



## Effet de l'Angle d'Orientation sur le Glissement d'une Bulle

Touhami BAKI<sup>1</sup>, Djamel SAHEL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Faculté de Mécanique, Laboratoire de Carburants Gazeux et Environnement, USTO.MB, ALGERIA,  
E-mail : [tou\\_baki@hotmail.com](mailto:tou_baki@hotmail.com)

<sup>2</sup>Faculté de Mécanique, Laboratoire de Carburants Gazeux et Environnement, USTO.MB, ALGERIA,  
E-mail : [djamel\\_sahel@ymail.com](mailto:djamel_sahel@ymail.com)

**Résumé :** L'ébullition est influencée par un nombre important de paramètres; l'angle d'orientation constitue un de ces paramètres qui influe positivement sur le transfert de chaleur. La dynamique de la bulle joue un rôle important dans l'amélioration du transfert de chaleur lors de l'ébullition. Pour cette raison, nous nous sommes situés à l'échelle de la bulle et nous avons simulé le détachement d'une bulle de vapeur dans l'eau liquide d'une surface chauffée lorsque, l'angle d'orientation varie de 0 à 90°.

Nous avons suivi l'évolution du glissement de la bulle, de la couche limite thermique et du coefficient de transfert de chaleur; Il apparait que la couche limite thermique est perturbée et que le coefficient de transfert atteint des proportions importantes et la vitesse de glissement dépendent de l'angle d'orientation de la paroi.

**Mots clés :** ébullition, bulle, orientation, glissement, simulation, VOF.

### 1. Introduction

L'ébullition est un mode très efficace de transfert de chaleur, elle permet de dégager une énorme quantité de chaleur pour des gradients de température faible, et trouve une large application dans l'industrie chimique, pétrochimique, alimentaire, et de réfrigération.

L'ébullition nucléée en vase reste un phénomène extrêmement complexe et insaisissable, et dépend de plusieurs paramètres ; Parmi ces paramètres, l'effet d'inclinaison de la paroi, étudié par Nishikawa et son équipe [1] pour l'eau à la pression atmosphérique; l'orientation a été variée de 0° à 175° par rapport à l'horizontal ; Une liaison directe a été établie entre l'angle d'inclinaison et le coefficient de transfert de chaleur ; Ce dernier augmente quand l'angle augmente, ceci est valable pour les faibles flux de chaleur. Par contre, pour des flux de chaleur importants, aucune relation n'est établie avec l'angle d'orientation.

La compréhension du phénomène de l'ébullition passe par l'investigation au niveau microscopique à savoir la dynamique de la bulle et son environnement. Manickam et son équipe [2] ont étudié expérimentalement le glissement d'une bulle par interférométrie sur le côté bas d'une surface chauffée. Ils ont constaté que le glissement de la bulle améliore le transfert de chaleur. Mukherjee et son équipe [3] ont fait la simulation du grossissement et du détachement des bulles de vapeur, ainsi que la coalescence de deux et trois bulles de vapeur. Van der Geld et son équipe [4] ont présenté des mesures de la croissance de la bulle de vapeur et de son détachement pour une certaine orientation, et comparées avec des simulations numériques 2D. Une analyse des forces agissant sur la bulle au cours de son glissement a été examinée.

### 2. Modèle numérique proposé

#### 2.1. Méthode :

La dynamique de la bulle inclue le grossissement et le détachement. Pour la simulation du détachement de la bulle, nous avons supposé qu'elle avait atteint le volume nécessaire pour entamer son processus. Le diamètre équivalent de départ a été déterminé en utilisant la corrélation de Fritz [5] détaillé dans l'équation (1).

$$d = 0.02008\phi \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (1)$$

Le processus étudié est le détachement de la surface chaude d'une bulle de vapeur d'eau, le liquide est à la température de saturation. L'étude est faite en deux dimensions, les flux sont laminaires, la température de la

paroi reste constante et les propriétés thermodynamiques de chacune des deux phases sont insensibles aux petites variations de température et de pression.

Lors du processus, on n'inclut pas le transfert de masse de la phase liquide à la phase vapeur ; Les propriétés thermiques et physiques sont présentées dans le tableau 1. Toutes les propriétés sont évaluées pour le cas de l'eau à la pression atmosphérique et à la température 100°C.

Tableau1 - Propriétés thermiques et physiques de l'eau

Propriétés	Unité	Liquide	Vapeur
$\rho$	$kg/m^3$	958	0,598
$c_p$	$kJ/kg.K$	4,212	2,02
$\lambda$	$W/m.K$	0,68	0,0248
$\mu$	$m^2/s$	$2,85 \times 10^{-4}$	$1,2 \times 10^{-5}$
$L$	$kJ/kg$	2,257	
$T_{sat}$	$K$		373,15
$\beta$	$K^{-1}$	$7,5 \times 10^{-4}$	
$\sigma$	$N/m$	0,0589	

## 2.2. Conditions initiales

Lors du détachement, la bulle est considérée comme une demi-sphère de diamètre 3.50 mm. Le diamètre équivalent donné par la formule de Fritz pour un angle de contact de 54° est  $d=2,72 \text{ mm}$ . Les propriétés de la phase liquide et vapeur sont prises pour l'eau à 100 °C; la température de la vapeur est considérée égale à la température de saturation,

La température de la paroi est égale à 110 °C, soit une surchauffe de la paroi  $\Delta T=10^\circ C$  et la pression est prise égale à la pression atmosphérique ; la pression de la bulle est calculée à partir de la formule de Laplace. La température de la bulle est la température de saturation mais la température du liquide est surchauffée par rapport à la bulle en tenant compte de la surpression de la bulle.

## 2.3. Les équations gouvernantes

La méthode VOF (Volume Of Fluid) a été introduite aux équations régissant le phénomène, sont décrites ci-dessus. L'équation du taux de présence de la phase est définie par l'équation (2) :

$$\frac{1}{\rho_q} \left[ \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n \left( \dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq} \right) \quad (2)$$

L'équation de conservation de la quantité de mouvement est définie par l'équation (3) :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) \right] + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (3)$$

Et l'équation de la chaleur est donnée par la formulation (4) et définit comme-suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) + S_h \quad (4)$$

## 2.4. Conditions aux limites

Le domaine de contrôle choisi est de dimensions 20 mm x 10 mm, la partie basse est la surface chaude (wall), Le côté droit est l'entrée (velocity inlet), le côté gauche est la sortie (pressure outlet) et la partie supérieure est une symétrie (symetry). Les calculs seront faits en coordonnées cartésiennes; la bulle sera placée sur la paroi avec les coordonnées (15,0). La géométrie et le maillage ont été générés en utilisant le logiciel Gambit 2.4.6; au niveau de la surface chauffante à  $y=0, u=0, v=0, T=T_w$  ; au-dessus du domaine, on a à  $y=y_{max}, u=0, v=0, T=T_i$  ; sur les deux côtés, on a à  $x=0$  et  $x=x_{max}, u=0, v=0, T=T_l$ .

## 2.5. Paramètres de simulation utilisés

Après introduction des conditions initiales et les spécifications des conditions aux limites, le contrôle de la solution ainsi que l'initialisation doivent être spécifiés avant le démarrage du calcul ; Le contrôle de la solution consiste en adoptant la précision du schéma de couplage pression et vitesse, les schémas de discrétisation des différentes variables et les facteurs de sous- relaxation. Dans ce cas, l'algorithme PISO pour le couplage pression et vitesse et le schéma de reconstruction de l'interface géo-reconstruct ont été utilisés. Ce

dernier schéma est le plus précis, il fait une interpolation linéaire en utilisant les fractions volumiques des mailles voisines de l'interface.

Des schémas du premier ordre ont été spécifiés pour la discrétisation des paramètres Momentum et Energy et body force Weighted pour pression. Les facteurs de sous-relaxation par défaut ont été utilisés sans changement, le pas de temps est de l'ordre de  $10^{-4}$  secondes ; En introduisant les conditions initiales sur le maillage à l'aide du code de calcul Fluent 6.3.26, on obtient les contours de fraction de volume de l'état initial, comme il est indiqué sur la figure 1.

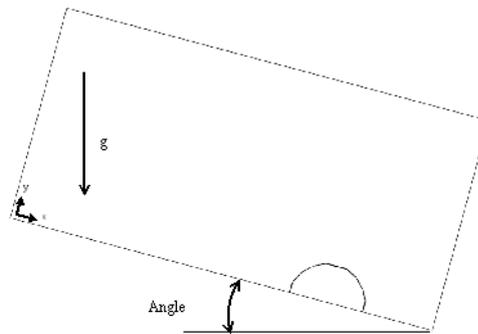


Figure 1. Contour de la bulle à l'état initial

La figure 2 montre un effet faible sur le maillage; La grille choisie pour la simulation est 200x100 pour le maillage 2, la bulle se déplace, et le détachement complet de la paroi chaude a lieu après 17 ms. Nous avons utilisé deux autres grilles 182x91, maillage 1 et 222x111, maillage 3. Le détachement pour la grille 1 a été réalisé après 18 ms et pour le troisième à 19 ms; Dans cet essai, l'angle d'inclinaison  $\theta$  est nul; La grille 200x100 est retenue, pour les simulations suivantes.

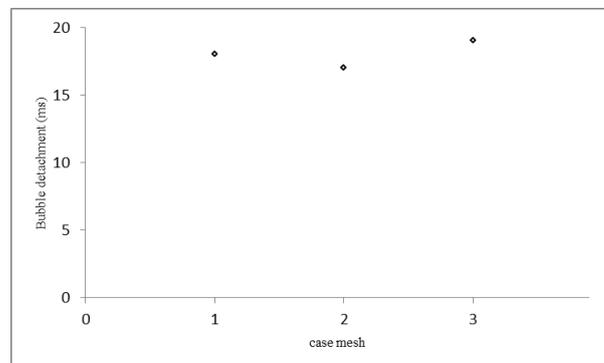


Figure 2- Influence du maillage

La figure 3 montre le mouvement de la bulle lorsque la paroi est horizontale, donc à un angle  $\theta = 0^\circ$ ; Les contours schématisés sont les étapes qui suivent une bulle au détachement, ils indiquent la position initiale, après 3 ms, puis la moitié du parcours et enfin la phase de détachement.

Le diamètre de base de la bulle a une valeur maximale au début, puis il commence à diminuer jusqu'à ce qu'il atteigne zéro au détachement après 17ms; Mukherjee et Dhir [3] ont fait la simulation de croissance et le détachement d'une bulle, après avoir atteint un diamètre de base maximum après 20 ms, reste constant pendant 10 ms, puis diminue au détachement après 16 ms, ce qui concorde avec le travail actuel.

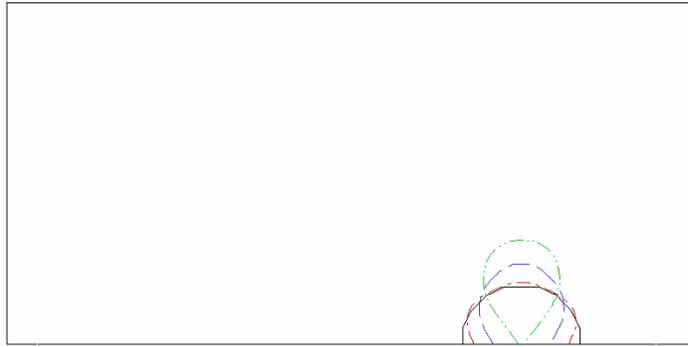


Figure 3- Contour de la bulle pour  $\theta = 0^\circ$

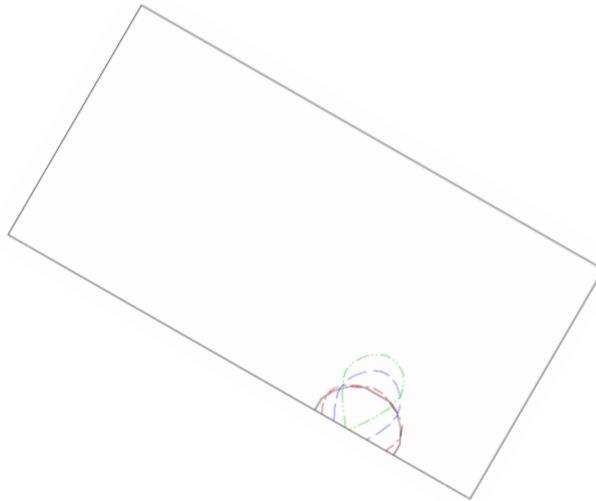
Les mêmes conditions ont été reconduites pour la simulation en changeant la direction de l'accélération par rapport à la paroi chaude, ainsi on examine l'angle d'inclinaison  $\theta$  de la paroi et son effet sur le détachement de la bulle.

### 3. Résultats et discussions

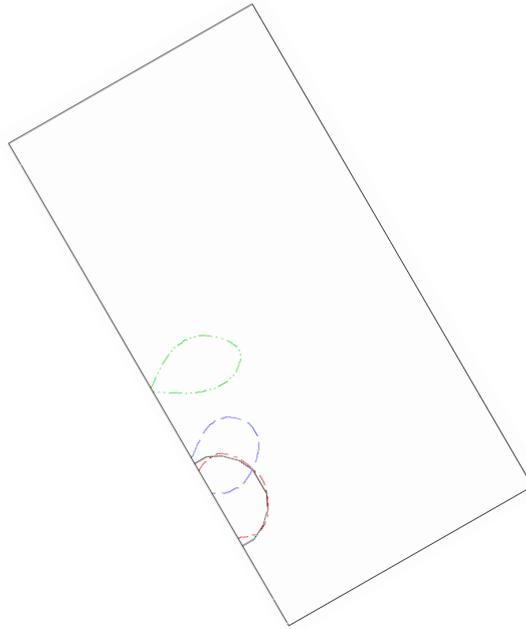
Après simulation du détachement de la bulle d'une paroi horizontale, nous avons fait varier l'angle d'orientation  $\theta$  de la paroi de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ .

#### 3.1. Détachement et glissement

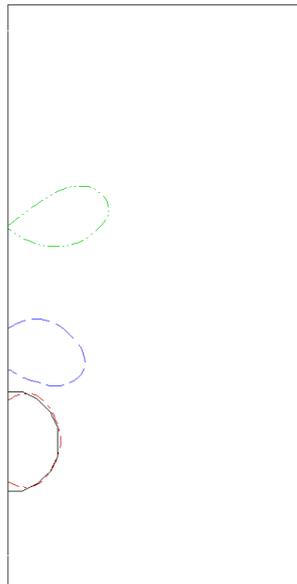
A un angle de  $0^\circ$ , la bulle se détache après 17 ms et il n'y a pas de glissement comme le montre la figure 3. A  $30^\circ$ , la bulle se détache après 20 ms et elle glisse le long de la paroi de 0,3 mm avant de se détacher, comme indiqué à la figure 4a. De même, pour un angle de  $60^\circ$ , elle se détache à 63 ms et glisse le long de la paroi d'une longueur de 4,8 mm, voir la figure 4b. A  $90^\circ$  la bulle quitte la paroi après 83 ms, pendant ce temps elle a parcouru une distance de 7,4 mm comme le montre la figure 4c.



a) inclination angle  $\theta = 30^\circ$



b) inclination angle  $\theta = 60^\circ$

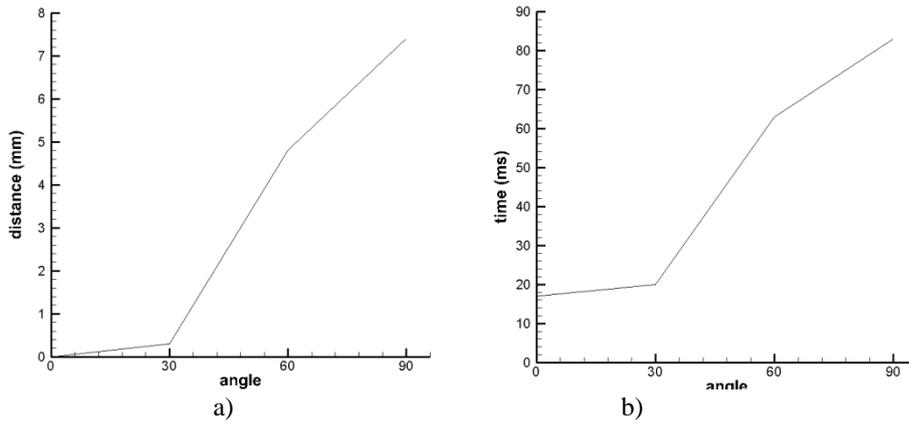


c) inclination angle  $\theta = 90^\circ$

Figure 4- Contour de la bulle pour différente orientation

La figure 5 nous montre la relation entre l'angle d'orientation et les deux paramètres que sont la distance de glissement de bulle le long de la paroi et le temps de ce même glissement.

On constate que lorsque l'angle  $\theta$  se situe entre 0 et  $30^\circ$ , l'augmentation de la distance est minime de même que pour le temps de glissement qui ne varie que faiblement. A partir de  $30^\circ$  et jusqu'à  $60^\circ$ , l'augmentation est très importante que ce soit pour la distance de glissement ou pour le temps de glissement. Après  $60^\circ$  et jusqu'à  $90^\circ$ , l'augmentation de la distance et du temps de glissement restent importants mais moindre que pour la plage de  $30$  à  $60^\circ$ .



a) Relation entre l'angle et la distance de glissement,  
 b) Relation entre l'angle et le temps de glissement  
 Figure 5- temps et distance de glissement

### 3.2. Vitesse de glissement

La vitesse glissement le long de la paroi suivant l'axe x en fonction du temps, est déterminé par l'équation (5) indiquée ci-dessous

$$V_x = \frac{\int V_x \alpha_p}{\int_D \alpha_p} \quad (5)$$

L'évolution de la vitesse de glissement de la bulle en fonction du temps est indiquée dans la figure 6 pour une orientation de l'angle  $\theta$  de 30,60 et 90°. Pour l'angle de 30° la vitesse augmente d'un temps de 0 à 5 ms pour dépasser la valeur de 1,5 cm/s, ensuite elle reste constante de 5 à 14 ms et enfin elle augmente de nouveau jusqu'au détachement de la bulle où elle aura atteint une valeur de 1,89 cm/s. Pour l'angle de 60°, la vitesse de déplacement augmente progressivement jusqu'à 43 ms pour atteindre la vitesse de 11,93 cm/s, puis elle diminue et reste constante jusqu'au détachement de la bulle a une vitesse de 9,91 cm/s. Lorsque l'angle d'orientation est égal à 90° la vitesse de glissement de la bulle augmente avec une pente plus importante que les deux précédentes jusqu'à 39 ms où elle aura atteint un pic de 13,07 cm/s, ensuite elle diminue et se stabilise le long d'un palier jusqu'au détachement où elle quitte la paroi avec une vitesse de 11,41 cm/s ; pour les trois cas, nous avons une perturbation aux environs de 6ms puis la vitesse diminue et augmente de nouveau.

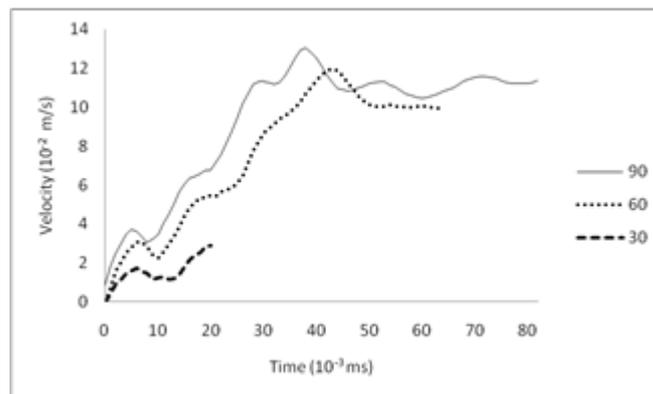


Figure 6. Evolution de la Vitesse de glissement

La figure 7 montre la vitesse finale au moment du détachement de la bulle pour  $\theta$  variant de 0 à 90 °, entre 0 et 30 les vitesses croissent légèrement, puis à 30 ° elle croît rapidement, après 60 ° elle augmente légèrement jusqu'à 90 ° ; Ces valeurs ont été comparés par rapport aux données expérimentales de Maity [6], et donnent un bon accord pour  $\theta$  égal à 0, 30 et 60, pour 90 il y a un léger décalage.

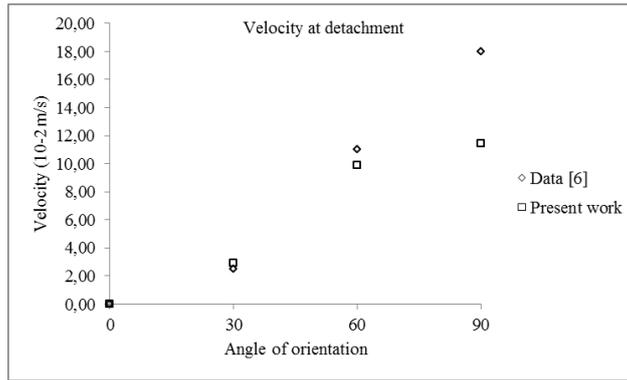


Figure 7- vitesse finale pour différents angles

### 3.3. Vitesse de glissement

L'évolution du coefficient de transfert de chaleur le long de la paroi en fonction du temps est déterminée par l'équation (6), la surface A est choisie loin des influences d'entrée et de sortie de l'écoulement.

$$h = \frac{1}{A} \int_A h dA \quad (6)$$

Le coefficient de transfert de chaleur évolue de la même manière pour les trois angles d'orientation, l'augmentation du coefficient est due à la durée de glissement de la bulle sur la paroi, l'angle n'a pas d'influence directe sur le coefficient de transfert de chaleur, comme le montre la figure 8.

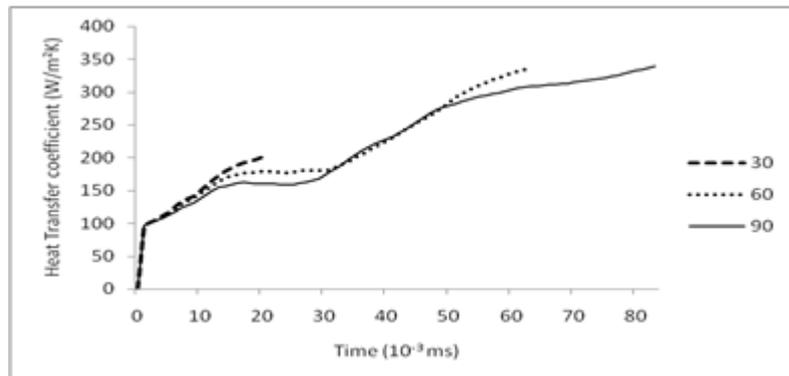


Figure 8. Evolution du coefficient de transfert de chaleur

### 3.4. Température

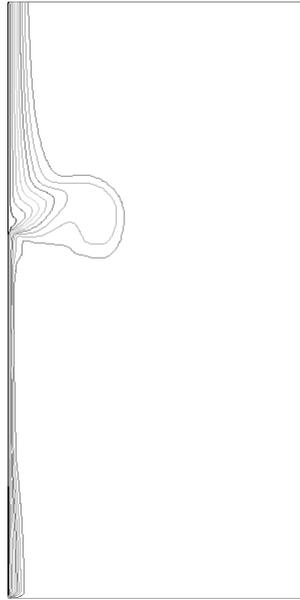
La couche limite thermique entre la paroi chaude et le liquide joue un rôle important dans le transfert de chaleur. Après un régime établi, et en l'absence de bulle, cette couche a une certaine épaisseur, et lorsque la bulle glisse le long de la paroi, elle perturbe cette couche et le transfert de chaleur va être amélioré. Les isothermes qui formaient des lignes parallèles à la paroi vont être déformées par le pied de la bulle qui glisse et reste collé à la paroi. Plus la distance ou le temps de glissement est important et plus la déformation des isothermes est importante et le transfert est amélioré comme le montre les figures 9a à 9c. La première figure 9a correspond à une orientation de la paroi de 30°, la perturbation est minimale et les isothermes suivent l'allure de la bulle lors du détachement. La figure 9b correspond à l'orientation de 60°, les isothermes sont influencées par le glissement et le détachement de la bulle tandis que dans la courbe 9c la déformation est beaucoup plus prononcée que les deux autres puisque la bulle reste plus de temps en glissement.



a)  $\theta = 30^\circ$



a)  $\theta = 60^\circ$



$$\theta = 90^\circ$$

Figure 9. Isothermes au cours du détachement de la bulle

#### 4. Conclusion

Une analyse numérique a été effectuée pour simuler le phénomène de détachement d'une bulle de vapeur sur une paroi inclinée, pour des angles différents de  $0^\circ$  à  $90^\circ$ . Les conclusions sont résumées comme suit:

- La bulle glisse puis se détache, la distance et le temps de glissement croît lorsque l'angle d'orientation de la paroi croît de  $0$  à  $90^\circ$ .
- La vitesse de glissement dans tous les cas croît puis atteint une vitesse terminale, qui dépend de l'angle d'inclinaison.
- Le coefficient de transfert de chaleur évolue en fonction de l'angle d'orientation, et augmente rapidement entre  $30$  et  $60^\circ$
- Les contours des isothermes sont fortement perturbés, particulièrement lorsque l'angle d'orientation augmente.
- Tous les paramètres étudiés, à savoir le temps de glissement, la distance de glissement, la vitesse de glissement de la bulle avant détachement et le coefficient de transfert de chaleur augmentent légèrement lorsque l'angle d'orientation varie de  $0$  à  $30^\circ$ , puis ils varient vigoureusement entre  $30$  et  $60^\circ$  et enfin ils augmentent fortement entre  $60$  et  $90^\circ$ , mais moins que entre  $30$  et  $60^\circ$ .

## Nomenclature

<b>Symbole</b>	<b>Nom, Unité</b>	<b>Symbole grecques</b>	<b>Nom, Unité</b>
<i>A</i>	Aire, $m^2$	$\alpha$	Fraction de volume
<i>a</i>	Diffusivité thermique, $m^2/s$	$\beta$	Dilatation thermique, $K^{-1}$
<i>c<sub>p</sub></i>	Chaleur spécifique, $J/kg.K$	$\Delta$	Différence
<i>D</i>	Domaine	$\delta$	Couche limite thermique, $m$
<i>d</i>	Diamètre de départ de bulle, $m$	$\phi$	Angle de contact
<i>E</i>	Energie, $J$	$\lambda$	Conductivité thermique, $W/m.K$
<i>F</i>	Force, $N$	$\mu$	Viscosité dynamique, $kg/m.s$
<i>g</i>	Accélération de la pesanteur, $m/s^2$	$\nu$	Viscosité cinématique, $m^2/s$
<i>h</i>	Coefficient de transfert de chaleur, $W/m^2.K$	$\theta$	Angle d'orientation de la paroi
<i>L</i>	Chaleur latente de vaporisation, $J/kg$	$\rho$	Masse volumique, $Kg/m^3$
<i>m</i>	Masse transférée, $kg$	$\sigma$	Tension superficielle, $N/m$
<i>p</i>	Pression, $Pa$	$\tau$	Temps de référence, $s$
<i>q</i>	Flux de chaleur surfacique, $W/m^2$		
<i>S</i>	Terme source	<b>Indices</b>	<b>Nom</b>
<i>T</i>	Température, $K$	<i>eff</i>	Effective
<i>t</i>	Temps, $s$	<i>h</i>	Chaleur
<i>u</i>	Vitesse, $m/s$	<i>l</i>	Liquide
<i>v</i>	Vitesse $m/s$	<i>max</i>	Maximum
		<i>o</i>	Référence
		<i>p</i>	La phase p
		<i>q</i>	La phase q
		<i>sat</i>	Saturation
		<i>t</i>	Thermique
		<i>v</i>	Vapeur
		<i>w</i>	paroi

## Références :

- [1] K. Nishikawa, Effect of surface configuration on nucleate boiling heat transfer, International journal heat mass transfer, Vol. 27, N° 9, pp, 1559-1571, 1984.
- [2] S. Manickam, Holographic interferometric study of heat transfer to a sliding vapor bubble, International Journal of Heat and Mass Transfer 55 (2012) 925–940.
- [3] A. Mukherjee, V. K. Dhir, Numerical study of lateral merger of vapor bubbles during nucleate pool boiling, Proceedings of HT2003ASME Summer Heat Transfer Conference Las Vegas, Nevada, July 21-23, 2003.
- [4] C.W.M. van der Geld · C.H.M. Baltis · G.J.M. Priems · T. Baki, Some problems in nucleate flow boiling, in: MATEC Web of Conferences (Ed.), MATEC Web Conf., EDP Sciences, 2014.
- [5] W. Fritz, “Maximum volume of vapor bubbles,” Physikalische Zeitschrift, vol. 36, pp. 379–384, 1935.
- [6] S. Maity, Effect of velocity and gravity on bubble dynamics, M.S. Thesis Univ. Calif. (2000).