

Bulles d'eau à pression sub-atmosphérique : étude expérimentale et analyse dimensionnelle dans un canal vertical confiné.

Water bubbles at sub-atmospheric pressure: experimental study and dimensional analysis in a vertical confined channel.

Patric MANTAROPOULOS, Florine GIRAUD*, Brice TREMEAC, Pascal TOBALY

Laboratoire du Froid, des Systèmes Energétiques et Thermiques (Lafset), Cnam, HESAM Université, 292 rue Saint-Martin 75003 Paris

*(auteur correspondant : florine.giraud@lecnam.net)

Résumé – La dynamique d'éclatement de bulles d'eau dans un environnement sub-atmosphérique a été peu étudiée dans la littérature. Sa compréhension est pourtant indispensable à l'amélioration de certains échangeurs fonctionnant à l'eau. Par une analyse dimensionnelle, cette étude a pour objectif de mettre en lumière les forces prédominantes au moment de l'éclatement. Un lien a également pu être établi entre ces forces et la hauteur de projection des gouttelettes (paramètre caractérisant l'éclatement).

Mots-clés : Eau ; bulles ; sub-atmosphérique ; évaporateur à plaques ; éclatement

Abstract – The dynamics of water bubble bursting in a sub-atmospheric environment have rarely been investigated in the literature. Yet, its understanding is crucial for the improvement of certain heat exchangers operating with water. Through a dimensional analysis, this study aims to highlight the predominant forces when the bubble bursts. A link has also been established between these forces and the height of the droplets' projection (parameter which characterizes the bursting).

Nomenclature

H_p	Hauteur de projection, cm	g	Accélération de la pesanteur, kg.m.s^{-2}
h^+	Hauteur du sommet de la bulle, cm	We	Nombre de Weber
v^+	Vitesse du sommet de la bulle, m.s^{-1}	Bo	Nombre de Bond
R^{eq}	Rayon équivalent, cm	Fr	Nombre de Froude
S	Surface apparente, cm^2	<i>Indices et exposants</i>	
ρ	Masse volumique, kg.m^{-3}	max	Maximum
σ	Tension de surface, J.m^{-2}	L	Phase liquide
		V	Phase vapeur

1. Introduction

La grande majorité des fluides frigorigènes utilisés aujourd'hui sont soumis à des normes très strictes qui sont amenées à se durcir davantage en raison de leur impact environnemental. La recherche d'alternatives à ces fluides paraît donc indispensable. Parmi ces alternatives, un fluide semble particulièrement attractif : neutre, naturel et sans impact environnemental, l'eau semble répondre à tous les critères. Cependant, son utilisation dans la climatisation ou la réfrigération impose de travailler à des pressions très basses, proches de son point triple (0,6 kPa).

Dans ces conditions de pression, la pression hydrostatique ne peut plus être négligée. Un gradient de pression est ainsi créé dans l'environnement d'ébullition. Couplé à la spécificité des

propriétés thermo-physiques de l'eau dans ces gammes de pressions et notamment à la faible masse volumique de la vapeur d'eau, des comportements atypiques peuvent être observés à l'image des bulles de taille centimétrique en forme de champignon présentées par [1-2]. La pression hydrostatique a donc une influence importante sur l'environnement d'ébullition (cette influence est présentée avec plus de détails dans [1] et [3]). Appliqué au cas d'un évaporateur à plaques lisses, il a ainsi pu être montré que la majorité du flux thermique est généré par évaporation d'un film liquide [3], formé par croissance et éclatement des bulles de taille importante, contrairement à ce qui peut être observé à plus hautes pressions.

L'utilisation d'évaporateurs à plaques pour de l'eau à basse pression passe donc par une meilleure compréhension de la dynamique de croissance et d'éclatement des bulles afin d'obtenir des évaporateurs compacts et efficaces. Pourtant, malgré plus d'un siècle d'études sur la théorie de croissance de bulles ([4-6]), leur comportement dans ces conditions est très peu documenté. La plupart des modèles présents dans la littérature ne s'appliquent pas à ces gammes de pressions et font de nombreuses hypothèses qui ne sont plus applicables (modèles de bulles sphériques ou semi-sphériques, pas de prise en compte de la pression hydrostatique...).

L'objectif de cette étude est donc d'étudier les paramètres qui influent sur la formation du film liquide projeté, notamment par l'étude de la dynamique de la bulle et de l'impact des différentes forces en présence sur ce film liquide afin d'arriver à terme à pouvoir prédire les comportements observés.

2. Banc expérimental

2.1. Le canal vertical (évaporateur)

La présente étude s'appuie sur des résultats expérimentaux obtenus sur un banc d'essais, dont le constituant principal est un canal vertical lisse confiné (figures 1 et 2). L'épaisseur du canal peut être fixée à 2, 4 ou 6 mm grâce à des entretoises et des joints toriques adaptés. L'alimentation en fluide de ce canal est assurée, par le bas, par trois tubes de section circulaire de 2 mm de diamètre. Un régulateur PID permet, à partir de l'information du niveau de liquide qui est mesuré dans le canal, d'imposer la valeur du débit d'entrée nécessaire. Après vaporisation, l'eau quitte le canal par une fente située à l'extrémité supérieure du canal.

Afin d'assurer la vaporisation et la création de bulles, un fluide secondaire circule à courant dans un canal adjacent de 1 mm d'épaisseur. Le fluide secondaire entre avec un débit fixé à 1 L/min et à la température souhaitée, imposée par un bain thermostaté. Les deux canaux sont séparés par une plaque en acier inoxydable de 6 mm d'épaisseur.

Enfin, la paroi extérieure du canal principal, en PMMA, est transparente et permet donc de visualiser les phénomènes d'ébullition. Ces derniers sont capturés à l'aide d'une caméra rapide (Phantom VEO410) à une fréquence de 3000 à 5200 images par seconde et une résolution de 1280x800 pixels, avec un temps d'exposition compris entre 20 et 191,8 μ s environ.



Figure 1 : Photographie du canal (face)

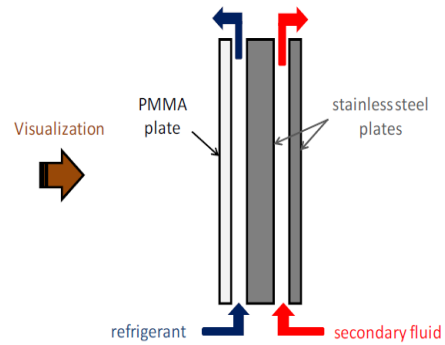


Figure 2 : Schéma du canal (profil) [7]

2.2. L'installation

Afin de faire fonctionner l'installation en continu, le canal est relié à un condenseur. Les conditions de fonctionnement du condenseur sont imposées par un bain thermostaté qui permet, via un fluide secondaire qui circule à la température voulue dans un échangeur tubulaire en cuivre surdimensionné, d'imposer la température interne du condenseur. La pression du condenseur est donc la pression de saturation correspondant à sa température interne.

L'eau quitte le condenseur à l'état liquide et est entraînée par une pompe afin de compenser les pertes de charge. Enfin, l'eau circule dans une vanne de détente en amont de l'évaporateur, pour y entrer en diphasique.

La température est mesurée en entrée et en sortie de chaque composant, côté primaire et secondaire, au moyen de thermocouples de type K, avec une précision de 0,1K. La pression est également mesurée (précision de 0,075% de la plage de mesure [0-50 mbar]) à chaque composant ainsi qu'en amont et en aval de la vanne de détente. Les pressions de travail au canal principal de cette étude sont comprises entre 7 et 17 mbar.



Figure 3 : Banc expérimental complet

3. Analyse d'images

3.1. Traitement et détection de contours

Une campagne expérimentale précédemment réalisée sur ce banc [7] a permis de réaliser 200 acquisitions par caméra rapide des bulles se formant dans le canal (à 2, 4 et 6 mm d'épaisseur).

Afin d'exploiter ces enregistrements et calculer les paramètres pertinents, il est nécessaire en premier lieu de traiter les images brutes. Grâce à un programme développé spécifiquement pour ces travaux en langage Python (utilisation du module OpenCV), les images sont automatiquement traitées en plusieurs étapes : création d'un filtre pour supprimer l'arrière-plan, débruitage, binarisation et détection de contours. La figure 4 montre un exemple de traitement des images. On peut ainsi clairement observer la dynamique de la bulle, de sa nucléation sous la surface libre ($t = 35$ ms dans l'exemple figure 4) à son éclatement ($t = 160$ ms).

Sur les 200 vidéos enregistrées lors de la campagne d'essais, 165 sont exploitables après traitement automatique (les autres n'ayant pas pu être traitées correctement).

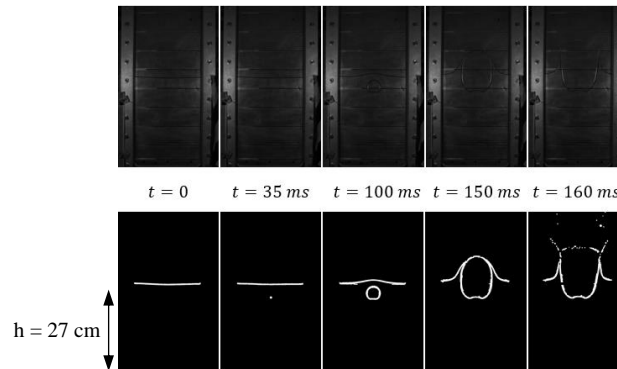


Figure 4 : Exemple de vidéo traitée (en haut : images originales, en bas : images traitées).

3.2. Mesures

Une fois le traitement des images réalisé, les caractéristiques de la bulle peuvent être mesurées. Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement aux paramètres suivants :

- La surface apparente de la bulle (S). Pour la calculer, chaque colonne de pixels de l'image est parcourue pour déterminer la longueur des cordes, correspondant à la différence des coordonnées de chaque extrémité de la bulle (figure 5). La surface apparente correspond à la somme de toutes les cordes de la bulle.
- La hauteur du sommet de la bulle (figure 5, h^+). Ce paramètre permettra par la suite de calculer la vitesse verticale de la bulle.

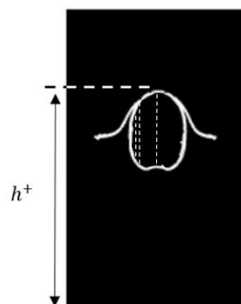


Figure 5 : Exemple de cordes servant au calcul de la surface apparente et emplacement du sommet de la bulle

- La hauteur de projection des gouttelettes après explosion (H_p). Cette dernière est un paramètre important dans cette étude : elle correspond à la hauteur maximale du film liquide se déposant sur la paroi du canal après éclatement de la bulle. Comme précisé en

introduction, l'évaporation de ce film contribue à la majorité des transferts thermiques avec le fluide secondaire. Le calcul de la hauteur de projection serait un moyen efficace de caractériser la formation de ce film. Pour la calculer, le programme applique la procédure suivante : à chaque image enregistrée à la suite de l'éclatement (dont l'instant est choisi manuellement), la densité de pixels est calculée sur chaque ligne parcourue depuis le haut de l'image. La hauteur de projection est alors la différence entre la ligne de densité de pixels maximum et la hauteur de liquide avant croissance de la bulle.

Finalement, le bon fonctionnement du code est vérifié par comparaison avec des mesures numériques réalisées manuellement sur le logiciel ImageJ. L'écart moyen de mesure par rapport à cette référence est estimé à 16%. Cet écart correspond dans la majorité à une surestimation du calcul automatisé par rapport aux valeurs mesurées.

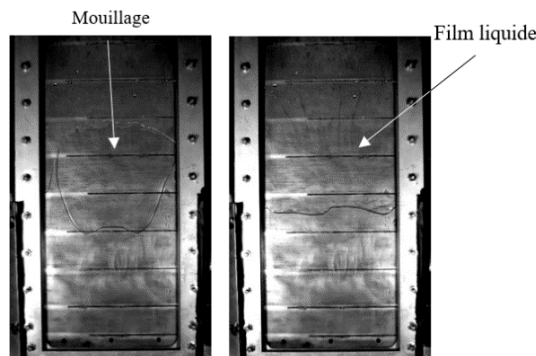


Figure 6a : Illustration du film liquide

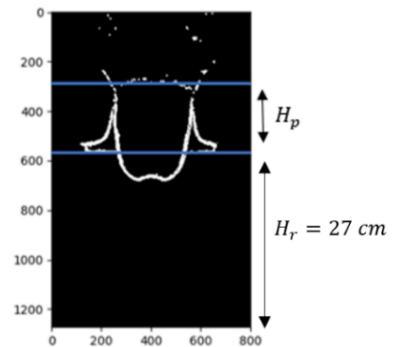


Figure 6b : Définition de la hauteur de projection (unité des axes : pixels)

4. Analyse dimensionnelle

Pendant la croissance d'une bulle, ses caractéristiques (comme sa taille, sa vitesse ou sa forme) sont déterminées par la prédominance de certaines forces par rapport à d'autres. Dans cette étude, on s'intéresse particulièrement à la tension superficielle, la flottabilité et les forces inertielles : ces forces semblent avoir une influence sur la hauteur de projection [8]. Cet impact est évalué par le biais de nombres adimensionnels.

4.1. Grandeurs caractéristiques

La définition de nombres adimensionnels s'appuie sur le choix des grandeurs caractéristiques du problème. L'objet de cette étude concernant l'effet de la dynamique de la bulle et des forces en présence sur son éclatement, les paramètres choisis sont les caractéristiques de la bulle mesurées à l'instant précédant l'éclatement (lorsqu'elles sont à leur maximum). Ainsi, pour chaque enregistrement, les grandeurs caractéristiques suivantes sont déterminées :

- Le temps caractéristique $t_{\text{éclatement}}^-$ correspond au moment précédant la rupture de l'interface libre. Il sera utilisé pour définir les autres grandeurs caractéristiques.
- La longueur caractéristique utilisée est le rayon équivalent de la bulle (défini comme le rayon du cercle de même aire que la bulle) au moment de l'éclatement (voir équation 1).

$$R_{max}^{eq} = \sqrt{\frac{S_{max}}{\pi}} = \sqrt{\frac{S(t = t_{\text{éclatement}}^-)}{\pi}} \quad (1)$$

Avec S la surface apparente de la bulle dont la mesure est précisée au paragraphe précédent.

- La vitesse caractéristique considérée correspond à la vitesse du sommet de la bulle au moment de l'éclatement (équation 2).

$$v_{max}^+ = \left(\frac{dh^+}{dt} \right)_{t=t_{\text{éclatement}}^-} \quad (2)$$

Avec h^+ la hauteur du sommet de la bulle définie précédemment.

4.2. Nombres adimensionnels

Comme précisé en introduction de cette partie, l'impact des forces inertielles, de tension de surface et de gravité sur la hauteur de projection est évalué. Ainsi, les nombres de Weber, Bond et Froude (équations 3, 4 et 5 respectivement) sont utilisés pour identifier l'importance de ces forces.

$$We = \frac{\rho_L R_{max}^{eq} (v_{max}^+)^2}{\sigma_L} \sim \frac{\text{forces inertielles}}{\text{tension de surface}} \quad (3)$$

$$Bo = \frac{(R_{max}^{eq})^2 g (\rho_L - \rho_V)}{\sigma_L} \sim \frac{\text{forces de gravité}}{\text{tension de surface}} \quad (4)$$

$$Fr = \sqrt{\frac{We}{Bo}} \sim \frac{\text{forces inertielles}}{\text{forces de gravité}} \quad (5)$$

Avec ρ_L , σ_L et μ_L respectivement la masse volumique, la tension de surface et la viscosité de la phase liquide, ρ_V la masse volumique de la phase vapeur et g l'accélération de la pesanteur.

4.3. Forces prédominantes

D'après la méthode utilisée par [9] et [10], les points expérimentaux sont placés sur un graphe $Bo = f(We)$ (figure 7), formant une cartographie des zones de prédominance de chaque force considérée. Il convient de préciser que les nombres adimensionnels utilisés ici sont définis différemment de ceux utilisés dans les références citées. L'incertitude associée à ces points est considérée égale à 16%, correspondant à l'écart moyen défini précédemment (ce dernier étant largement supérieur à l'incertitude des capteurs).

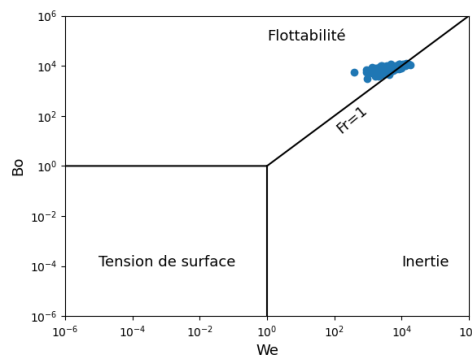


Figure 7 : Prédominance relative des forces dans le domaine d'étude

Il apparaît que les données sont regroupées dans la zone de prédominance des forces inertielles et de gravité, proches de la droite $Fr = 1$. Ces deux forces semblent donc avoir un

impact équivalent sur la bulle au moment de son éclatement. La tension de surface, en revanche, semble n'avoir que peu d'importance à cet instant.

4.4. Impact sur la hauteur de projection

La figure 8a montre un graphique 3D comparant la hauteur de projection à ces deux nombres. Il apparaît que la hauteur de projection est corrélée à la combinaison Bo-We : plus ils sont importants, plus la hauteur de projection est élevée. Sur la figure 8b, une projection de ce graphique 3D sur le plan Bo-We (qui correspond à un agrandissement de la figure 7) confirme que les hauteurs les plus élevées correspondent aux valeurs maximales de ces deux nombres, et inversement.

Ainsi, il semble que plus la prédominance des forces de gravité et d'inertie par rapport à la tension de surface est forte, plus la hauteur de projection est importante.

La tension de surface caractérise les interactions moléculaires du liquide à son interface, dont la rupture nécessite de l'énergie (pour surmonter ces interactions). La flottabilité et les forces inertielles sont, dans le cas présent, largement dominantes par rapport à la tension de surface : l'interface de la bulle se rompt et l'éclatement a lieu. Le surplus d'énergie après la rupture (d'autant plus important que la dominance des forces sur la tension de surface est prononcée) serait ensuite transféré aux gouttelettes sous forme d'énergie cinétique.

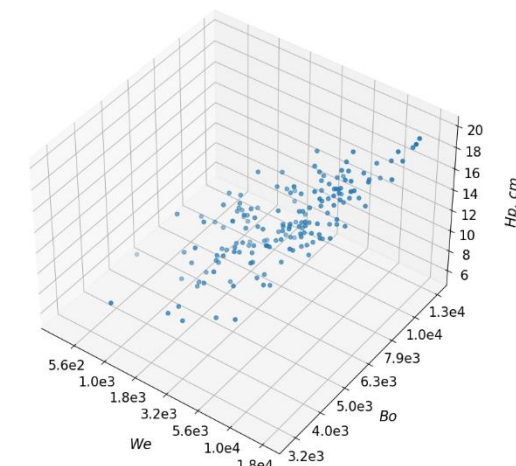


Figure 8a : Hauteur de projection en fonction de Bo et We

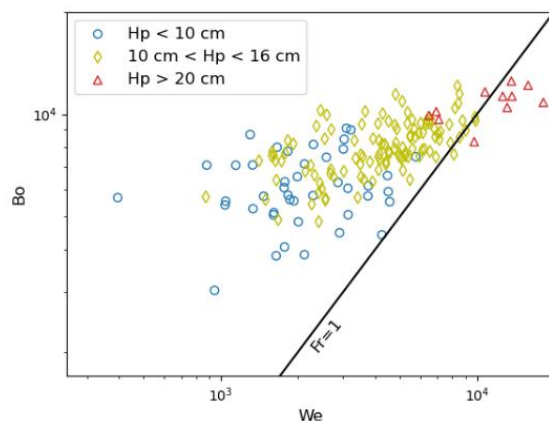


Figure 8b : Projection sur le plan Bo-We

5. Conclusion et perspectives

Les données expérimentales recueillies lors d'une précédente campagne ont été traitées puis analysées grâce à un programme développé au laboratoire. L'exploitation de ces données a permis d'établir un lien entre la dynamique de la bulle à l'instant de l'éclatement (et notamment les forces agissant dessus) et la hauteur de projection des gouttelettes. En effet, les nombres de Bond et de Weber, qui mesurent la prédominance relative de la gravité et des forces inertielles (respectivement) sur la tension de surface, ont été définis. Il a pu être conclu que la hauteur de projection est plus importante lorsque ces nombres sont élevés.

Une analyse similaire est envisagée en modifiant certaines propriétés thermophysiques du fluide, notamment en augmentant la température du liquide (et donc la pression de travail), afin de se rapprocher de la zone de prédominance de la tension de surface.

Références

- [1] Michaie, S., Rullière, R. & Bonjour, J. Towards a more generalized understanding of pool boiling at low pressure: Bubble dynamics for two fluids in states of thermodynamic similarity. *Experimental Thermal and Fluid Science* 101 (2019), 217–230.
- [2] Van Stralen, S. J. D., Cole, R., Sluyter, W. M. & Sohal, M. S. Bubble growth rates in nucleate boiling of water at subatmospheric pressures. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 18 (1975), 655–669.
- [3] Giraud, F., Toublanc, C., Rullière, R., Bonjour, J. & Clause, M. Experimental study of water vaporization occurring inside a channel of a smooth plate-type heat exchanger at subatmospheric pressure. *Applied Thermal Engineering* 106 (2016), 180–191.
- [4] Lord Rayleigh. VIII. On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 34 (1917), 94–98.
- [5] Plesset, M. S. & Zwick, S. A. The Growth of Vapor Bubbles in Superheated Liquids. *Journal of Applied Physics* 25 (1954), 493–450.
- [6] Mikic, B. B., Rohsenow, W. M. & Griffith, P. On bubble growth rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 13 (1970), 657–666.
- [7] Giraud F., Fluro L., Tremeac B., Water vaporization inside a smooth plate-type heat exchanger at subatmospheric pressure: impact of the channel thickness, *International Congress of Refrigeration*, Montréal, Canada (2019).
- [8] Mantaropoulos P., Giraud F., Tremeac B., Tobaly P., Water boiling at low pressure: dynamics of growth and bursting of bubbles in a plate-type evaporator, 14th Gustav Lorentzen Conference, Kyoto, Japan (2020).
- [9] Giraud F., Tremeac B., Influences of confinement on subatmospheric water vaporization phenomena in a vertical rectangular channel, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2019), 118725.
- [10] Smith K., Kempers R., Robinson, A.J., Confinement and vapour production rate influences in closed two-phase reflux thermosyphons Part A: Flow regimes, *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2018), 907-921.