause de l'assèchement partiel de la microcouche durant la croissance de la bulle, la paroi se remouille juste après le départ de la bulle. Durant cette phase, le transfert de chaleur à la ligne triple (contact de trois phases) (q_{cl}) est faible comparé à celui pendant la phase de croissance de la bulle.

Quand la zone sèche se remouille, le transfert thermique par conduction en régime transitoire (q_{tc}) dans le liquide a lieu. De plus, le détachement de la bulle cause une perturbation du liquide au voisinage et engendre ainsi un transfert de chaleur par micro convection (q_{mc}).

1.7 Phases de croissance d'une bulle de vapeur piégée dans une cavité

Un embryon de vapeur peut exister même à des températures inférieures à la température de saturation du moment qu'il est piégé dans une cavité ou une imperfection de la paroi chauffante. Il est important de comprendre les phases de croissance de cet embryon, car c'est le phénomène qui sera visualisé dans la partie expérimentale.

Quand la température de la paroi dépasse la température de saturation, la bulle croît et passe de la position 1 vers la position 2 de la figure 1.6.

En continuant à croître, la bulle passe vers la position 3 et son rayon de courbure diminue par rapport à sa position précédente.

On rappelle que la surchauffe nécessaire à la bulle en état d'équilibre est inversement proportionnelle à son rayon par la relation

$$T_w - T_{sat} = \frac{2\gamma T_{sat}}{r h_{fg} \rho_{vap}} \quad (1.20)$$

Cela signifie que la position 3 nécessite une surchauffe plus importante que la position 2. De même pour le passage de la position 3 à la position 4.

Dans la position 4, le rayon de la bulle est égal au rayon de la cavité, dans cette configuration, sa croissance implique systématiquement une augmentation du rayon de courbure pour passer de l'état 4 à l'état 5, la surchauffe nécessaire à son équilibre est ainsi plus petite. A cette étape, comme la température du système est assez élevée dépassant la température nécessaire à l'équilibre de la bulle, cette dernière commence à se développer spontanément et se détache de la paroi.

Cependant, il faut noter que le passage de la position 3 à la position 4 fait diminuer l'angle de contact également qui a un effet contraire sur le rayon. Cette contribution des deux effets fait intervenir la notion du rayon critique qui est légèrement différent de celle de la cavité.

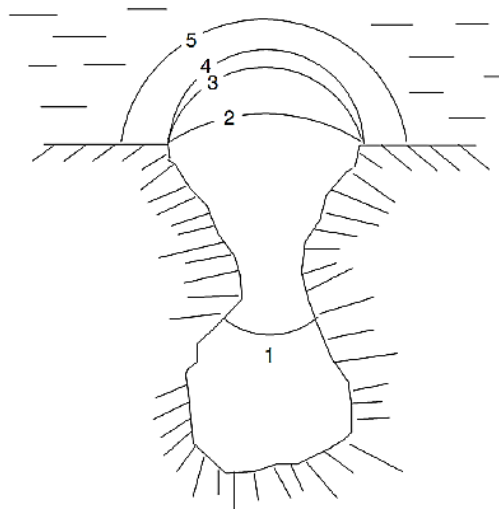


Figure 1.6- Phases de croissance d'une bulle à partir d'une cavité.

Chapitre 2 : Partie expérimentale et résultats

Dans ce chapitre, le dispositif expérimental ainsi que le protocole de manipulation permettant l'étude de l'ébullition en mono site sont décrits. Suivis par les résultats obtenus et le tracé des courbes d'évolution de la température et de flux de chaleur durant la phase de croissance et de détachement d'un embryon de vapeur. Ces résultats sont analysés et comparés avec les travaux faits dans ce domaine.

2.1 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé pour la présente étude est le même utilisé que dans l'étude de l'ébullition en multi-sites où il a fait l'objet d'une description détaillée. On rappelle dans cette partie les principaux éléments nécessaires à la compréhension du protocole expérimental.

Les deux éléments principaux du dispositif expérimental sont la cellule test et l'élément chauffant appelé « ébulliomètre ». La cellule est de forme cubique avec un volume intérieur de 750 ml qui est rempli en grande partie par le Fluorinert FC-72 liquide. Ce fluide a des propriétés de saturation très faciles à atteindre expérimentalement, de plus il a une chaleur latente 25 fois inférieure à celle de l'eau, ce qui le rend le fluide idéal à l'étude du phénomène d'ébullition.

La partie inférieure de l'enceinte est équipée d'une résistance chauffante qui sert à augmenter la température du fluide jusqu'à la température de saturation à laquelle l'ébullition est étudiée. Des échangeurs de refroidissement serpentine en bas et en haut de la cellule ainsi qu'un système de régulation de température de la cartouche chauffante permettent de maintenir la température de la cellule (en phase liquide et vapeur) à la température de saturation désirée.

La cellule est surmontée par un condenseur à reflux, cet échangeur permet de condenser la vapeur produite durant l'opération de dégazage et les expériences d'ébullition. Une vanne est liée à l'extrémité supérieure du condenseur dans le but d'évacuer les gaz incondensables et garder l'état d'équilibre à l'intérieur de la cellule.

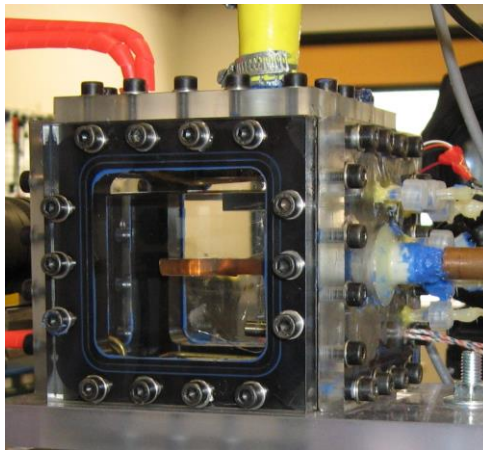


Figure 2.1- Photo de la cellule test.

L'élément chauffant « ébulliomètre » est de forme cylindrique, il est composé de plusieurs couches à savoir un film résistif mis en sandwich entre deux pastilles en cuivre, trois fluxmètres servant à mesurer les densités de flux évacuées la partie supérieure et inférieure de l'ébulliomètre ainsi que la partie latérale. Un isolant en téflon a été placé sur la partie inférieure de l'ébulliomètre pour étudier l'ébullition que sur une seule surface. De même, pour diminuer les pertes de chaleur latérales, l'ébulliomètre est isolé latéralement par ajout de résine.

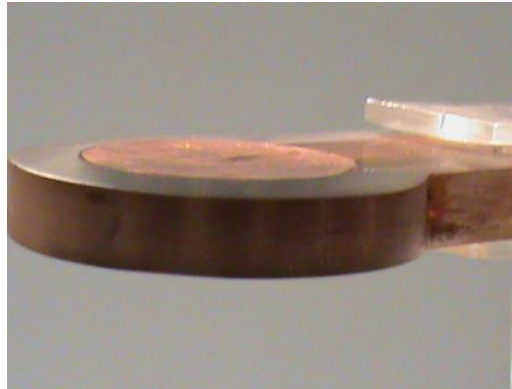


Figure 2.2- Photo de l'ébulliomètre [4].



Figure 2.3- Schéma des composants de l'ébulliomètre.

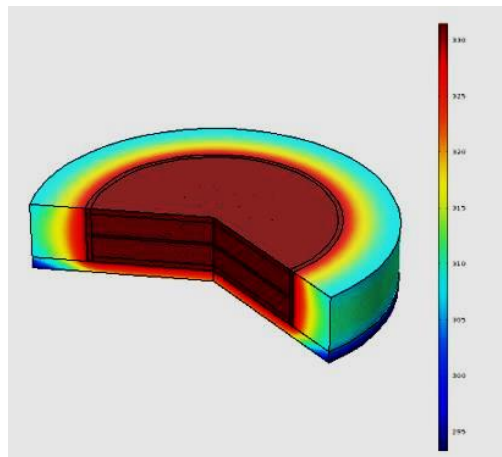


Figure 2.4- Distribution de températures dans l'ébulliomètre sous COMSOL.

Le dispositif expérimental est riche en moyens de mesures permettant une étude expérimentale bien maîtrisée, trois thermocouples type k sont utilisés pour le contrôle de température à l'intérieur de la cellule, un en phase liquide, le deuxième en phase vapeur et le troisième sert à mesurer la température au niveau de la cartouche chauffante. Un thermocouple de type T est placé au centre de la face supérieure de l'ébulliomètre et un fluxmètre à gradient tangentiel mesure la densité de flux de chaleur évacuée à travers la surface supérieure de

l'élément chauffant. Deux capteurs de pressions piezorésistifs de type SCX 15 DN permettent la mesure de la pression relative de la phase liquide et vapeur à l'intérieur de la cellule.

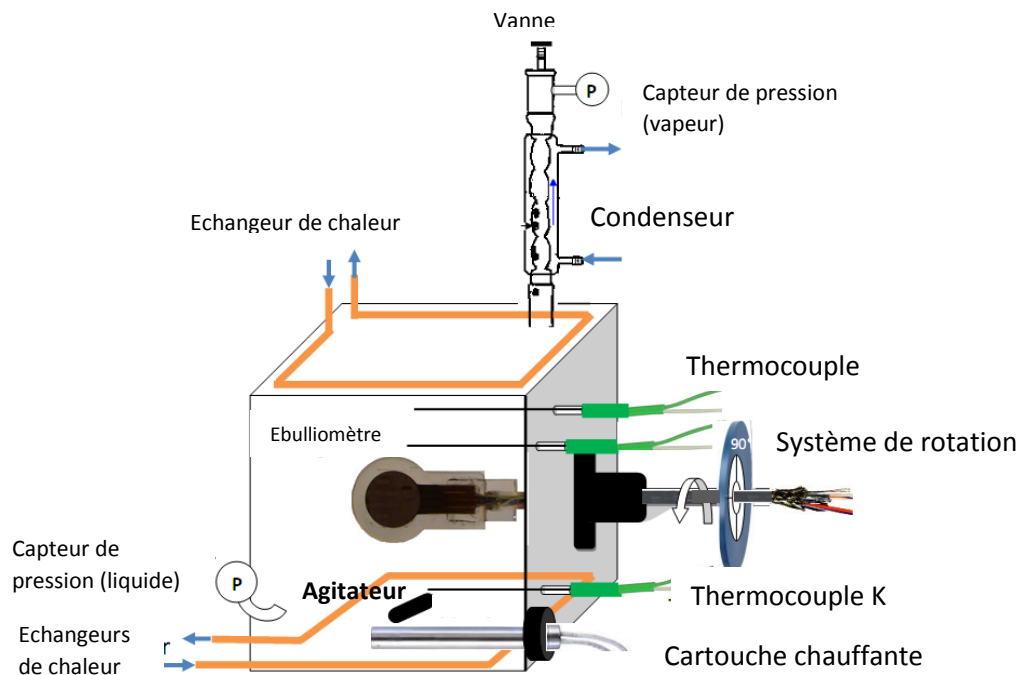


Figure 2.5- Schéma de la cellule test.



Figure 2.6- Photo du dispositif expérimental

2.2 Procédure de réalisation du site artificiel

La surface supérieure de l'ébulliomètre a été choisie pour la réalisation d'un site de nucléation artificiel sur laquelle l'ébullition sera favorisée et permettra l'étude des transferts thermiques en nucléation sur un site isolé. Une fois le centre de l'ébulliomètre bien repéré, l'ébulliomètre a été percé à l'aide d'une aiguille de 200 μ m de diamètre. Etant donné que le perçage a été fait au centre de la face de l'ébulliomètre, le thermocouple de l'ébulliomètre indiquera exactement la température du site de nucléation réalisé.



Figure 2.7- Visualisation du mono-site.

2.3 Protocole expérimental

La première étape dans le protocole expérimental consiste à l'élimination des gaz dissouts contenus dans le liquide après le remplissage de la cellule par le fluide FC-72. Cette étape consiste au chauffage progressif du liquide en utilisant la cartouche chauffante dont l'intensité de chauffage est bien maîtrisée, tout en brassant le liquide à l'aide d'un agitateur magnétique. Après quelques instants, le chauffage de la cellule augmente à la fois la température et la pression du fluide tant qu'elle étanche. Une fois proche des conditions de saturation, il y'a formation de vapeur et dégazage de liquide. Ainsi, le mélange air-vapeur se retrouve en haut de la cellule, où une fraction de la vapeur est condensée en alimentant le condenseur par eau de refroidissement. L'autre partie incondensable est évacuée par la vanne située sur le condenseur.

Cette opération est répétée jusqu'à l'obtention des conditions thermodynamiques correspondant à l'état de saturation du fluide pur. Quand le chauffage est arrêté, la température et la pression à l'intérieur de la cellule diminuent tout en restant sur la ligne de saturation tant que la cellule est bien étanche en présence de nucléation de bulles sur le site artificiel.

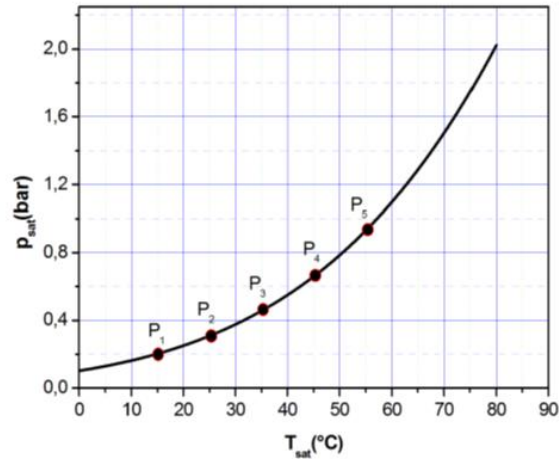


Figure 2.8- Courbe de saturation du FC-72

Après avoir vérifié les conditions de saturation, on oriente l'ébulliomètre à un angle d'inclinaison de 180° et on provoque le chauffage de la paroi par l'alimentation du film résistif de l'ébulliomètre dans le but d'étudier les transferts de chaleur sur le site isolé.

Pour déclencher l'ébullition sur ce site isolé au centre de la paroi, on commence par imposer une puissance relativement importante pour déclencher l'ébullition nucléée en régime développé sur toute la paroi y compris l'activation du site artificiel. Par la suite, on réduit progressivement le flux de chaleur imposé. Ainsi, tous les sites de nucléation se désactivent au fur et à mesure jusqu'à l'obtention d'un seul site de nucléation, qui est le site artificiel. On lance les mesures de températures et de densités de flux de chaleur, ces mesures sont enregistrées par l'acquisition DATA avec un intervalle de temps de 1s. Ces données sont récupérées et traitées dans la zone où la dynamique de croissance et les transferts thermiques associés sont bien visualisés

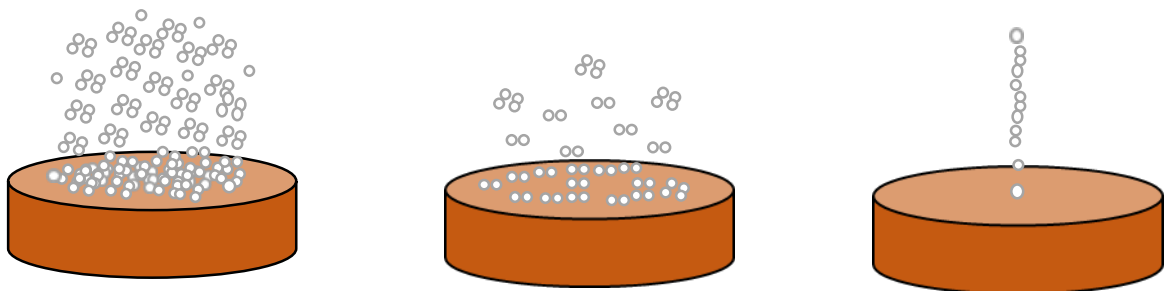


Figure 2.9- Etapes du déclenchement du mono-site.

2.5 Résultats et interprétations

2.5.1 Etude de transferts de chaleur en ébullition sur site isolé

Dans cette partie, on présente les résultats expérimentaux obtenus à partir du protocole décrit précédemment. L'ébulliomètre a été orienté pour un angle de 180° dans le but de piéger la bulle de vapeur qui met plus de temps à croître sur la paroi chauffante et emmagasine ainsi une quantité de chaleur plus importante.

Cependant, le problème rencontré dans cette partie était le maintien de la température de saturation. Comme on a travaillé à des températures de saturation importantes pour éviter les problèmes d'étanchéité à basse pression, les pertes de chaleur sont non négligeables. De plus, il est important d'arrêter le chauffage par la cartouche, car celle-ci engendre des bulles sur sa surface quand elle chauffe. Ces bulles sont dispersées dans la cellule et peuvent se mettre sur la paroi chauffante quand celle-ci est à 180° ce qui empêcherait l'étude de nucléation sur le site artificiel.

Pour répondre à ça, on a imposé une température de saturation importante (56°C) et on a arrêté le chauffage tout en procédant à l'activation du site artificiel comme ça a été précisé dans le protocole expérimental. Bien que la température de la cellule baisse, le fluide reste à l'état de saturation (car la pression baisse aussi avec la température). Le site artificiel a bien été déclenché et le mécanisme de croissance a été visualisé. Les données de température de la paroi ainsi que celle de la cellule et la densité de flux de chaleur sont récupérées après un réglage de l'acquisition à un temps de mesure de 1s.

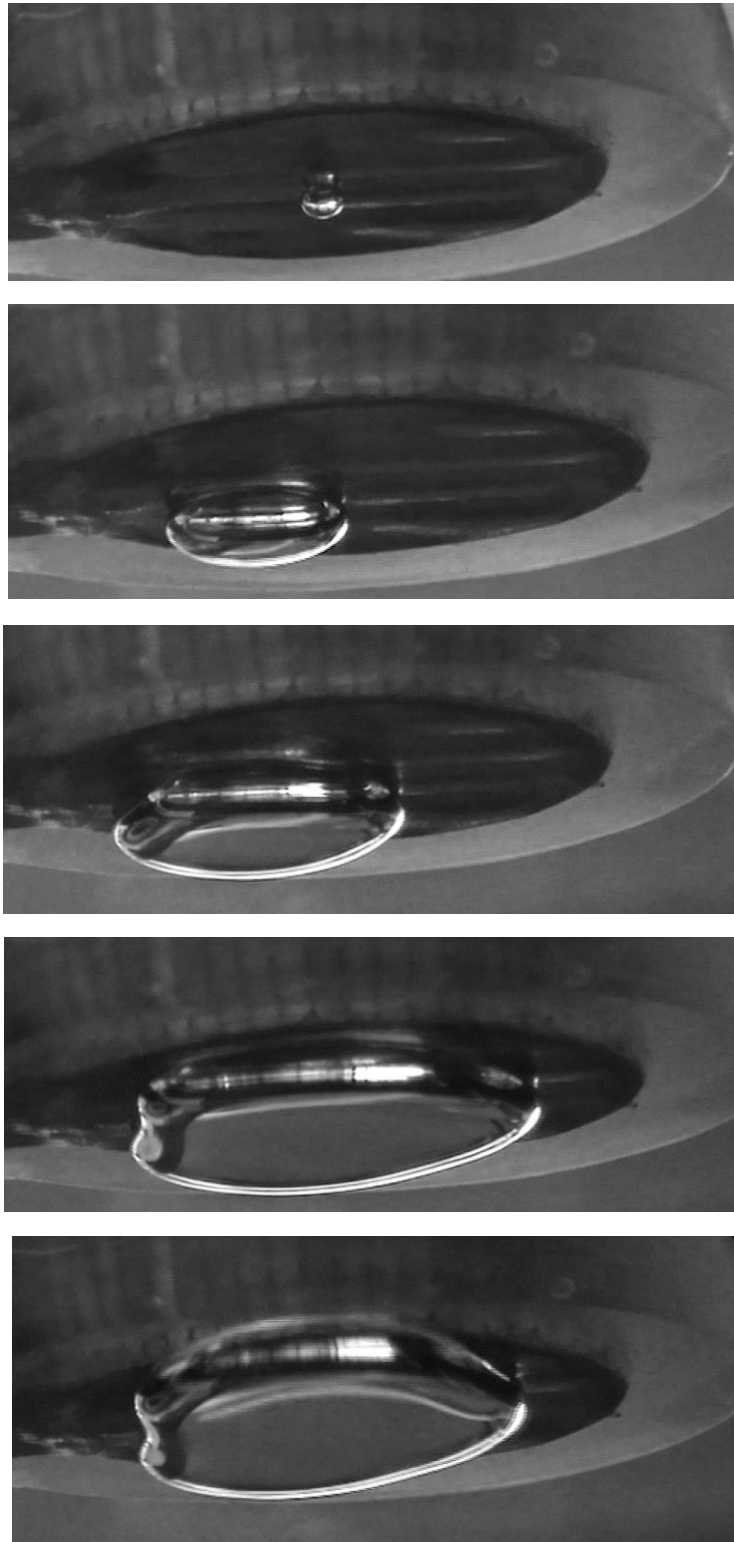


Figure 2.10- Photos de croissance et détachement de l'embryon de vapeur prises par Camera Rapide.

2.5.2 Analyse des résultats

2.5.2.1 Première expérience

Dans la première expérience, une fois seul le site artificiel activé, on a enregistré la température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur pour une durée d'expérience

de 100 s et une puissance imposée de 0.225W. Les résultats obtenus sont montrés dans la figure 2.11.

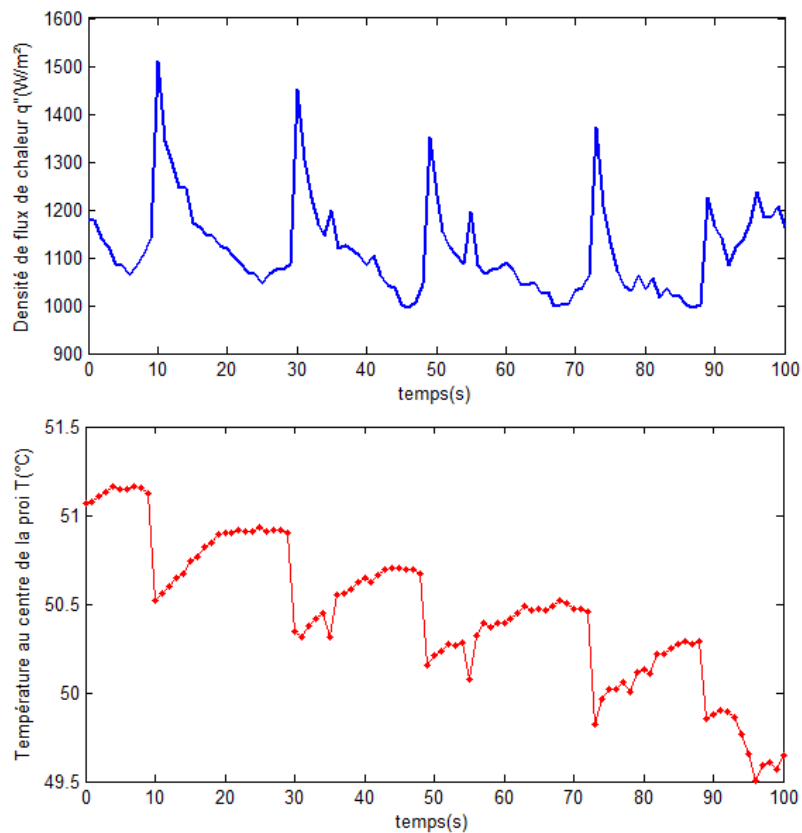


Figure 2.11- Variation temporelle de la température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur lors de la croissance et le détachement de l'embryon de vapeur.

D'après les résultats obtenus, on constate l'existence de plusieurs cycles qui se répètent en termes de température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur. Chaque cycle correspond à la durée de vie de la bulle de vapeur sur la paroi chauffante de l'ébulliomètre. On voit que le profil de température a tendance à décroître après chaque cycle. Ceci est dû à la contrainte du maintien de chauffage qu'on n'a pas pu respecter durant cette étude expérimentale, d'ailleurs la température de saturation du fluide descend de 41°C jusqu'à 39°C.

Notre objectif dans cette expérience était de voir les comportements de flux de chaleur et de températures durant la croissance et le détachement d'une seule bulle. Les allures obtenues sont très claires, la densité de flux de chaleur dans chaque cycle évolue dans le sens inverse de la température : quand la température croît, il y'a une chute de densité de flux de chaleur, alors que la température décroît, il y'a augmentation de la densité de flux thermique.

2.5.2.2 Deuxième expérience

L'activation du site artificiel est une opération très délicate, car il y'a des imperfections sur la partie latérale du fluxmètre qui ont tendance à piéger des gaz et restent ainsi actifs avec le site au centre de l'ébulliomètre. Le déclenchement du site au centre uniquement nécessite de

refaire le protocole à plusieurs reprises. On a cherché à travers cette deuxième expérience à confirmer les allures obtenues dans la première expérience afin de tenter par la suite d'avancer des explications et faire des comparaisons.

Pour cela, on s'est placé dans des conditions de saturation proches de l'expérience précédente et on a déclenché l'ébullition sur le site isolé, les résultats obtenus sont représentés dans la figure 2.12 pour une durée de 100s. La puissance imposée dans cette expérience est de 0.144W inférieure à la puissance imposée dans première expérience.

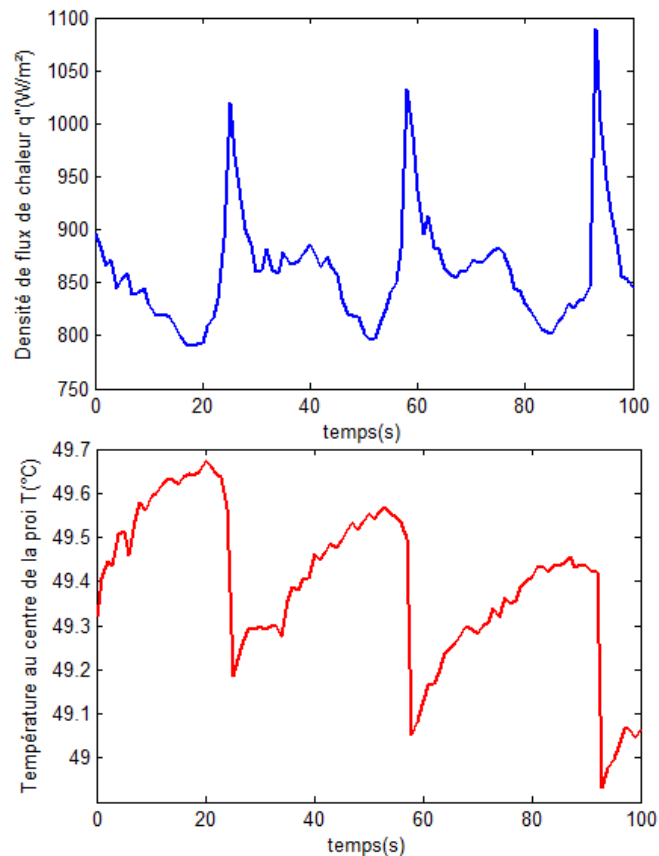


Figure 2.12- Variation temporelle de la température au centre de la paroi et la densité de flux de chaleur (deuxième expérience)

On obtient les mêmes allures que dans la première expérience en terme de l'évolution en sens inverse entre la température et la densité de flux de chaleur. On le voit particulièrement dans la figure 2.13 où on a présenté dans le même graphe le deuxième cycle de la seconde expérience (entre 17 et 52s). De plus on voit que dans la deuxième expérience il y'a moins de cycles que la première expérience (trois cycles alors que la première expérience en présente cinq). Ceci est expliqué par la diminution de la puissance imposée dans la deuxième expérience pour garder la bulle de vapeur le plus de temps sur la paroi.

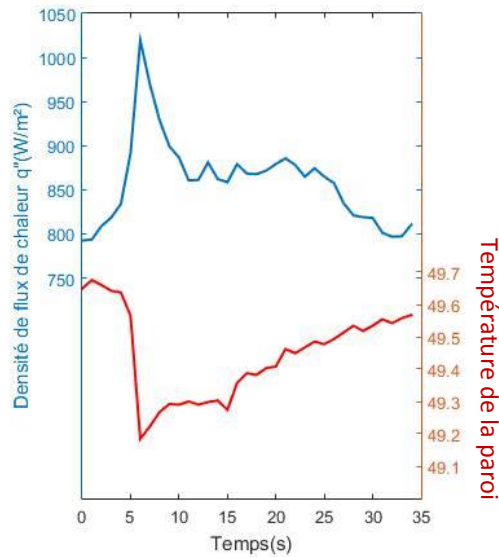


Figure 2.13- Comportement de la densité de flux de chaleur et la température durant un cycle d'une bulle.

2.5.3 Interprétation

Chaque cycle observé expérimentalement correspond à l'intervalle de temps dans lequel l'embryon de vapeur apparaît, croît et enfin se détache. Les observations expérimentales montrent que la phase de croissance de l'embryon de vapeur est accompagnée par l'augmentation de température et la diminution de la densité de flux de chaleur. En effet, la première expérience montre une élévation de température de 0.5°C en moyenne dans chaque cycle. On explique cette observation par la création d'une phase vapeur au centre de la paroi, cette vapeur est surchauffée au fur et à mesure que la bulle croît en gagnant de la chaleur de la paroi chauffante. Comme le thermocouple de l'ébulliomètre est placé au centre de la paroi, il mesure directement la température de cette vapeur surchauffée durant la phase de croissance. La diminution de la densité de flux de chaleur durant la phase de croissance (500W en moyenne durant la première expérience) est expliquée par l'isolation thermique due à la création de vapeur piégée sur la paroi. Cet isolant thermique bloque l'évacuation de la chaleur qui va servir au chauffage de la vapeur. Ainsi les transferts thermiques se dégradent alors que la température augmente durant la phase de croissance avec l'augmentation du volume de vapeur.

Quand la bulle se détache, il y'a une chute instantanée de température et une augmentation rapide de densité de flux de chaleur. On peut expliquer ces observations par l'effet du remouillage de la paroi par le liquide au voisinage qui est à une température plus basse engendrant un refroidissement de la paroi chauffante et donc une diminution de température. Quant à l'augmentation de la densité de flux de chaleur, elle s'explique par le mouvement de détachement de la bulle qui perturbe le liquide et le pousse à mouiller la paroi avec une certaine vitesse augmentant le coefficient de transfert. Le pompage thermique de la bulle par évacuation d'une quantité de chaleur avec elle explique aussi l'amélioration des transferts thermiques. On rajoute que les transferts de chaleur dans un liquide sont meilleurs que dans la phase vapeur vu la différence des conductivités thermiques, c'est ce qui a tendance à augmenter aussi les transferts juste après le détachement.

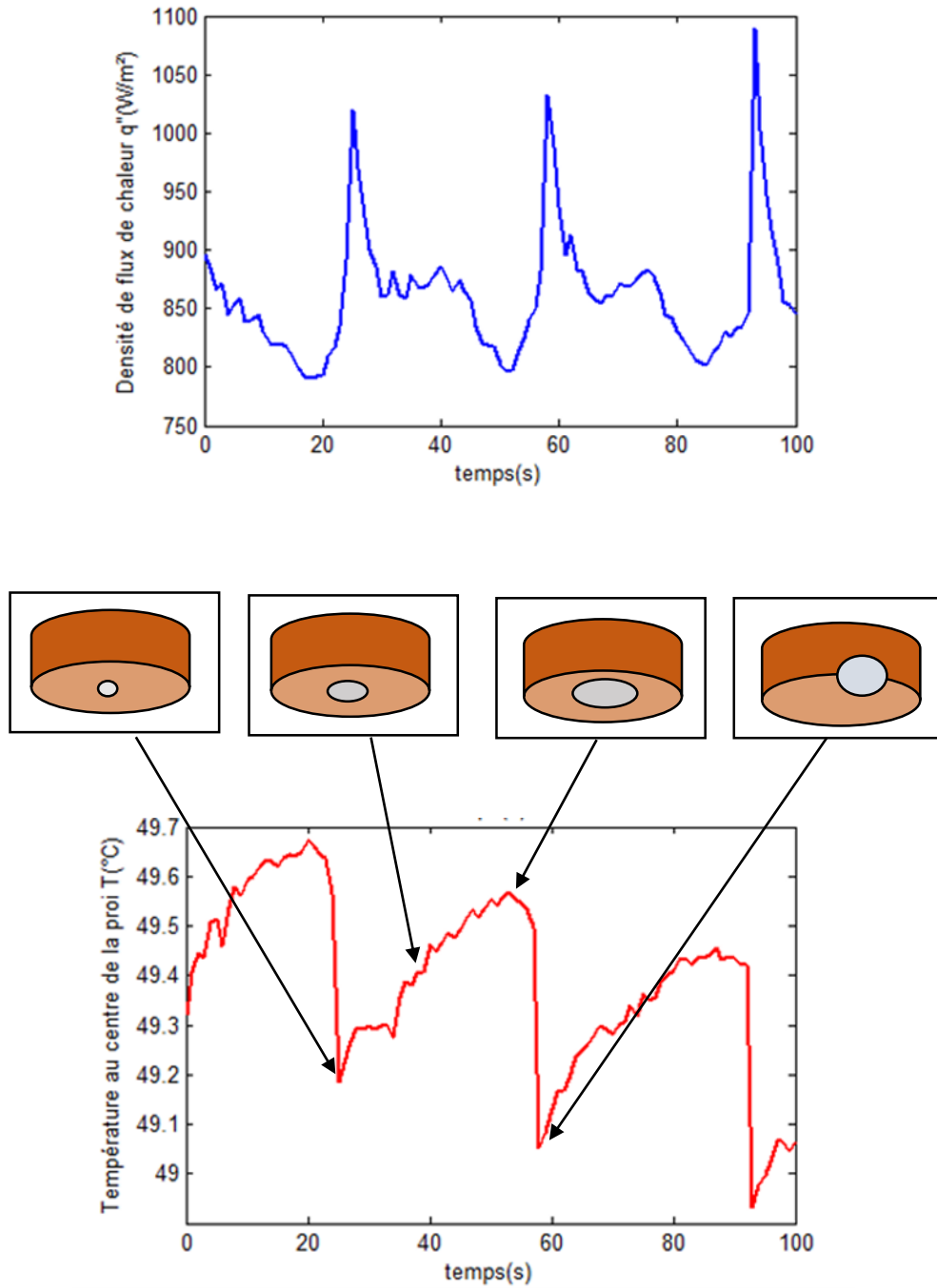


Figure 2.14- Identification des phases de croissance avec les courbes températures et de flux de chaleur.

2.5.4 Comparaison

Parmi les résultats les plus récents sur l'étude de l'ébullition sur site isolé, on cite les travaux de Zamoum [4] qui a étudié les transferts de chaleur à partir de la nucléation d'un embryon de vapeur. Il a tracé l'évolution de la température et la densité de flux de chaleur durant la croissance de la bulle sur une paroi chauffante pour différentes orientations de la paroi.

On présente dans cette partie les allures qu'ils ont obtenues pour une orientation de 179° à une température de saturation de 36°C

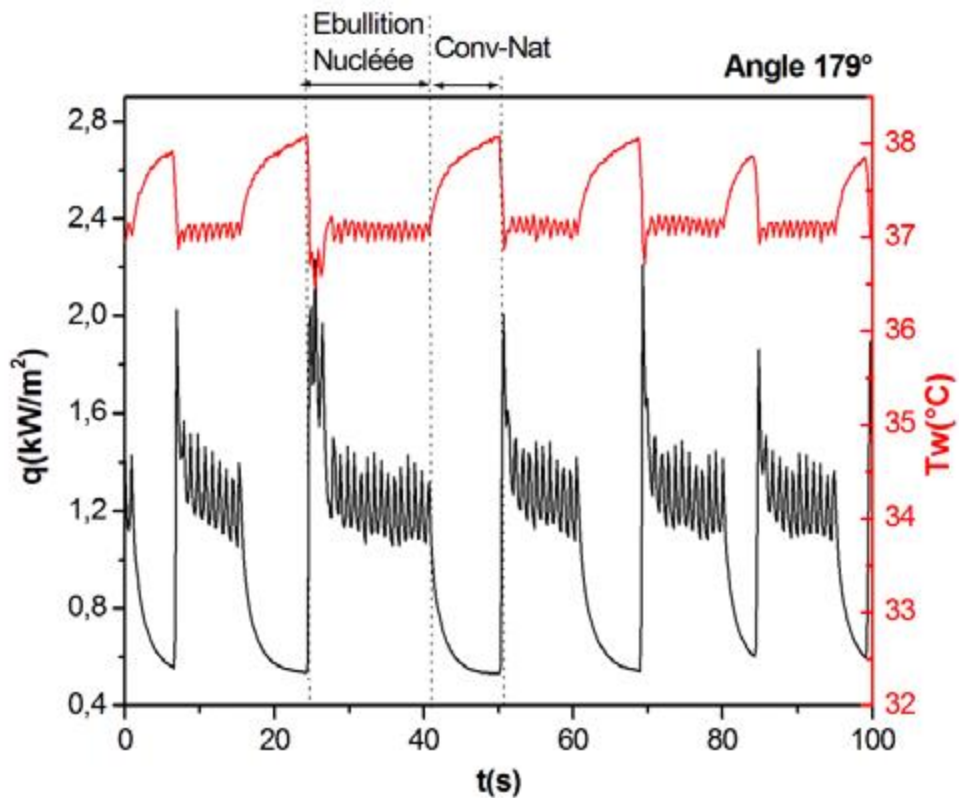


Figure 2.15- Variation temporelle de la densité de flux de chaleur et de température d'un embryon de vapeur formé à partir d'une orientation de 179° de la paroi chauffante [4].

Il a noté de même un comportement inverse entre l'évolution de la température ainsi que la densité de flux de chaleur. Quand la bulle croit, il y'a augmentation de la température et dégradations du flux de chaleur. Durant le détachement, il y'a une chute de température et amélioration des transferts thermiques.

Damien Serret [11] a étudié la croissance d'une bulle sur une paroi et a visualisé la distribution de température et de flux de chaleur en utilisant une caméra infrarouge. Il a mis en évidence l'importance de la norme de flux de chaleur sur l'interface de la bulle avant son détachement.

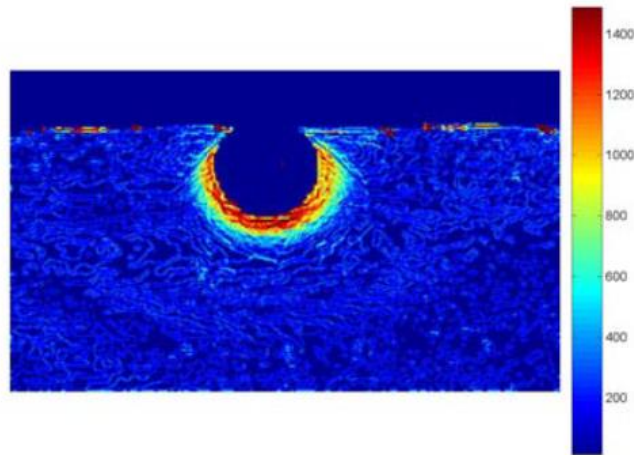


Figure 2.16- Distribution des transferts de chaleur durant une bulle en croissance [11].

Les résultats obtenus par Zamoum [4] sont parfaitement en accord avec les résultats qu'on a obtenus expérimentalement. Ceci confirme les hypothèses qui ont été faites pour expliquer les observations. De plus, le résultat obtenu par Serret montre la distribution du flux de chaleur importante autour de la bulle qui va se détacher emportant cette quantité de chaleur (pompage thermique) dont on a parlé dans la partie interprétation des résultats.

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié expérimentalement la croissance et le détachement d'un embryon de vapeur créé à partir d'un site artificiel et les transferts thermiques associés. On a tracé les courbes de l'évolution de densité de flux de chaleur et de température et on a mis en évidence le comportement inverse de ces deux grandeurs. Par la suite on a tenté d'avancer des explications des observations faites pour enfin confirmer les hypothèses avec des résultats de travaux antérieurs sur l'ébullition en mono-site.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans cette étude a montré la nécessité d'avoir une approche simplifiée du phénomène d'ébullition car celui est particulièrement complexe vu le grand nombre de paramètres physiques qu'il fait intervenir. L'établissement d'une loi de transfert thermique en ébullition est très difficile, d'ailleurs un grand nombre de corrélations existent dans ce domaine. Pour aller plus loin et comprendre la base du phénomène, on a étudié une expérience simple de croissance de bulle unique sur un site de nucléation artificiel.

Après une revue bibliographique sur les travaux réalisés dans le domaine de croissance d'une bulle de vapeur et les transferts thermiques associés, on a traité des modèles de croissance où on a représenté graphiquement la loi de croissance d'une bulle et expliqué par la suite le mécanisme de transferts thermiques mis en jeu.

Par la suite, un dispositif expérimental a été présenté et le protocole d'obtention du site et d'étude des transferts thermiques durant la croissance et le détachement de la bulle a été bien expliqué. Ce dispositif a permis l'étude de la croissance d'une bulle de vapeur unique sur le site artificiel dans des conditions d'état de surface et thermodynamiques bien maîtrisés. On a montré que la croissance de la bulle peut être décomposée en trois étapes : l'apparition de l'embryon de vapeur au niveau du site artificiel suivi par sa croissance sur toute la paroi chauffante et enfin son détachement. De plus on a étudié le comportement de la température au centre de la bulle et la densité de flux de chaleur dans chaque phase de croissance et de détachement de cette dernière. On a obtenu une augmentation de la température accompagnée par la dégradation du flux de chaleur durant la phase de croissance, et le phénomène inverse durant le détachement. On a tenté d'expliquer ces observations par l'apparition de la couche de vapeur surchauffée sur la paroi durant la phase de croissance qui va dégrader les transferts thermiques du à son isolation thermique. Ces résultats sont en accord avec les résultats récents sur l'étude de l'ébullition sur un site isolé notamment dans [4].

Cette étude a été réalisée grâce à la technologie de l'ébulliomètre qui s'avère un moyen efficace pour étudier l'ébullition d'un régime développé sur toute la paroi chauffant jusqu'à un seul site de nucléation. Ces résultats ainsi obtenus nous permettent d'apporter de nouveaux éléments de compréhension du mécanisme d'ébullition et des transferts de chaleur associés sur lequel les recherches n'ont pas cessé depuis le siècle dernier.

Ce dispositif pourrait cependant être amélioré. En effet, l'étude de nucléation sur site isolé est très difficile d'un point de vue expérimental. A une position de 180° , il était nécessaire d'arrêter le chauffage pour éviter les bulles de la cartouche chauffante qui vont perturber le phénomène. Cette contrainte a des conséquences non négligeables, la température de saturation n'a pas été fixée à une valeur stable ce qui a fait tendre les courbes à décroître après chaque cycle. Une solution qu'on pourrait proposer est d'utiliser un thermostat pour maintenir le chauffage de la cellule avec les échangeurs de chaleurs qu'on avait utilisés pour le refroidissement.

Bibliographie

- [1] H. Lee, J. Kim, B. Oh and M. Kim, «Single bubble growth in saturated pool,» *International Journal of multiphase flow*, vol. 30, pp. 697-710, 2004.
- [2] Y. Nam, E. Akitanol and J. S. K.V. Dhir, «Single bubble dynamics on a superhydrophilic surface with artificial nucleation sites,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 1572-1577, 2011.
- [3] S. Manickam and V. Dhir, «Holographic interferometric study of heat transfer to a sliding vapor bubble,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 55, pp. 925-940, 2012.
- [4] M. Zamoum, «Etude expérimentale de l'ébullition mono et multi-sites,» Thèse, Aix Marseille Université, 2014.
- [5] S. Larbi, «Cours sur les écoulements diphasiques Chapitre 4 Equations locales instantanées en écoulements diphasiques,» Ecole Nationale Polytechnique, Département de Génie Mécanique, 2015.
- [6] S. Z. M.S Plesset, «The growth of vapour bubbles in superheated liquids,» *Journal of App. Phys.*, vol. 25, pp. 493-500, 1954.
- [7] M. Cooper and A. Lloyd, «The microlayer in nucleate boiling,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 12, pp. 895-913, 1969.
- [8] P. Carey, «Liquid-vapor phase-change Phenomena,» Hemisphere Publishing Corporation, 1969.
- [9] B. Mikic and W. Rohsenow, «On bubble growth rates,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 13, pp. 657-666, 1970.
- [10] V. Stralen, M. Sohal, R. Colle et W. Sluyter, «Bubble growth in pure and binary systems,» *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 18, pp. 453-467, 1975.
- [11] D. Serret, «Etude expérimentale de l'ébullition nucléée sur un site isolé: Dynamique de croissance et transferts de chaleur,» Thèse, Aix Marseille Université, 2010.

Annexe

Programme de résolution de l'équation différentielle de Rayleigh :

```
function r_euler(R0,dR0,t0,tf,dt,A)
t=t0:dt:tf;
R(1)=R0;
dR(1)=dR0;
for i=1:length(t)-1
    R(i+1)=R(i)+dt*dR(i);
    dR(i+1)=dR(i)+dt*(A/R(i)-3/2*(dR(i))^2/R(i));
end
t=t'
R=R'

plot(t,R)
xlabel('temps (s)')
ylabel('Rayon (m)')

end
```