

# Caractérisation expérimentale de l'influence de l'ébullition sur les transferts de chaleur et de masse au travers d'un film tombant d'eau dans un évaporateur à plaque verticale rainurée par imagerie rapide

Romain COLLIGNON<sup>1\*</sup>, Florine GIRAUD<sup>1</sup>, Joris MAREK<sup>1</sup>, Benoît STUTZ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire procédés énergie bâtiment (LOCIE), Université Savoie Mont Blanc, CNRS UMR 5271 Savoie Technolac, 73376 Le Bourget Du Lac

\*(auteur correspondant : romain.collignon@univ-smb.fr)

**Résumé** - De par sa forte capacité thermique, sa forte chaleur latente de vaporisation et son innocuité sur l'environnement, l'eau représente un bon fluide de substitution à de nombreux fluides frigorigènes utilisés pour la production de froid positif. Les machines à sorptions sont aujourd'hui les principaux systèmes où ce fluide est utilisé. Ces machines à absorption utilisent majoritairement des échangeurs à films tombants pour opérer les transferts couplés de masse et de chaleur compte tenu de leurs performances, permettant ainsi de travailler avec de faibles débits de fonctionnement et de limiter les surchauffes de fonctionnement. Les échangeurs tubulaires sont majoritairement utilisés dans ces machines, en particulier au niveau de l'évaporateur, compte tenu des très faibles pressions qui y règnent, conduisant à des systèmes volumineux et des coûts de fabrication onéreux. De nombreux efforts de recherche doivent encore être fournis pour améliorer leur compacité et réduire les coûts de fabrication. La présente étude s'intéresse aux alternatives offertes par les échangeurs à plaques et films ruisselants. Si les transferts évaporatifs commencent à être mieux appréhendés [1], l'ébullition qui peut s'y développer est encore mal comprise. L'étude s'intéresse ici aux mécanismes d'ébullition en présence de films fins d'eau pure, saturés, ruisselant sur une plaque plane rainurée verticale. La plaque est chauffée à l'aide d'un fluide secondaire. Différents phénomènes d'ébullition ont été observés à l'aide d'une caméra rapide dans des gammes de fonctionnement typique des systèmes de rafraîchissement. Afin d'identifier et de caractériser les régimes d'ébullition, un algorithme de détection et de suivi des bulles a été développé. A l'aide des informations tirées des vidéos, l'évolution du volume de vapeur encapsulé dans les bulles est étudié. Les résultats suggèrent une importance significative de la ligne triple de contact dans les mécanismes de changement de phase dans le cadre de l'ébullition. Les résultats de cette étude sont discutés et les perspectives de recherche à ce sujet sont introduites.

## Nomenclature

$\Gamma$	Débit volumique par unité de largeur, m <sup>2</sup> /s	$P_{th}$	Puissance, W
$\nu$	Viscosité cinématique, m <sup>2</sup> /s	$P_e$	Périmètre d'une forme, m
$A_i$	Aire d'une forme, m <sup>2</sup>	$r$	Rayon d'une forme, m
$C_i$	Coefficient de circularité	$Re$	Nombre de Reynolds
$C_p$	Capacité thermique massique, J/kg/K	$T$	Température, K
$\dot{m}$	Débit massique, kg/s	$V$	Volume d'une forme, m <sup>3</sup>
$P$	Pression, Pa		

# 1. Introduction

Depuis de nombreuses années, une augmentation drastique de la demande d'énergie a été observée dans le monde entier malgré un besoin alarmant de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO<sub>2</sub> [2]. Dans les années à venir, la demande énergétique va encore augmenter. Pour subvenir à ces besoins, les systèmes à sorption H<sub>2</sub>O/LiBr apparaissent comme une solution prometteuse capable de valoriser l'énergie thermique perdue à un faible coût [3], et de travailler avec de l'eau, une ressource abondante dont le potentiel de réchauffement climatique est nul. Les promoteurs de transfert dans les machines à sorption sont généralement des échangeurs à film tombant, utilisés pour leur flexibilité et leur grande capacité de transfert de chaleur et de masse.

L'utilisation de l'eau comme fluide frigorigène présente le lourd inconvénient de devoir fonctionner à très basse pression (environ 1 kPa). À cette pression, le comportement des systèmes est radicalement affecté en raison de la très faible masse volumique de vapeur qui affecte la taille des bulles et leur taux de croissance. Malgré un fort intérêt de la communauté pour la compréhension du fonctionnement interne du transfert de chaleur et de masse dans les films liquides tombants, le manque de connaissances scientifiques sur ces transferts à basse pression conduit à des systèmes conçus de manière empirique. Que ce soit sur le plan théorique [4] ou expérimental [5], la littérature concernant l'échelle des composants des systèmes de sorption reste rare et des connaissances supplémentaires sur le comportement des flux à l'intérieur des échangeurs à films tombants sont nécessaires. Les évaporateurs à film tombant sur une plaque plane présentent des inconvénients importants sous la forme d'une distribution difficile du fluide et d'importants effets de tension superficielle qui conduisent souvent à l'apparition de zones sèches à la surface de l'échangeur, entraînant une diminution drastique des performances. Dans une étude cherchant à lever ces limitations, Michel et al. [6] ont conçu une plaque rainurée afin d'assurer un mouillage complet de la surface d'échange, même à très faible débit. L'ajout d'ailettes entre lesquelles circule le film a permis de créer de nouvelles lignes de contact assurant que chaque flux ne s'interrompt jamais. Cette étude a montré une amélioration significative par rapport à une plaque plate classique dans les expériences.

La présente étude s'inscrit dans la continuité des travaux de Michel et al. [6]. La même plaque rainurée est étudiée dans les conditions représentatives des conditions rencontrées dans un évaporateur. Sous certaines conditions, de l'ébullition peut se produire à la surface du film liquide parcourant l'échangeur. Une caméra rapide a été utilisée afin de capturer des vidéos des phénomènes se produisant sur la surface de plaque rainurée. Afin d'extraire des données quantifiées des vidéos, un algorithme de détection et de suivi a été développé. Les résultats préliminaires de l'étude sont présentés et des pistes d'explication de la physique en jeu sont discutées.

## 2. Dispositif expérimental

### 2.1. Description du système

Le dispositif expérimental étudié dans le présent article est présenté dans la Figure 1. Le système est contenu dans un réservoir basse pression dans lequel se trouvent l'évaporateur à film tombant et un condenseur hélicoïdal. Ce réservoir est un cylindre en acier inoxydable de 650 mm de long et de 650 mm de diamètre. Celui-ci est placé à l'horizontal et deux portes étanches ferment le volume. Dans les portes se trouvent des hublots de 250 mm de diamètre permettant un accès optique à l'intérieur de l'enceinte. Des accès équipés de raccords de type

ISO-KF permettent de connecter les réservoirs et bains thermostatés aux circuits hydraulique et d'évacuer les incondensables de l'enceinte.

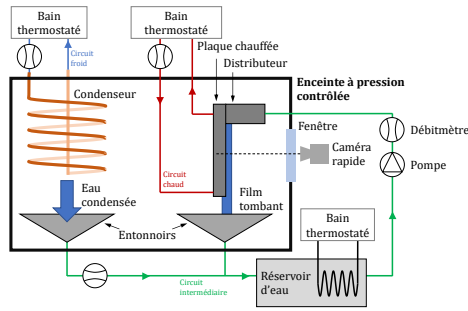


Figure 1 : Schéma de l'évaporateur à film tombant à pression contrôlée.

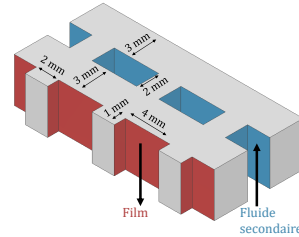


Figure 2 : Vue de coupe de l'échangeur à plaque. Le film tombe dans les canaux à surface libre (en rouge) et le fluide secondaire s'écoule à contre courant dans les veines fermées (en bleu).

L'évaporateur étudié est une plaque d'aluminium cannelée de 100 mm de large et 250 mm de haut, dont une vue de coupe est présentée sur la Figure 2. La surface extérieure sur laquelle s'écoule le film est discrétisée en 16 rainures de 4 mm de large séparés par des ailettes de 2 mm de large. Au sommet de cette plaque se trouve un distributeur fabriqué par impression 3D utilisé pour distribuer de manière homogène le liquide dans l'ensemble des canaux. Le fluide secondaire (de l'eau glycolée) s'écoule, à contre-courant du film, dans des canaux rectangulaires placés en vis-à-vis des rainures.

Dans ce système expérimental, le liquide de travail (de l'eau distillée dégazée) s'écoule dans le distributeur et tombe dans les 16 rainures. Au cours de sa chute, une partie du film s'évapore, à la fois par évaporation et par ébullition, et est condensée à la surface de condenseur hélicoïdal. Le film liquide restant ainsi que l'eau condensée sont collectés à l'aide de deux entonnoirs et s'écoule vers le réservoir d'eau, dont la température est contrôlée. L'écoulement du film liquide est décrit par le nombre de Reynolds, défini par :

$$Re = \frac{\Gamma}{\nu} \quad (1)$$

où  $\Gamma$  est le débit volumique par unité de largeur de canal mouillé et  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide.

Trois bains thermostatés sont utilisés pour contrôler respectivement la température d'entrée du film liquide, du fluide secondaire et du liquide circulant dans le condenseur. La pression dans l'enceinte est contrôlée par la température fixée au condenseur, de sorte que la pression dans l'enceinte  $P_{sys}$  soit proche de la pression de saturation  $P_{sat}$  de l'eau à la température du condenseur  $T_{cd}$  :

$$P_{sys} \approx P_{sat}(T_{cd}) \quad (2)$$

## 2.2. Mesures et incertitudes

La pression dans l'enceinte est mesurée par une sonde de pression en céramique (PFEIFFER VACCUM CMR 362) de précision  $\pm 0.2\%$  de la valeur mesurée. Le débit massique de chaque fluide est suivi par des débitmètres à effet Coriolis (MICRO-MOTION F025) de précision  $\pm 0.1\%$ . Des sondes de température PT-100 sont utilisées pour mesurer les températures des

fluides à chaque entrées et sorties des éléments du dispositif, avec une précision de  $\pm 0.1^\circ\text{C}$ . Les mesures ont été prises à une fréquence de 0.05 Hz et sont intégrées pendant 20 minutes (c-à-d moyennées sur 60 points), ce qui a pour effet de réduire l'ensemble des erreurs aléatoires de mesure par un facteur  $\sqrt{60}$ .

### 2.3. Détection et suivi des bulles

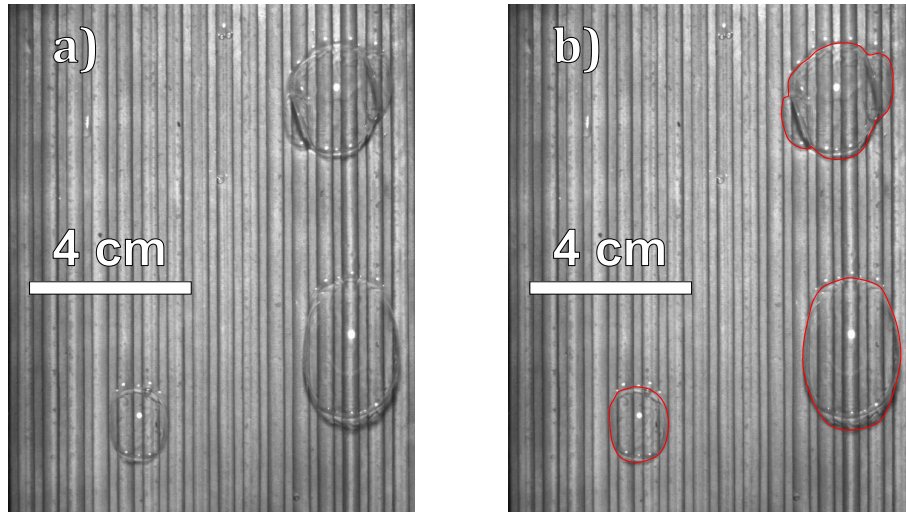


Figure 3 : Exemple d'image de bulles de vapeur à la surface du film fluide dans l'évaporateur (a) et identification des bords de ces bulles par l'algorithme de suivi (b).

Une caméra rapide est placée face au hublot. Cet arrangement permet de visualiser les phénomènes d'ébullition, lorsque ceux-ci ont lieu, et de suivre l'évolution et l'écoulement des bulles de vapeur par des vidéos de résolution 640 par 920 pixels à une fréquence de 250 Hz. Un exemple d'image de bulles de vapeur est présenté sur la Figure 3.a. Pour permettre une détection et un suivi automatisé des bulles observées dans et sur le film, un algorithme maison a été développé sur Matlab. Différentes étapes de traitement sont effectuées sur les images d'une vidéo :

- Construction de l'image de référence obtenue en moyennant l'ensemble des images d'une vidéo. Cette image sert de référence et est soustraite à toutes les autres images par la suite.
- Création d'un masque basé sur le seuil d'intensité de l'image, seuil fixé à 95% de la valeur moyenne des pixels de l'image. Ce masque a tendance à détecter préférentiellement l'interface des bulles dans le sens horizontal de l'image (sur la gauche et la droite des bulles).
- Création d'un masque basé sur les gradients d'intensité de l'image. L'opérateur gradient est appliqué à l'image, un gain est appliqué à l'opérateur de sorte à saturer la réponse du gradient soit à 0 soit à 1. Ce masque a tendance à détecter préférentiellement l'interface des bulles dans la direction verticale de l'image (en haut et en bas des bulles).
- Calcul de la somme des deux masques.
- Application d'un algorithme de fermeture morphologique basé sur un élément circulaire. Cette étape sert à fermer les éléments ouverts résultant de la sommation des masques. Les éléments fermés sont ensuite remplis.
- Application d'un algorithme d'érosion morphologique. Cette étape permet de réduire la taille des éléments fermés du masque que l'algorithme de fermeture aura fait grandir. A

cette étape, les bords des éléments fermés coïncident avec l'interface des bulles de vapeur avec une précision de l'ordre du pixel.

A cette étape, un masque binaire est créé pour chaque image d'une vidéo. Un exemple est présenté sur la Figure 3.b. Dans cet exemple, il est observé que l'agglomérat de bulles en haut à droite de l'image est considéré comme un seul objet par l'algorithme de détection. Par ailleurs, il est possible que des artefacts de mesure et de traitement, généralement de forme rectangulaire, soient détectés comme des bulles. Afin de discriminer les artefacts des bulles, une fois la détection des interfaces effectuée, la circularité  $C_i$  des objets est introduite :

$$C_i = \frac{4 A_i \pi}{P_i^2} \quad (3)$$

avec  $A$  et  $P$  respectivement l'aire et le périmètre d'un objet de l'image binaire. Le paramètre de circularité  $C_i$  est égal à 1 lorsque l'objet considéré est parfaitement circulaire et tend vers 0 lorsque la forme s'éloigne du cercle. Lorsque la circularité d'un objet est trop faible, l'objet est rejeté. Le seuil a été fixé arbitrairement à 0.4. Il est important de noter que chaque élément (i.e. bulle détectée) du masque binaire en contact avec le bord de l'image est ignoré car il est impossible de déterminer la portion et la forme de l'objet qui se trouve en dehors de la fenêtre d'observation. Enfin, un algorithme de tracking basé sur un filtre de Kalman a été développé pour suivre l'apparition et le transport des bulles dans les vidéos. Ainsi, dans chaque vidéo, les informations sur la position et la taille de chaque bulle sont connues et suivies au cours du temps.

### 3. Résultats

L'influence de la pression à l'intérieur de l'enceinte sur l'ébullition du film est étudiée. Pour cela, plusieurs niveaux de pression ont été choisis : 1.7 kPa, 2.0 kPa, 2.4 kPa et 3.2 kPa. Ces niveaux de pression correspondent à des températures de saturation de l'eau de respectivement 15°C, 17.5°C, 20°C et 25°C. Le circuit d'eau est chauffé de sorte à ce que le film liquide sorte du distributeur à sa température de saturation. Pour chacune des expériences, la température théorique maximale de surchauffe  $\Delta T_{max}$  est calculée comme la différence entre la température d'entrée du film  $T_{sat}$  et la température d'entrée du fluide secondaire  $T_{sec}$  :

$$\Delta T_{max} = T_{sec} - T_{sat}. \quad (4)$$

Pour chaque niveau de pression, la température de surchauffe  $\Delta T_{max}$  est modulée entre 2 K et 14 K par incréments de 2 K. Un régime d'ébullition plus intense peut se déclencher aux plus hautes surchauffes. Lorsque cela se produit, les mesures correspondantes sont exclues de l'étude. Enfin, l'ensemble des débits massiques dans les circuits sont maintenus constant avec le débit au condenseur de 0.28 kg/s et le débit de fluide secondaire à l'évaporateur de 0.025 kg/s ( $Re \approx 380$ ). Dans le cas du film liquide, le débit est initialement fixé au maximum admissible par le système (autour de 0.06 kg/s) afin de mouiller l'ensemble de la plaque, puis est ensuite fixé à 0.008 kg/s ( $Re \approx 200$ ) pour les expériences.

#### 3.1. Bilan d'énergie du système

Grâce à l'instrumentation du système, il est possible d'effectuer indépendamment des bilans d'énergie sur chaque élément. Dans le cadre de cette étude, on s'intéressera à comparer l'énergie qui a été prélevée au fluide secondaire (que l'on cherche à refroidir dans les applications) avec l'énergie gagnée par le film. Pour chaque circuit, la puissance  $P_{th}$  absorbée/prélevée par le fluide

$i$  s'écrit comme :

$$P_{th,i} = \dot{m}_i C_{p_i} (|T_{i,s} - T_{i,e}|) \quad (5)$$

avec  $\dot{m}_i$  le débit massique du fluide  $i$ ,  $C_{p_i}$  sa capacité thermique massique et  $T_{i,s}$  et  $T_{i,e}$  respectivement les températures de sortie et d'entrée de l'élément considéré. La puissance  $P_{th}$  définie de cette manière est toujours positive.

L'évolution de la puissance absorbée par le film  $P_{film}$  est comparée à la puissance perdue au fluide secondaire  $P_{sec}$  sur la Figure 4.a pour les différentes pressions étudiées. Sur le graphique, les plus grandes valeurs de puissances prélevées correspondent à des surchauffes  $\Delta T_{max}$  plus élevées, au sein de chaque série de mesure. Il semblerait que pour des pressions plus élevées (i.e. pour les températures de saturation plus élevées), la puissance absorbée par le film sous forme de chaleur sensible soit plus faible que pour les pressions plus faibles. Toutefois il est difficile de distinguer une tendance nette, les résultats s'apparentant à un nuage de points.

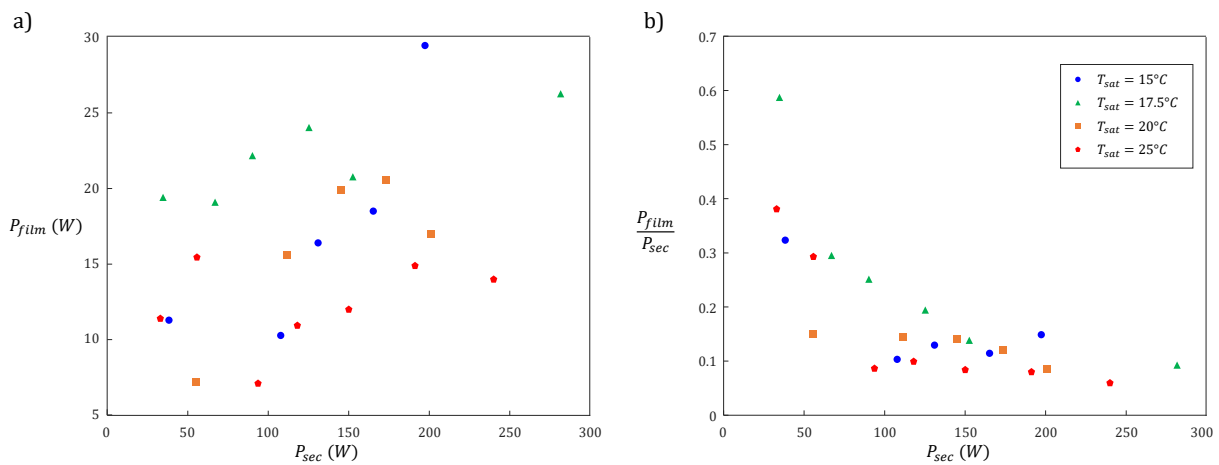


Figure 4 : (a) Évolutions des puissances échangées en valeur absolue, (b) Évolution de la puissance échangée par chaleur sensible par rapport à la puissance thermique totale transmise au film en fonction de la température imposée au fluide secondaire, pour plusieurs pressions de fonctionnement

Afin de distinguer la part de la puissance transférée au film sous forme de chaleur sensible et la part liée au changement de phase (évaporation + ébullition), la puissance liée à la chaleur sensible du film a été normalisée par la puissance totale prélevée au fluide secondaire sur la Figure 4.b. Suite à cette normalisation, il semblerait que la distribution du flux sous forme sensible ou latente soit faiblement dépendante de la pression du système. On observe cependant une influence importante de la surchauffe du système sur le taux de changement de phase du film d'eau : plus celle-ci est importante et plus la part du transfert par chaleur sensible est faible. Cette observation tend à aller dans le sens de l'observation où l'ébullition est d'autant plus intense que la surchauffe est forte.

### 3.2. Évaporation d'une bulle au cours du temps

Le code de détection et de suivi des bulles permet de déterminer l'évolution de la taille des bulles de vapeur au cours du temps. L'angle de contact de la ligne triple solide/liquide/vapeur sur la paroi en aluminium est de  $90^\circ$ , on considérera alors que les bulles de vapeur sont des demi-sphères. En supposant que la bulle est posée à la surface du film et de la plaque, le volume

de vapeur  $V_{vap}$  encapsulé dans une bulle de rayon  $r$  s'écrit :

$$V_{vap} = \frac{2}{3} \pi r^3. \quad (6)$$

Sous certaines conditions de fonctionnement ( $\Delta T_{max}$  compris entre 7 K et 9 K), des bulles de vapeur de diamètre croissant dans le temps et l'espace se forment. Un premier résultat issu de l'étude préliminaire de la croissance d'une seule bulle de vapeur est présenté sur la Figure 5. Son volume croit avec le temps au cube, ce qui correspond aux observations typique d'ébullition en vase [7]. Cette observation tend à suggérer que le transfert se fait au travers d'une interface qui varie linéairement avec à la fois le temps et le volume de la bulle. En considérant que le flux de chaleur transféré à travers la plaque est uniforme dans l'espace, la seule interface répondant à ces critères est la ligne triple de contact de la bulle. Ainsi, le changement de phase de la surface libre du film semble avoir principalement lieu à cette ligne triple, comme le suggérait une précédente étude des auteurs [1].

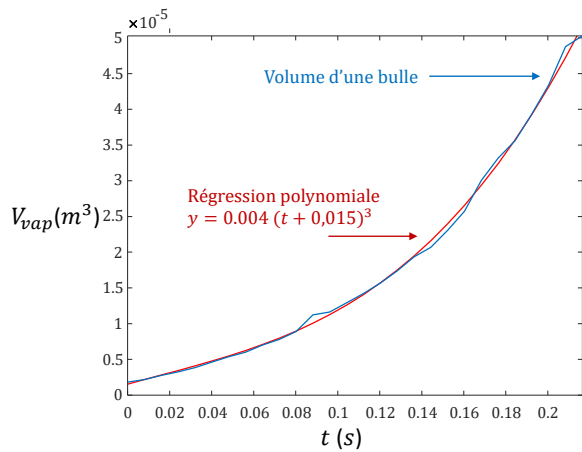


Figure 5 : Évolution temporelle du volume d'une bulle isolée lorsque celle-ci croît au cours de son écoulement ( $P_{sys} = 30 \text{ mbar}$  et  $\Delta T_{max} = 7 \text{ K}$ ).

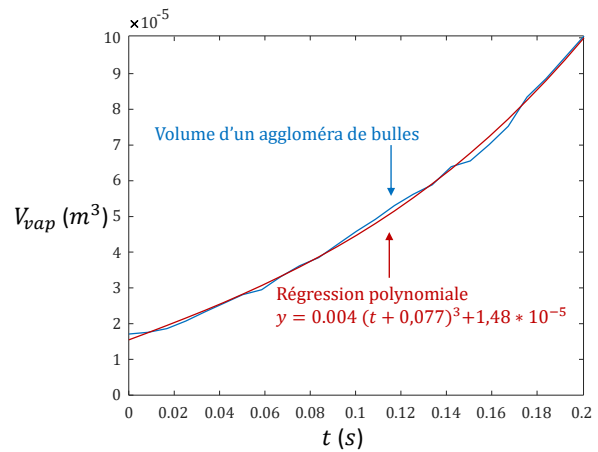


Figure 6 : Évolution temporelle du volume d'un aggloméra de bulles lorsque celui-ci croît au cours de son écoulement ( $P_{sys} = 30 \text{ mbar}$  et  $\Delta T_{max} = 7 \text{ K}$ ).

Lorsqu'elles s'écoulent, les bulles de vapeurs peuvent se rejoindre, s'agglomérer et continuer de croître. Ces bulles restent cependant distinctes et une membrane liquide les sépare (Figure 3). Le code de détection les considère comme un seul et même objet. Dans la même vidéo que celle où la bulle de la Figure 5 a été observée, l'évolution du volume d'un agglomérat est représentée sur la Figure 6. Étonnamment, cette évolution est aussi au cube du temps et le polynôme obtenu par régression linéaire pour estimer la croissance a le même coefficient pour les deux configurations. Dans les deux cas, la valeur à l'origine est négligée car la taille des bulles est variable au moment où celles-ci rentre dans l'image. Cette observation tend à aller dans le sens de l'hypothèse du transfert ayant lieu de manière dominante à la ligne triple de contact.

#### 4. Conclusion

Cet article présente les résultats préliminaires d'une étude expérimentale d'un film tombant à la surface échangeur évaporateur à plaques chauffé à l'autre face par un fluide secondaire à

contre-courant. Les expériences ont été menées dans une enceinte à très basse pression pour évaluer les performances de l'évaporateur en conditions stationnaires. Cette étude s'est intéressée à un évaporateur particulier de 250 mm de long et 100 mm de large, discrétisé en 16 canaux de 4 mm de large et séparé par des ailettes de 2 mm). Le système permet d'étudier une vaste gamme de conditions de fonctionnement (pression, débits, températures). Pour quantifier la part de l'évaporation dans le flux de chaleur transféré au film, des bilans de puissance ont été effectués sur les éléments du système. Les résultats tendent à montrer que la pression dans l'enceinte joue un faible rôle dans la distribution du flux entre chaleur latente et chaleur sensible mais que la surchauffe appliquée au film liquide y joue un fort rôle. Un code a été développé afin de détecter et suivre les bulles de vapeur qui se forment à la surface du film, détectées à l'aide d'une caméra haute fréquence. Les résultats préliminaires issus de cet outils tendent à montrer que le transfert de masse a préférentiellement lieu à la ligne triple de contact entre le film, la paroi et la bulle. De plus, les résultats montrent qu'une bulle isolée et qu'un agglomérat de bulle (vu comme un unique objet) ont une croissance au cours du temps similaire. Les données obtenues à l'aide du code de détection doivent être encore travaillées afin d'obtenir la puissance instantanée absorbée par les bulles et de quantifier la part du flux évaporatif et celle du flux dû à l'ébullition. Cette étape pose de grandes difficultés car il est impossible de déterminer si de l'ébullition a lieu en dehors de la fenêtre observable ni même de quantifier son intensité.

## Références

- [1] R. Collignon, B. Stutz, Numerical simulation and modeling of the heat and mass transfer in a grooved flat falling film evaporator, *International Journal of Refrigeration*, (2022).
- [2] GIEC, Impacts, Adaptation and Vulnerability - Summary for Policymakers, (2022).
- [3] A. Altamirano, B. Stutz, N. Le Pierrès, Review of small-capacity single-stage continuous absorption systems operating on binary working fluids for cooling : Compact exchanger technologies, *International Journal of Refrigeration*, 114 (2020), 118-147.
- [4] N. Cellier, C. Ruyer-Quil, A new family of reduced models for non-isothermal falling films, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 154 (2020), 119700.
- [5] R. Collignon, O. Caballina, F. Lemoine, G. Castanet, Simultaneous temperature and thickness measurements of falling liquid films by laser-induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, 63 (2022), 68.
- [6] B. Michel, N. Le Pierrès, B. Stutz, Performances of grooved plates falling film absorber, *Energy*, 138 (2017), 103-117.
- [7] S.J.D. van Stralen, R. Cole, W.M. Sluyter, M.S. Sohal, Bubble growth rates in nucleate boiling of water at subatmospheric pressures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 18 (1975), 655-669.

## Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du projet FRAISE (Film Ruisselants à Instabilités de Surface : Exploration, AAP-2016).