

# Étude expérimentale de l'ébullition en vase de l'eau en site unique : effet de la pression depuis la pression atmosphérique jusqu'aux très faibles pressions.

Sandra MICHAIE, Romuald RULLIÈRE\*, Jocelyn BONJOUR

Univ Lyon, CNRS, INSA-Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CETHIL UMR5008, F-69621, Villeurbanne, France

\*(auteur correspondant : romuald.rulliere@insa-lyon.fr)

**Résumé** - Du fait de l'influence non négligeable de la pression statique induite par la hauteur de liquide, l'ébullition en vase à basse pression présente des caractéristiques très différentes de celles observées à pression atmosphérique. Le milieu au sein duquel se forment les bulles de vapeur ne peut en effet pas être considéré homogène en pression ou en sous-refroidissement ni – dès lors – en termes de propriétés thermophysiques. L'objectif de cette étude est de visualiser et de quantifier l'influence de la pression sur la dynamique de bulles pour de l'eau depuis la pression atmosphérique jusqu'à la très basse pression.

## Nomenclature

$f$	fréquence de détachement des bulles, Hz	<i>Symboles grecs</i>	
$g$	accélération de la pesanteur, $\text{m.s}^{-2}$	$\rho$	masse volumique, $\text{kg.m}^{-3}$
$H$	hauteur, m	$\tau$	temps de croissance, s
$P$	pression, Pa	$q''$	densité de flux, $\text{W.m}^{-2}$
$P^*$	pression statique, Pa	<i>Indices et exposants</i>	
$t$	temps, s	<i>beginning</i>	à nucléation
$t^*$	temps adimensionné	<i>end</i>	au détachement
$T$	température, °C	$l$	liquide
$V$	Volume instantané, $\text{m}^3$	$m$	maximum
$V^*$	Volume adimensionné	$sat$	saturation
$z$	distance à la surface libre, m	$v$	vapeur
		$wall$	surface d'ébullition

## 1. Introduction

L'ébullition est un mode de transfert de chaleur d'intérêt croissant pour diverses applications. Certaines, à l'image des évaporateurs des machines frigorifiques à sorption, donnent lieu à de l'ébullition à des pressions subatmosphériques. Dans ces conditions, la pression statique n'est pas négligeable devant la pression de vapeur  $P_v$  au-dessus de la surface libre [1]. Dans le milieu où se forment les bulles, la pression varie donc en fonction de la distance à la surface libre  $z$  (surface libre en  $z = 0$ ). En particulier, la pression  $P_{wall}$  au niveau de la paroi chauffée dépend à la fois de la pression de vapeur  $P_v$  et de la hauteur  $H_l$  de la colonne de liquide au-dessus de la paroi chauffée. Le milieu étant inhomogène en pression, la température de saturation  $T_{sat}(z)$  et le sous-refroidissement  $T_{sat}(z) - T_l$  (avec  $T_l = T_{sat}(z = 0) = T_{sat}(P_v)$ ) dépendent aussi de la profondeur  $z$ . De ce fait, les propriétés thermophysiques du fluide présentent de fortes variations qui pourraient expliquer les différences de comportement thermique et hydrodynamique constatées en ébullition en vase entre la pression atmosphérique et la basse pression [1, 2, 3, 4].

Cette étude vise à mieux appréhender l'effet de la pression sur la dynamique de croissance des bulles. Une visualisation par caméra rapide du phénomène sous différentes pressions et une exploitation quantitative des images obtenues sont mises en œuvre dans ce but.

## 2. Dispositif expérimental

Une enceinte cylindrique en acier inoxydable haute de 420 mm et de 200 mm de diamètre intérieur constitue l'élément principal du dispositif expérimental utilisé pour cette étude (Fig. 1a). Quatre hublots circulaires de 100 mm de diamètre répartis sur la surface latérale de l'enceinte sont dédiés à l'observation de l'ébullition tandis qu'une cinquième ouverture à la base de la chambre permet l'insertion de l'élément chauffant. L'enceinte est remplie en fluide grâce à une vanne en partie basse tandis que le niveau de liquide introduit dans l'enceinte est contrôlé à l'aide d'un tuyau transparent relié à la chambre. Une pompe à vide est connectée à une autre vanne en partie haute de l'enceinte pour l'extraction des gaz incondensables contenus dans l'enceinte et le dégazage du fluide. Deux capteurs de pression, de gammes de mesure 0-1 bar et 0-160 mbar respectivement, positionnés au sommet de l'enceinte sont utilisés pour mesurer la pression à l'intérieur de cette dernière. Deux thermocouples de type K placés à deux altitudes différentes dans la chambre servent aux mesures des températures des phases vapeur et liquide. Le fluide dégazé est à saturation. La pression dans la chambre est alors ajustable en y régulant la température ce qui est fait avec un échangeur de chaleur situé dans la double-enveloppe de l'enceinte et relié à un bain thermostaté. Avec ses composants conformes aux normes de la technologie du vide (ISO-K/KF), l'ensemble du dispositif garantit un haut niveau d'étanchéité.

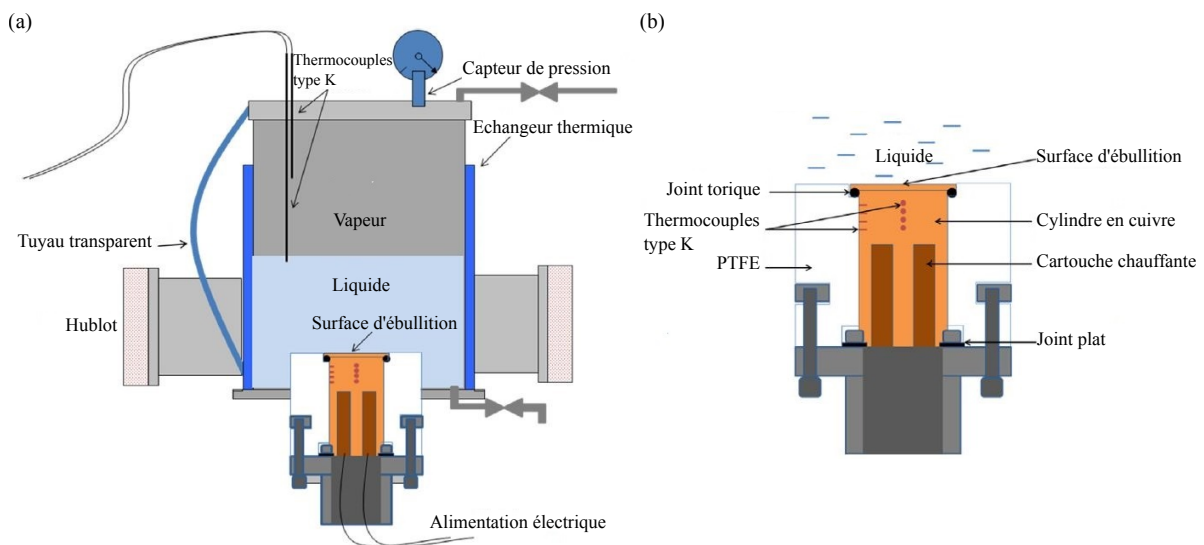


Figure 1 : Dispositif expérimental [1] : (a) Enceinte ; (b) Échantillon.

L'élément chauffant (Fig. 1b) est un bloc de cuivre cylindrique (diamètre : 40 mm, hauteur : 78 mm) surmonté d'une fine ailette polie miroir (épaisseur : 1,5 mm, diamètre : 50 mm). L'ailette – sur laquelle se produit l'ébullition – permet de limiter l'apparition de bulles en périphérie du cylindre et ainsi de favoriser la naissance des bulles au niveau d'un site de nucléation conique créé en son centre (diamètre : 110  $\mu\text{m}$ , profondeur : 70  $\mu\text{m}$ ). Deux cartouches chauffantes de 400 W chacune alimentées électriquement et insérées en bas du bloc imposent le flux de chaleur à l'échantillon. Deux rangées de quatre thermocouples de type K dans le cylindre en cuivre permettent l'évaluation des température et densité de flux instantanées au niveau de la paroi

grâce une méthode inverse 1D. Une pièce en PTFE isole thermiquement le bloc de cuivre et l'ensemble est associé à une bride en acier inoxydable pour la connexion avec l'enceinte. Un joint torique entre l'ailette en cuivre et le PTFE ainsi qu'un joint plat entre le bas de l'assemblage cuivre/PTFE et la bride assurent l'étanchéité à l'air de l'échantillon.

L'échantillon étant inséré dans l'enceinte, la paroi chauffée se trouve dans la zone de visualisation de sorte que l'on peut observer le phénomène d'ébullition par ombroscopie depuis la nucléation jusqu'au détachement et aux premiers instants de l'ascension des bulles. Dans ce but, une caméra rapide (Photron Fastcam 1024 PCI) est placée à proximité d'un hublot pour l'observation à haute vitesse tandis qu'un système d'éclairage LED (Phlox SLLUB white led Backlight 100 x 100) produit une lumière intense et homogène sur le hublot opposé pour éclairer la zone d'ébullition. La fenêtre d'acquisition est choisie la plus grande possible, *i.e.* 1024 x 1024 pixels, tout en assurant une résolution spatiale optimale et une résolution temporelle élevée est obtenue en fixant la fréquence d'acquisition à la valeur maximale permise avec la taille d'image précédemment définie, *i.e.* 1000 images par seconde.

### 3. Conditions expérimentales

La présente étude porte sur l'ébullition en vase de l'eau pure saturée, en orientation horizontale pour une gamme pression de vapeur  $P_v$  allant de la pression atmosphérique à 4,2 kPa. Les quinze niveaux de pression ainsi testés correspondent à des décrets de  $5^\circ\text{C}$  de la température de saturation  $T_{sat}$  de  $100^\circ\text{C}$  à  $30^\circ\text{C}$  (voir Tableau 1). Fixée à  $H_l = 17,3$  cm pour l'ensemble des essais, la hauteur de liquide au-dessus de la paroi chauffée est un paramètre important à des pressions aussi faibles. Une unique valeur de flux imposé  $q''$  au niveau de l'échantillon a été étudiée ( $q'' = 2,7 \text{ W.cm}^{-2}$ ) de sorte à ce que le site de nucléation artificiel soit toujours le seul site actif. Plusieurs vidéos ont été enregistrées pour chaque niveau de pression considéré.

Tableau 1 : Conditions de saturation de l'eau lors des essais.

$T_{sat}$ ( $^\circ\text{C}$ )	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
$P_{sat}$ (kPa)	4,2	5,6	7,4	9,6	12,4	15,8	20,0	25,1	31,2	38,6	47,4	57,9	70,2	84,6	101,4

### 4. Analyse qualitative des vidéos

Quatre comportements différents en termes de forme, taille et fréquence des bulles en fonction de la pression ont été identifiés à l'aide d'une étude qualitative des vidéos (Fig. 2).

Aux plus basses pressions, *i.e.* entre  $P_v = 4,2$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 30^\circ\text{C}$ ) et  $P_v = 15,8$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 55^\circ\text{C}$ ), aucune interaction directe entre bulles successives n'a lieu (Fig. 2a et 2b). La dynamique des bulles est cyclique : une bulle naît et croît sur la paroi avec une forme hémisphérique jusqu'à atteindre une taille centimétrique, puis le diamètre du pied de bulle diminue brusquement aboutissant au détachement de la bulle. Un jet de liquide traverse ensuite la bulle dans les tout premiers instants de son ascension. Enfin, la bulle se recondense rapidement du fait du sous-refroidissement du liquide environnant. Ce cycle reprend à l'issue d'un long temps d'attente qui précède la bulle suivante. Les figures 2(a) et 2(b) indiquent également que le volume et le temps de croissance d'une bulle diminuent significativement lorsque la pression augmente.

À  $P_v = 20,0$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 60^\circ\text{C}$ ), les bulles sont regroupées par paires (Fig. 2c) : une première bulle – similaire à celles décrites à plus basse pression – est rapidement suivie d'une seconde. Aspirée dans le sillage de la précédente, cette seconde bulle a une croissance plus

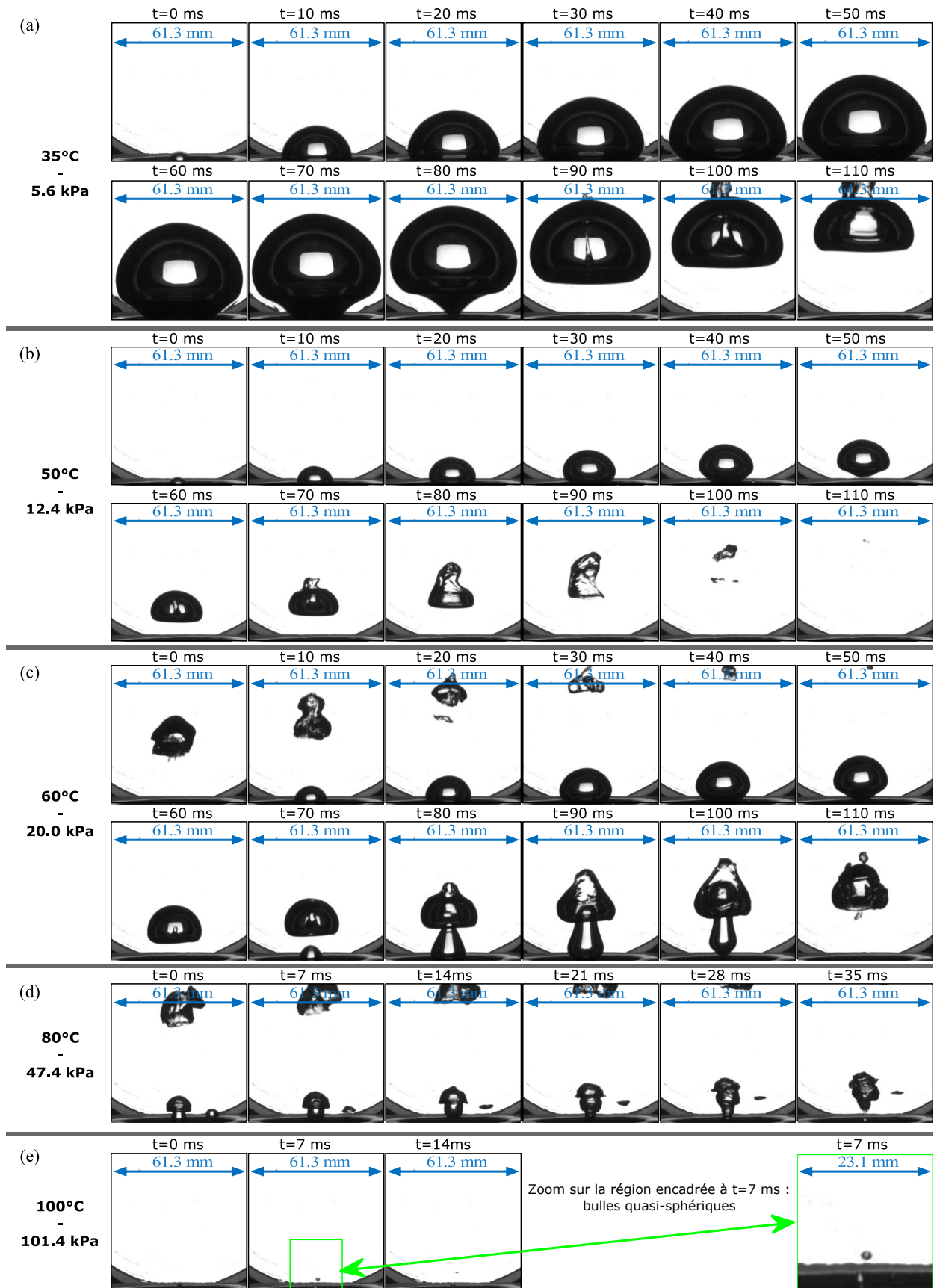


Figure 2 : Évolution des bulles sous différentes conditions opératoires ( $H_l = 17,3\text{ cm}$ ,  $q'' = 2,7\text{ W.cm}^{-2}$ ) : (a)  $P_v = 5,6\text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 35^{\circ}\text{C}$ ); (b)  $P_v = 12,4\text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 50^{\circ}\text{C}$ ); (c)  $P_v = 20,0\text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 60^{\circ}\text{C}$ ); (d)  $P_v = 47,4\text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 80^{\circ}\text{C}$ ); (e)  $P_v = 101,4\text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 100^{\circ}\text{C}$ ).

rapide et un plus grand étirement vertical que celle-ci. Comme précédemment, un jet de liquide traverse la première bulle, la seconde peut alors la rencontrer sans coalescer avec elle : la bulle secondaire passe à travers la bulle primaire conférant ainsi une forme de champignon au couple de bulles. Le temps d'attente entre bulles est encore réduit par rapport aux pressions plus faibles.

Sur la Fig. 2(e), on retrouve la dynamique des bulles associée à l'ébullition à pression atmosphérique : des bulles individuelles très rapprochées, quasi-sphériques et de taille millimétrique.

Dans la gamme des pressions intermédiaires, *i.e.* de  $P_v = 25,1$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 65^\circ\text{C}$ ) à  $P_v = 84,6$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 95^\circ\text{C}$ ), on observe un comportement de transition entre les couples de bulles en forme de champignon et les bulles sphériques individuelles (Fig. 2d) : des groupes successifs de plusieurs bulles forment des colonnes successives de vapeur. Plus la pression augmente, plus les bulles sont petites et plus le nombre de bulles appartenant à une même colonne semble important.

Cette analyse directe des vidéos permet d'affirmer que plus la pression est basse, plus les bulles sont de grande taille et le temps d'attente entre deux bulles successives long. De plus, il a été mis en évidence que selon la pression la forme des bulles change : quasi-sphérique proche de la pression atmosphérique, en forme de sphéroïde aplati aux plus basses pressions et en forme de champignon ou de colonne de vapeur aux pressions intermédiaires. Ceci est globalement en accord avec la littérature sur l'ébullition en vase à basse pression [2, 3]. Cependant, ces remarques restent purement qualitatives et une étude quantitative reste nécessaire pour mieux appréhender le phénomène d'ébullition à des pressions inférieures à la pression atmosphérique.

## 5. Résultats et discussion

### 5.1. Traitement d'images

Dans le but de quantifier leur fréquence de détachement, leur volume instantané ou d'autres caractéristiques des bulles au cours de leur croissance, il est notamment nécessaire de connaître le nombre de bulles enregistrées sur une vidéo, les instants de leur nucléation et de leur départ de la paroi ou encore la position de leur contour.

Un programme MATLAB de traitement d'images a été développé afin de traiter automatiquement les images (une à une) et d'en extraire les données souhaitées. Les contours de la bulle sont identifiés en localisant les forts gradients de gris apparaissant entre un pixel appartenant à la bulle et un pixel voisin situé dans la phase liquide. La recherche de l'interface de la bulle s'effectue en deux étapes : du côté gauche de l'image (« interface gauche ») d'une part et du côté droit de l'image (« interface droite ») d'autre part. Une fois les instants de nucléation et de détachement de la bulle détectés et ses contours localisés entre ces deux moments, sa fréquence ou son volume peuvent être évalués. Une image ne fournissant qu'une description bidimensionnelle, le volume de la bulle est calculé en sommant les volumes élémentaires obtenus en discrétisant cette dernière en tranches d'un pixel d'épaisseur et en faisant l'hypothèse que chaque tranche est axisymétrique (*i.e.* supposée cylindrique).

Les images à analyser présentent des particularités dont il faut tenir compte lors de leur traitement. En effet, la présence d'une zone d'ombre au voisinage de la surface chauffée, de réflexions sur la surface des bulles ou encore des contours du hublot au sein de la région d'intérêt des bulles les plus grandes sont autant de limites que le programme de traitement d'images doit gérer pour pouvoir extraire des données pertinentes sur la dynamique de croissance des bulles. L'outil développé n'a cependant permis de traiter que les vidéos correspondant aux cas allant de  $P_v = 4,2$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 30^\circ\text{C}$ ) à  $P_v = 15,8$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 55^\circ\text{C}$ ) car il n'est pas adapté aux

cas où un contact entre deux bulles se produit alors que l'une d'elles est toujours attachée à la paroi et/ou pour lesquels la fréquence de détachement est telle que le tracé des courbes de croissance est impossible. À  $P_v = 20,0$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 60^\circ\text{C}$ ), les contours des bulles ont pu être localisés manuellement puisque les bulles successives, même en contact, étaient discernables à l'oeil nu (Fig. 2c) : l'interface liquide-vapeur était identifiée en cliquant sur les images successives puis le calcul du volume des bulles et des autres caractéristiques de l'hydrodynamique réalisé avec la même méthode que lors d'un traitement automatique. Finalement, l'étude quantitative de la dynamique de croissance des bulles présentée ci-après se restreint à l'intervalle des pressions s'étendant de  $P_v = 4,2$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 30^\circ\text{C}$ ) à  $P_v = 20,0$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 60^\circ\text{C}$ ).

## 5.2. Influence de la pression sur le temps de croissance d'une bulle

À basse pression, la pression statique  $P^*$  induite par la colonne de liquide au-dessus de la surface d'ébullition n'est pas négligeable devant la pression de saturation de la vapeur  $P_v$ . En effet, au niveau de la paroi chauffée, la pression peut être approchée par :

$$P_{wall} = P_v + P^* \approx P_{sat}(T_{sat}) + \rho_l(T_{sat})gH_l \quad (1)$$

et, pour des pressions comprises entre  $P_v = 4,2$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 30^\circ\text{C}$ ) et  $P_v = 20,0$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 60^\circ\text{C}$ ) avec  $H_l = 17,3$  cm, la pression statique  $P^*$  est de l'ordre de 1,7 kPa.

Le temps de croissance  $\tau$  des bulles est tracé en fonction de la pression de la vapeur  $P_v$  ou de la pression au niveau de la paroi  $P_{wall}$  (*i.e.* en négligeant ou non la pression statique) sur la Fig. 3. On constate à nouveau que la durée de la phase de croissance de la bulle augmente lorsque la pression diminue. À partir des données expérimentales de Van Stralen *et al.* [3], McGillis *et al.* [5] ont établi une corrélation entre la durée de croissance d'une bulle  $\tau$  et la pression de la vapeur  $P_v$  pour de l'eau en ébullition en vase à basse pression :

$$\tau = 0,266P_v^{-0,565} \quad (2)$$

où  $\tau$  est en secondes et  $P_v$  en kilopascals. Les points expérimentaux, bien que dispersés du fait du caractère aléatoire de l'ébullition, semblent être surestimés par cette corrélation (en pointillés sur la Fig. 3). Cela tend à confirmer le fait que l'approche où la pression statique  $P^*$  est négligée n'est pas adaptée à l'étude de l'ébullition en vase sous des pressions subatmosphériques. Par conséquent, une nouvelle corrélation conservant la forme de celle de McGillis est déterminée à partir de nos mesures en considérant maintenant la pression au niveau de la paroi  $P_{wall}$  (trait plein sur la Fig. 3) :

$$\tau = 0,333P_{wall}^{-0,708} \quad (3)$$

où  $\tau$  est toujours en secondes et  $P_{wall}$  en kilopascals. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) présentée par cette nouvelle relation est de 7,34 ms, ce qui est élevé compte tenu de la gamme des valeurs prises par la durée de croissance dans notre série de données ( $\tau$  varie entre 21 et 92 ms). Tester cette nouvelle relation sur les données de Van Stralen *et al.* [3] permettrait de valider davantage cette nouvelle approche mais, la hauteur  $H_l$  de la colonne d'eau au-dessus de la surface d'ébullition lors de leurs essais n'étant pas mentionnée, cela est impossible.

## 5.3. Effet de la pression sur la fréquence de détachement des bulles

À partir du moment où au moins deux bulles sont enregistrées sur une même vidéo, il est possible d'évaluer la fréquence  $f$  de départ des bulles. La Fig. 4 atteste que plus la pression à la paroi est importante, plus la fréquence des bulles est élevée. Pour chaque pression, plusieurs fréquences sont représentées sur la Fig. 4, chacune correspondant à l'exploitation d'une vidéo.

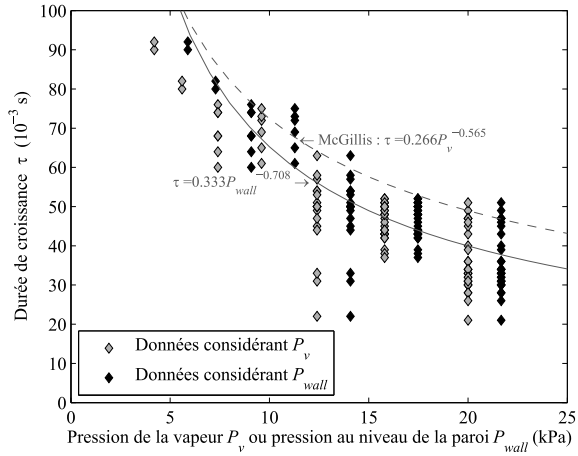


Figure 3 : Dépendance du temps de croissance d'une bulle à la pression, prenant ou non en compte la pression statique.

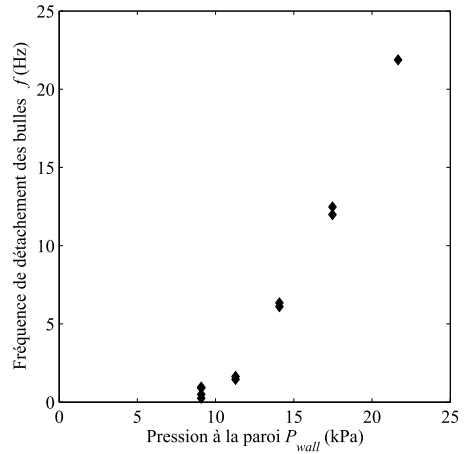


Figure 4 : Dépendance de la fréquence de détachement des bulles à la pression au niveau de la paroi.

## 5.4. Courbes de croissance des bulles

### 5.4.1. Courbes dimensionnées

La croissance d'une bulle est ici étudiée en considérant l'évolution du volume  $V$  : se ramener à l'étude d'un rayon (ou d'un rayon équivalent *i.e.* le rayon de la sphère de même volume) présente en effet moins d'intérêt au vu de la forme particulière prise par les bulles observées.

Une courbe de croissance typique de la basse pression est visible sur la Fig. 5. Cette dernière correspond à une bulle obtenue à  $P_v = 5,6$  kPa ( $T_{sat}(P_v) = 35^\circ\text{C}$ ). La courbe présente un pic entre  $t = 60$  ms et  $t = 70$  ms qui s'explique par les limites du traitement d'image (zone d'ombre et hublot) au moment où le diamètre du pied de bulle diminue brusquement (voir les vignettes correspondantes sur la Fig. 5). La détection automatique du contour de la bulle est temporairement dégradée dans cette région ce qui aboutit à une surestimation du volume pendant ces quelques millisecondes. Malgré la présence de ce pic, on peut voir sur la Fig. 5 que le volume augmente quasi-linéairement avec le temps pendant une grande partie de la croissance de la bulle. De plus, on remarque que le volume diminue déjà un peu avant le détachement : la bulle commence donc à se recondenser avant de quitter la paroi en raison du sous-refroidissement du liquide environnant. La même allure de courbe est obtenue pour tous les niveaux de pression.

### 5.4.2. Courbes adimensionnées

Afin de comparer la croissance des bulles pour plusieurs conditions de pression, les courbes de croissance sont adimensionnées en divisant le volume instantané  $V$  par sa valeur maximale  $V_m$  et le temps par la durée de croissance  $\tau$  (voir système d'équations 4).

$$\begin{cases} V^* &= \frac{V}{V_m} \\ t^* &= \frac{t - t_{beginning}}{t_{end} - t_{beginning}} = \frac{t - t_{beginning}}{\tau} \end{cases} \quad (4)$$

Sur la Fig. 6, les courbes de croissance adimensionnées de cinq bulles représentatives de quatre niveaux de pression ( $P_v = 5,6$  kPa ( $T_{sat} = 35^\circ\text{C}$ ),  $P_v = 7,4$  kPa ( $T_{sat} = 40^\circ\text{C}$ ),  $P_v = 12,4$  kPa ( $T_{sat} = 50^\circ\text{C}$ ) et  $P_v = 20,0$  kPa ( $T_{sat} = 60^\circ\text{C}$ )) sont tracées. De façon remarquable, les courbes obtenues sont très proches les unes des autres bien que les bulles associées présentent

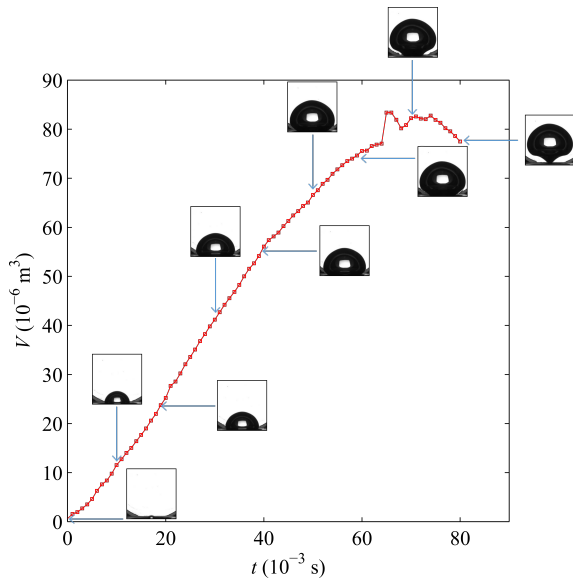


Figure 5 : Courbe de croissance d'une bulle (les données présentées ici ont été obtenues pour  $P_v = 5,6 \text{ kPa}$  ( $T_{sat}(P_v) = 35^\circ\text{C}$ )).

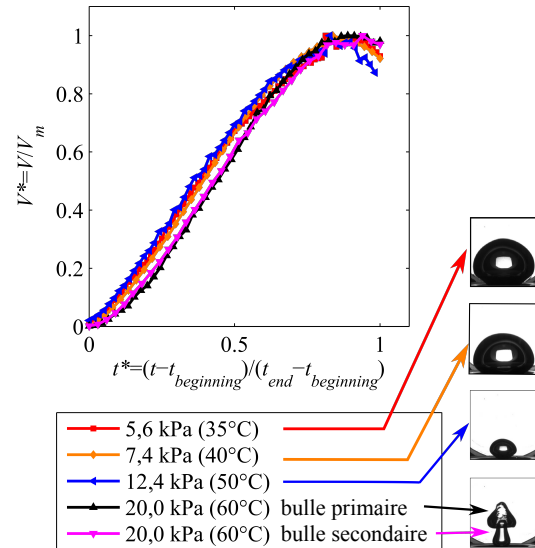


Figure 6 : Courbes de croissance adimensionnées de bulles observées à différents niveaux de pression.

clairement des formes et des tailles très différentes. Ce résultat est particulièrement frappant à  $P_v = 20,0 \text{ kPa}$  ( $T_{sat} = 60^\circ\text{C}$ ) où les courbes adimensionnées de la bulle primaire sphéroïdale et de la bulle secondaire étirée se superposent très bien.

## 6. Conclusion

L'ébullition en vase en site unique a été étudiée sous de faibles pressions pour une hauteur de liquide donnée. Un banc d'essais permettant la visualisation du phénomène d'ébullition par ombroscopie avec une caméra rapide a été utilisé. Un outil de traitement d'images a été développé afin de quantifier certains paramètres de la dynamique de bulles pendant la phase de croissance pour les plus basses pressions atteintes lors des essais. L'importance de la pression statique a été mise en évidence tandis que l'effet de la pression sur le temps de croissance, la fréquence de détachement ou encore le volume des bulles a été analysé. Des essais avec d'autres hauteurs de liquide ou d'autres fluides devront être menés pour caractériser l'influence de ce paramètre et des propriétés thermophysiques sur la dynamique de croissance des bulles à basse pression.

## Références

- [1] F. Giraud, R. Rullière, C. Toublanc, M. Clause, J. Bonjour, Experimental evidence of a new regime for boiling of water at subatmopheric pressure, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **60** 45-53 (2015).
- [2] V. V. Yagov, A. K. Gorodov, D. A. Labuntsov, Experimental study of heat transfer in the boiling of liquids at low pressures under conditions of free motion, *Journal of Engineering Physics*, **18** 421-425 (1970).
- [3] S. J. D. Van Stralen, R. Cole, W. M. Sluyter, M. S. Sohal, Bubble growth rates in nucleate boiling of water at subatmopheric pressures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **18** 655-669 (1975).
- [4] B. Zajackowski, T. Halon, Z. Krolicki, Experimental verification of heat transfer coefficient for nucleate boiling at sub-atmopheric pressure ans small heat fluxes, *Heat and mass Transfer*, **52**, 205-215 (2016)
- [5] W. McGillis, J. S. Fitch, W. R. Hamburgren, V. P. Carey, Pool boiling on small heat dissipating elements in water at subatmopheric pressures, *ASME National Heat Transfer Conference* (1991).