

# Vaporisation de l'eau à pression sub-atmosphérique : dynamique de croissance et d'éclatement de bulles dans un échangeur à plaques.

## Vaporisation of water at subatmospheric pressure: dynamics of bubbles growth and burst in a plate-type exchanger.

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](mailto:florine.giraud@lecnam.net))

**Résumé** – L'ébullition de l'eau à basse pression est un phénomène encore peu étudié dans la littérature. Pourtant, sa compréhension est indispensable afin de maîtriser la production frigorifique des échangeurs fonctionnant à l'eau. Des travaux récents au laboratoire ont montré que l'évaporation d'un film liquide sur la paroi de l'échangeur contribue en majorité aux échanges thermiques. L'objectif de ce travail est d'avoir un premier aperçu de l'impact de la dynamique de croissance et d'éclatement des bulles d'eau sur la formation de ce film. Il est notamment mis en évidence que la hauteur de projection des gouttelettes (après éclatement des bulles) est corrélée à la vitesse de croissance et la taille de la bulle avant éclatement.

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

**Abstract** - The boiling of water at low pressure is a phenomenon that is still little studied in the literature. However, it is essential to understand it in order to control the refrigeration production of water heat exchangers. Recent work in the laboratory has shown that the evaporation of a liquid film on the exchanger wall contributes most of the heat exchanges. The objective of this work is to have a first insight into the impact of the growth and bursting dynamics of water bubbles on the formation of this film. In particular, it is shown that the droplet projection height (after bubble bursting) is correlated to the growth rate and the size of the bubble before bursting.

**Keywords**: Water; bubbles; sub-atmospheric; plate-type evaporator

### Nomenclature

|       |  |                             |                                    |
|-------|--|-----------------------------|------------------------------------|
| $H_p$ | Hauteur de projection, cm  | $S$                         | Surface apparente, cm <sup>2</sup> |
| $H_r$ | Hauteur de remplissage, cm   | <i>Indices et exposants</i> |                                    |
| $H_s$ | Hauteur du site de nucléation, cm                                      | $max$                       | Maximum                            |
| $U_f$ | Vitesse de croissance à l'éclatement, cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> |                             |                                    |

## 1. Introduction

Aujourd'hui, les fluides utilisés pour la réfrigération sont soumis à des normes très restrictives en raison de leur impact environnemental. À l'avenir, certains fluides utilisés aujourd'hui verront leur emploi restreint davantage et certains seront interdits. Pour pallier ce problème et anticiper la demande grandissante de solutions de climatisation dans les années à venir, des alternatives à ces fluides doivent être développées. L'eau, en tant que fluide naturel et neutre d'un point de vue environnemental, paraît idéale dans ce contexte. L'utiliser comme fluide frigorigène impose cependant de travailler à des pressions proches du point triple (0,6 kPa).

Lorsque la pression de travail est si basse, la pression hydrostatique ne peut plus être négligée : l'environnement de croissance des bulles est alors inhomogène en pression, ce qui donne lieu à des comportements inhabituels (bulles de taille centimétrique en forme de champignon [1-2]). Dans le cas particulier de l'évaporateur à plaques lisses, la croissance et l'éclatement des bulles forment un film liquide sur la paroi : l'évaporation de ce film est responsable de la majeure partie des échanges thermiques [3]. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité de ce type d'échangeurs passe par l'optimisation de la surface et de l'épaisseur du film liquide créé. Ceci est possible en caractérisant, dans un premier temps, la dynamique de croissance et d'éclatement des bulles de vapeur.

Peu d'études permettent cette caractérisation dans la littérature. Des modèles de croissance de bulles existent [4-6], mais ces derniers manquent de précision dès lors que la pression de travail est inférieure à la pression atmosphérique [1] : la majorité de ces modèles ne tient pas compte de la spécificité du milieu d'ébullition à de si basses pressions. De telle sorte que les bulles étudiées sont considérées sphériques ou hémisphériques, sans prendre en compte le comportement atypique mentionné plus haut.

Ainsi, afin de permettre l'étude des paramètres impactant la création du film liquide dans un évaporateur à plaques lisses, une caractérisation de la dynamique de croissance et d'éclatement des bulles basée sur des résultats expérimentaux est conduite. Après une partie dédiée à la présentation du banc expérimental, la méthode de traitement des données est explicitée et les facteurs impactant la hauteur de projection des gouttelettes formant le film liquide sont discutés.

## **2. Banc expérimental**

### **2.1. L'évaporateur**

L'élément principal du banc d'essais étudié est un évaporateur à plaques vertical (figures 1 & 2) : il est composé de trois plaques de 500 mm de hauteur et 200 mm de largeur, dont deux sont en acier inoxydable (acier inoxydable 304L) et une en PMMA. Ces plaques constituent les canaux verticaux dans lesquels vont circuler les fluides frigorigène et secondaire (de l'eau). La plaque séparatrice entre les deux canaux a une épaisseur de 6 mm.

Côté fluide frigorigène, le canal est alimenté par le bas par trois tubes de 2 mm de diamètre. Le débit est fixé par le biais d'un régulateur de débit massique, lequel est contrôlé en fonction de la hauteur de liquide voulue dans l'évaporateur. L'eau quitte ensuite l'évaporateur sous forme de vapeur par une fente située à son extrémité supérieure. L'épaisseur du canal dans lequel le fluide frigorigène circule peut être fixée à 2, 4 ou 6 mm en fonction du joint torique et de l'entretoise choisis. La plaque extérieure est transparente (PMMA), ce qui permet une visualisation des phénomènes d'ébullition par caméra rapide (Phantom VEO410). Les acquisitions sont effectuées à 3000 images par secondes avec une résolution de 1280 x 800 et un temps d'exposition de 191,8  $\mu$ s.

Le fluide secondaire, qui circule à co-courant à un débit de l'ordre de 1 L/min, entre dans l'évaporateur à la température choisie au moyen d'un bain thermostaté (consigne entre 11 et 28 °C). En sortie, la température mesurée est comprise entre 10 et 21 °C. L'épaisseur du canal est fixée à 1 mm.

Des thermocouples de type K sont placés à l'entrée et à la sortie de chaque échangeur de l'installation, pour les deux circuits (primaire et secondaire). Des capteurs de pression sont également placés au niveau de chaque composant ainsi qu'en entrée et en sortie de la vanne de détente. Les pressions de travail sont comprises entre 0,7 et 1,7 kPa.



Figure 1 : Photographie de l'évaporateur

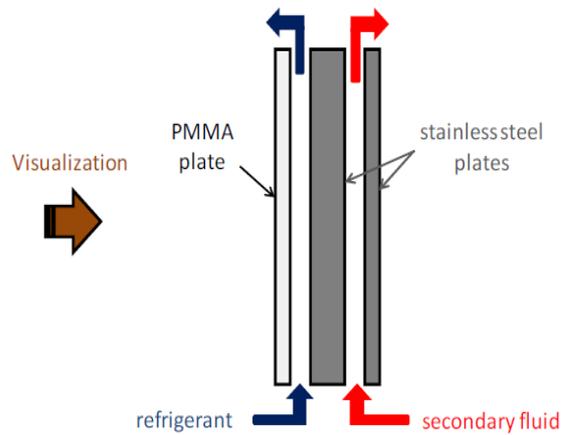


Figure 2 : Schéma de l'évaporateur (profil) [7]

## 2.2. L'installation

Afin que l'évaporateur fonctionne en continu, la vapeur qui en sort est dirigée vers un condenseur. Ce dernier est composé d'un cylindre de 720 mm de hauteur et 300 mm de diamètre intérieur. Un échangeur tubulaire en cuivre (dans lequel circule de l'eau à température imposée par un bain thermostaté) est placé dans ce récipient afin de condenser la vapeur provenant de l'évaporateur. Cet échangeur, surdimensionné, permet d'imposer la pression à la surface libre dans l'évaporateur. Ainsi, le banc expérimental (figure 3) fonctionne en thermosiphon.

Une fois à l'état liquide, l'eau quitte le condenseur et circule dans une pompe de recirculation afin de compenser les pertes de charges. Enfin, le liquide circule dans une vanne de détente avant l'évaporateur pour y entrer en diphasique.



Figure 3 : Banc expérimental complet

### 3. Analyse d'images

#### 3.1. Traitement et détection de contours

Une campagne d'essais réalisée précédemment sur ce banc [3] a permis de réunir 200 enregistrements vidéo par caméra rapide des bulles formées dans l'évaporateur (3000 images par seconde), permettant ainsi l'étude de leur croissance et de leur éclatement.

Afin d'analyser les vidéos capturées, un programme de traitement d'image a été développé en langage Python : une partie des enregistrements a ainsi pu être analysée automatiquement.

Pour ce faire, chaque vidéo est découpée en une série d'images. Les images sont ensuite traitées de façon à isoler la bulle : le « fond » de l'image est retiré et remplacé par un fond noir tandis que les contours de la bulle sont détectés et tracés en blanc. Ce processus est rendu possible grâce au module OpenCV pour Python.

La figure 4 montre un exemple d'images traitées.

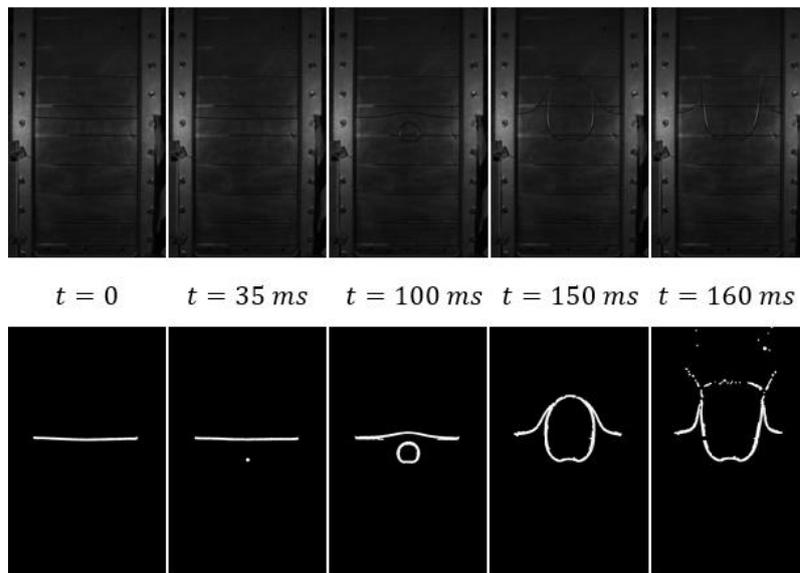


Figure 4 : Exemple de vidéo traitée (en haut : images originales, en bas : images traitées).

#### 3.2. Mesures

Une fois ce pré-traitement réalisé, les images sont analysées afin d'en extraire les caractéristiques de la dynamique de croissance et d'éclatement de la bulle, sources d'informations variées :

- La surface et le rayon apparents donnent une information sur la taille de la bulle. La dérivée temporelle de la surface apparente sur sa vitesse de croissance. Le calcul de la surface apparente a été réalisé comme suit : dans un premier temps, chaque colonne de pixels est parcourue afin de calculer les cordes (correspondant à la différence des extrémités de la bulle, voir figure 5). La somme de toutes les cordes donne ainsi une estimation de la surface apparente.

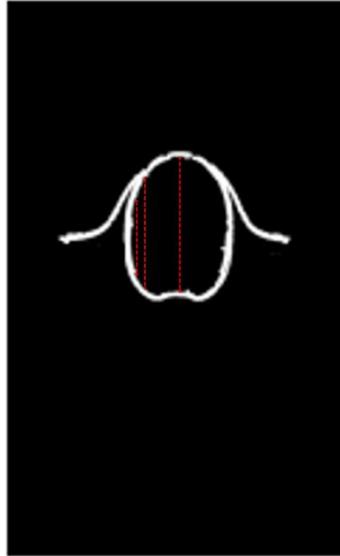


Figure 5 : Exemple de cordes servant au calcul de la surface apparente

- La hauteur du site de nucléation ( $H_S$ ) et la hauteur de l'interface libre avant croissance ( $H_r$ ) renseignent sur l'état initial.
- La hauteur de projection ( $H_p$ ) peut avoir un lien avec le film liquide déposé. En effet, au cours de l'évolution de la bulle, la paroi du canal est mouillée par déplacement de liquide pendant la croissance, puis par projection et dépôt de gouttelettes après éclatement. La hauteur de projection correspond alors à la hauteur maximale du film liquide (voir figure 6a). Dans ce travail, elle est définie comme suit : à chaque instant suivant l'éclatement, le maximum de la densité de pixels de l'image est calculé. C'est-à-dire que pour chaque image, le nombre de pixels blancs au-dessus de l'interface libre est compté ligne par ligne. L'indice de la ligne contenant le plus de pixels correspond à une hauteur en pixels, la référence étant le bas de l'image. La différence entre cette hauteur et  $H_r$  est utilisée comme hauteur de projection. La figure 6b illustre cette définition.

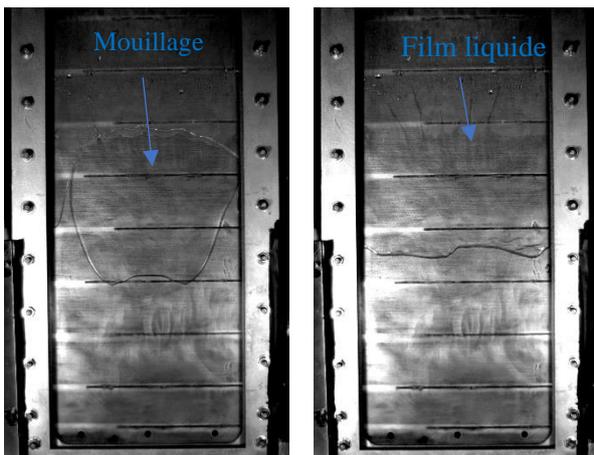


Figure 6a : Illustration du film liquide

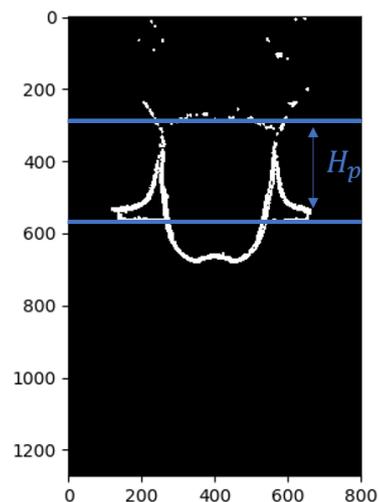


Figure 6b : Définition de la hauteur de projection

Bien que les contours détectés par le programme soient probablement ceux en contact avec la plaque de PMMA, nous admettrons dans cette étude que la hauteur de projection et la surface apparente calculées sont proches de celles en contact avec la plaque d'acier inoxydable.

### 3.3. Validation

Afin de vérifier le bon fonctionnement du programme, la surface apparente est calculée « manuellement » à différents instants pour plusieurs vidéos prises au hasard. Ce calcul manuel est réalisé à l'aide du logiciel ImageJ. Les valeurs ainsi calculées sont ensuite comparées à celles calculées par le programme. A titre d'exemple, la figure 7 montre l'évolution de la surface apparente calculée par le programme en fonction du temps (croissance uniquement) (o) et les valeurs calculées à la main ( $\Delta$ ) pour une vidéo. Cette comparaison a été réalisée pour 7 vidéos différentes.

Pour chacune de ces vidéos, un écart est calculé entre la valeur mesurée par ImageJ et la valeur calculée par le programme :  $e = \frac{\text{valeur programme} - \text{valeur imageJ}}{\text{valeur imageJ}}$ . La moyenne des écarts pour toutes les valeurs comparées donnera une information sur la précision du programme (les petites surfaces ne sont pas prises en compte car l'étude porte sur les derniers instants). Ce calcul permet d'aboutir à un écart moyen de 16%.

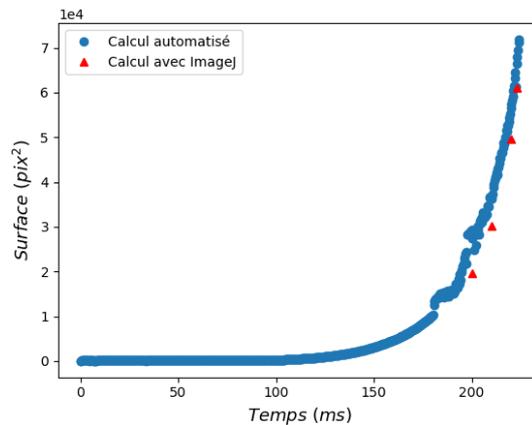


Figure 7 : Calcul automatique et par ImageJ de la surface d'une bulle prise au hasard

## 4. Influence de la croissance sur la hauteur projetée

### 4.1. Données de croissance considérées

Pour caractériser la dynamique de croissance avant éclatement et établir un lien avec la hauteur de projection, on considère en particulier deux paramètres, calculés pour chaque vidéo :

- La taille de la bulle à l'instant précédant l'éclatement, soit la surface apparente maximale mesurée lors de la croissance :  $S_{max}$
- La vitesse de croissance au moment de l'éclatement :  $U_f = \left(\frac{dS}{dt}\right)_{t=t_{\text{éclatement}}}$

### 4.2. Cas simple (sans perturbation d'interface)

Comme mentionné précédemment, les conditions d'ébullition dans l'évaporateur sont telles que les bulles créées peuvent avoir des formes très atypiques. En plus de ces formes atypiques, des perturbations et instabilités – probablement provoquées par le concours d'un certain nombre d'autres paramètres (confinement, surchauffe, hydrodynamique...) – au niveau de l'interface liquide/bulle peuvent être observées [7]. C'est pourquoi, dans un premier temps, l'étude a été limitée aux vidéos pour lesquelles l'interface de la bulle ne subit pas de perturbations. Sur les 200 vidéos disponibles, 60 contiennent ce type de bulles que nous appellerons par la suite

« conventionnelles », c'est à dire sans perturbations, et dont le programme a réussi à extraire les données.

Les résultats obtenus sont illustrés sur la figure 8. La hauteur de projection  $H_p$  y est tracée en fonction de la surface apparente maximale de la bulle  $S_{max}$  et de la vitesse avant éclatement  $U_f$ .

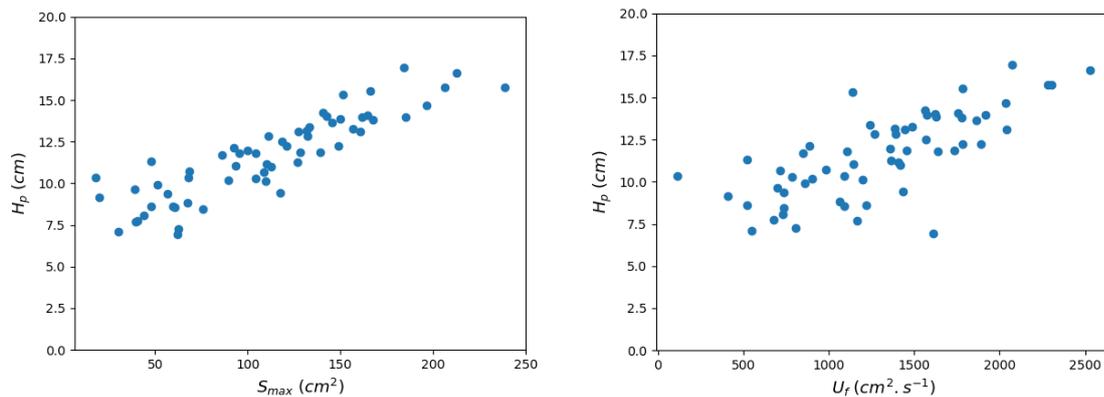


Figure 8 : Hauteur de projection en fonction de la surface apparente avant éclatement (gauche) et de la vitesse de croissance avant éclatement (droite). Cas sans perturbation de l'interface

Une corrélation est observée dans les deux cas. Autrement dit, plus la surface apparente avant éclatement est grande, plus la hauteur des gouttelettes projetées est importante. De même, plus la vitesse de croissance de la bulle est grande au moment de l'éclatement, plus la hauteur de projection est importante. Cela peut s'expliquer par le fait que l'interface entre la bulle et le liquide – qui fusionne avec l'interface libre au moment de l'éclatement – se transforme en gouttelettes lors de la rupture. L'énergie cinétique acquise par l'interface lors de la croissance est alors transmise aux gouttelettes.

### 4.3. Cas avec perturbations

Le traitement de toutes les vidéos disponibles (avec et sans perturbation de l'interface) a permis de rassembler un total de 146 vidéos exploitables, les vidéos restantes n'ayant pas pu être traitées par le programme. La même analyse sur ces vidéos montre une tendance similaire : on observe toujours sur la figure 9 une dépendance de la hauteur de projection à la surface apparente maximale et à la vitesse d'éclatement.

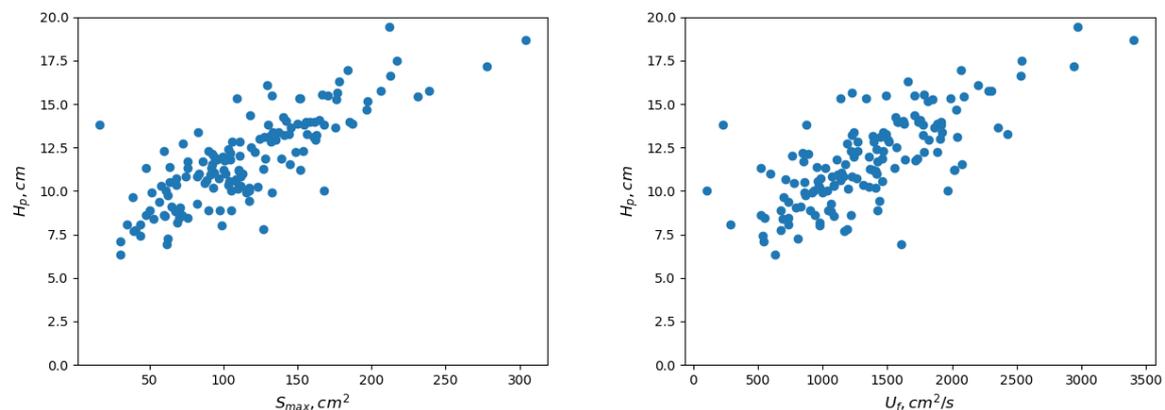


Figure 9 : Hauteur projetée en fonction de la surface apparente avant éclatement (gauche) et de la vitesse de croissance avant éclatement (droite). Cas général (avec et sans perturbations)

## 5. Conclusion

Des vidéos de croissance de bulles de vapeur d'eau dans un évaporateur fonctionnant à des pressions proches du point triple ont été traitées et analysées afin de caractériser la formation d'un film liquide par la dynamique de croissance et d'éclatement des bulles. Cette caractérisation, qui passe par la définition et l'étude de la hauteur de projection  $H_p$ , est supposée porter l'information principale de la formation de ce film.

Il a été mis en évidence que le paramètre  $H_p$  est corrélé d'une part à la surface apparente maximale de la bulle et d'autre part à sa vitesse de croissance avant éclatement. Les corrélations ont été obtenues dans le cas où l'interface entre la bulle et le liquide est perturbée et non perturbée. Ainsi, la dépendance de la hauteur de projection aux paramètres de croissance a pu être mise en évidence. Il s'agit alors pour la suite de déterminer l'impact des propriétés thermophysiques du fluide et autres conditions de croissance sur ces paramètres. De cette étude découlera un potentiel modèle de prédiction du paramètre  $H_p$ .

## 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. & Tremeac, B. Influences of confinement on subatmospheric water vaporization phenomena in a vertical rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 145 (2019), 118725.