
Etude de l'ébullition : développement d'un capteur micro fabriqué pour le suivi de l'évolution de la température et des échanges de chaleur

Himanshi KHARWAL^{1, a*}
himanshi.kharkwal@femto-st.fr

Magali BARTHES^{1, a*}
magali.barthes@univ-fcomte.fr

Laurent ROBERT^a
laurent.robert@femto-st.fr

Eric GAVIGNET^{2, b}
eric.gavignet@univ-fcomte.fr

Lounès TADRIST^c
lounes.tadrist@univ-amu.fr

François LANZETTA^b
françois.lanzetta@univ-fcomte.fr

⁽¹⁾ IUT de Besançon-Vesoul-Dole, Besançon, France

⁽²⁾ IUT Nord Franche-Comté, Belfort, France

^(a) Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST, Besançon, France

^(b) Université Marie et Louis Pasteur, CNRS, Institut FEMTO-ST, Belfort, France

^(c) Université d'Aix-Marseille, CNRS, IUSTI, Marseille, France

Thèmes – *Énergie - Matériaux* -

Résumé – *L'ébullition (changement d'état liquide-vapeur) est une méthode de transfert de chaleur très efficace et largement utilisée dans les technologies de refroidissement. Cependant, l'étude des échanges de chaleur au cours de la croissance des bulles reste difficile en raison des temps très courts de formation, croissance et détachement des bulles. Dans cette étude, nous présentons un micro-ébulliomètre constitué d'un capteur de flux de chaleur développé par micro-fabrication en salle blanche. Cet ébulliomètre est capable de générer des bulles en un emplacement spécifique et de mesurer simultanément les variations de température en surface à petite échelle. Des expériences préliminaires montrent que l'appareil peut enregistrer les variations cycliques de température provoquées par la formation et la disparition des bulles, ce qui permet d'obtenir des informations sur les processus locaux de transfert de chaleur. Ces résultats montrent le potentiel de cette approche pour améliorer notre compréhension de l'ébullition et soutenir le développement de systèmes de gestion thermique plus efficaces.*

Mots-Clés – *Ébullition, microfabrication, capteur de flux thermique, mesures transitoires.*

Section(s) CNU pour cet article – *62, 60, 63, 28.*

Article présenté à l'oral par un(e) doctorant(e) – *OUI*

1 Introduction

Le changement de phase liquide-vapeur est un moyen très efficace d'échange de la chaleur. En raison de son efficacité, ce processus est largement utilisé, notamment dans les systèmes de refroidissement [1]. Par exemple, le changement d'état peut être utilisé pour le refroidissement des composants électroniques, tels que les processeurs des ordinateurs, de plus en plus puissants et miniatures. Cela nécessite le développement de nouvelles techniques de gestion thermique, visant à concevoir des systèmes de refroidissement à la fois compacts et performants. Un exemple simple illustrant l'efficacité de ce processus est la sensation de fraîcheur que l'on éprouve en sortant d'une piscine : pour s'évaporer de notre peau, l'eau en absorbe la chaleur, procurant ainsi une sensation de fraîcheur.

L'ébullition est l'une des méthodes de changement de phase permettant d'améliorer efficacement le transfert de chaleur [2]. Lorsqu'une bulle se forme à la surface, la chaleur est transférée de deux manières : d'une part, pendant la formation de la bulle, lorsque la chaleur est puisée depuis la surface ; d'autre part, lorsque la bulle se détache, ce qui entraîne un important transfert de chaleur pariétal lié aux mouvements du liquide en proche paroi [3]. Bien que les études sur l'ébullition aient débuté au début des années 1930 [4], ce phénomène n'est pas encore entièrement compris. L'un des principaux problèmes réside dans le degré d'incertitude élevé associé aux dispositifs et méthodes de détection [5]. Dans le cadre de notre étude, nous avons donc fabriqué un dispositif appelé "ébulliomètre", composé entre autres de micro-capteurs de températures de type RTD (détecteur de température à résistance), et qui remplit deux fonctions. D'une part, un élément chauffant intégré à l'ébulliomètre couplé à un site artificiel de nucléation sur la surface permettent de générer la bulle à une localisation contrôlée. D'autre part, l'ébulliomètre est constitué d'un capteur de flux thermique basé sur deux capteurs de température (RTD platine déposées en film mince) déposés de part et d'autre. Cet article propose une vue d'ensemble du processus de microfabrication, du dispositif expérimental et des résultats préliminaires obtenus avec l'ébulliomètre micro fabriqué.

2 Microfabrication de l'ébulliomètre

L'ébulliomètre (cf. figure 1) a été fabriqué dans la centrale de micro technologie du laboratoire FEMTO-ST [6]. Il est constitué de 3 parties : 2 wafers en silicium (Si) et un wafer en verre (BF33). La figure 1-a montre l'ébulliomètre (carré en pointillés blanc) dans son ensemble et intégré sur le support PCB (Printed Circuit Board). La coupe transversale de l'ébulliomètre (figure 1-d) met en évidence la constitution et l'empilement des wafers. Les éléments (2 sondes RTD en platine et une

résistance chauffante) sont déposés sur les faces supérieure et inférieure de l'ébulliomètre. Pour garantir une mesure précise et rapide de la température de la paroi sous la bulle, la sonde RTD de la surface supérieure (figure 1-b) a été déposée sur une fine membrane de verre (épaisseur d'environ 44µm), qui la sépare thermiquement du reste de la structure. Cette sonde a la forme d'une spirale (1mm de diamètre) équipée en son centre d'un site de nucléation sur lequel la bulle de vapeur va se créer de manière préférentielle. La face inférieure de l'ébulliomètre est, quant à elle, instrumentée par deux résistances platine imbriquées l'une dans l'autre (figure 1-c). L'une sert à la mesure de la température de la face inférieure, l'autre de système de chauffage pour générer la bulle de vapeur. Les étapes de la microfabrication sont présentées succinctement en annexe 1. Les sondes platine doivent ensuite être étalonnées sur un banc AOIP du laboratoire dédié. Ceci permet d'obtenir le polynôme d'étalonnage reliant la valeur de la résistance R à la température T . L'équation ci-après donne un exemple de polynômes d'étalonnage obtenus pour la RTD de la face supérieure :

$$R = 7.344 T + 2554.7$$

L'ébulliomètre a ensuite été intégré à un support PCB afin d'effectuer des tests préliminaires et observer la réponse du capteur lors de l'ébullition.

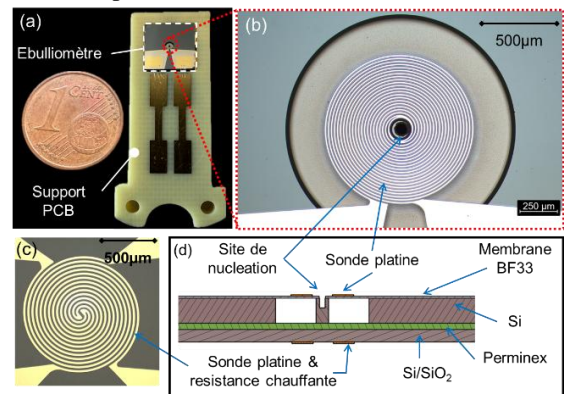


Figure 1 – (a) Photographie de l'ébulliomètre intégré à son support PCB. Gros plan (b) de la RTD de la face supérieure et du site de nucléation, (c) de la RTD et du chauffage de la face inférieure. (d) Schéma en coupe transversale du dispositif

3 Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est illustré à la figure 2. Il se compose d'une cellule d'essai cubique en acier inoxydable scellée, équipée de quatre cartouches chauffantes et de thermocouples permettant de mesurer la température du liquide. Quatre hublots en verre permettent d'observer les bulles pendant l'expérience. Le fluide de test (Flutec PP1 : perfluoro-2-méthylpentane), bout à 57 °C sous pression atmosphérique [7]. L'ébulliomètre est placé au centre de la cellule d'essai et connecté à un système d'acquisition de données National

Instruments. Le maintien en température du liquide est assuré par un régulateur PID. Une alimentation électrique permet d'alimenter la résistance chauffante de l'ébulliomètre, générant localement une surchauffe au niveau du capteur jusqu'à ce que l'énergie soit suffisante pour que la bulle de vapeur se crée sur le site artificiel de nucléation [8].

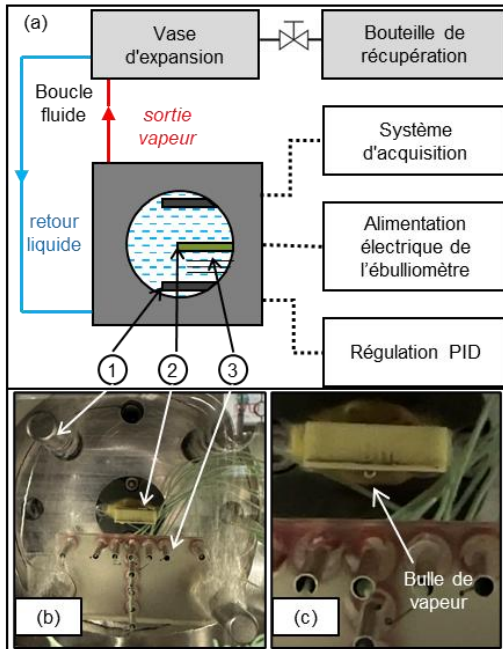


Figure 2 – (a) Schéma du dispositif expérimental, où 1 correspond aux cartouches chauffantes, 2 à l'ébulliomètre et 3 aux thermocouples. (b) Photographie de la cellule d'essai. (c) Image d'une bulle de vapeur formée sur le site de nucléation.

4 Résultats

Les tests préliminaires ont été effectués avec un liquide dégazé, régulé à une température de $54 \pm 1^\circ\text{C}$. La puissance minimale à partir de laquelle nous avons observé la génération de la bulle de vapeur était d'environ 0.5 W. La figure 3 montre deux courbes de température obtenues avec l'ébulliomètre, (a) en l'absence de bulle et (b) en présence de bulles. La courbe rouge correspond à la température mesurée sur la face du capteur comportant la résistance chauffante, alors que la courbe noire correspond à la face du capteur sur laquelle la bulle de vapeur est créée. Dans cette expérience, la surface de l'ébulliomètre est orientée vers le bas (angle de 180°) donc les bulles se forment en dessous de la surface, ce qui permet d'obtenir des temps de croissance assez longs. En l'absence de bulle (figure 3-a), les courbes de température sont relativement stables, et la chaleur est principalement transférée par convection naturelle. Lorsque l'ébullition commence (figure 3-b), la croissance et le départ des bulles vont modifier la température de la paroi. Alors que la température mesurée par le capteur au niveau de la résistance chauffante reste stable, celle mesurée à l'endroit où la bulle se forme (courbe noire) présente un

cycle répétitif, correspondant au cycle de croissance de la bulle de vapeur :

i. Une bulle se détache, provoquant un mouvement important du liquide et une baisse rapide de la température.

ii. Une nouvelle bulle se forme : la température remonte.

iii. La bulle croît, ce qui provoque une nouvelle hausse de la température.

iv. La bulle se détache, provoquant une baisse soudaine de la température et relançant ainsi le cycle.

Ces oscillations montrent à quel point le transfert de chaleur par ébullition est sensible à la dynamique des bulles. Si l'ébullition n'est pas correctement contrôlée, cela peut provoquer des pics de température soudains, susceptibles d'endommager le système.

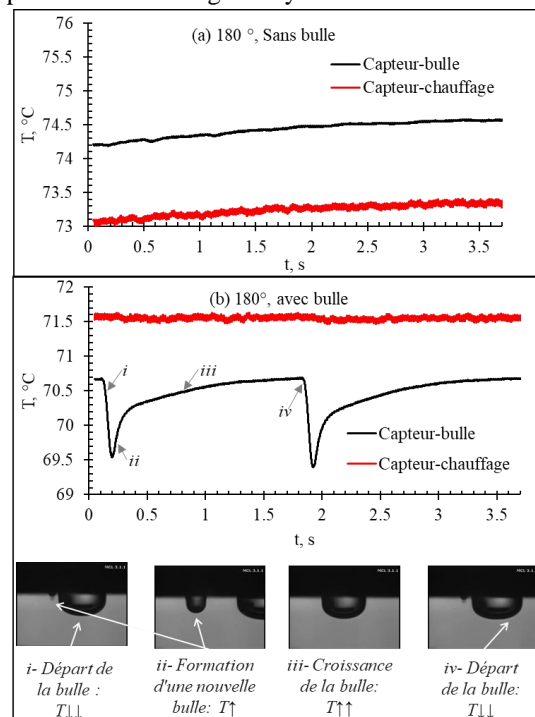


Figure 3 – Evolution temporelle des températures des capteurs côté chauffage (rouge) et côté bulle (noir) : (a) sans bulle ; (b) avec bulle de vapeur et images des bulles associées.

5 Conclusions

Cet article présente un ébulliomètre original, micro-fabriqués et conçu pour permettre la génération de bulles de vapeurs en un emplacement spécifique, tout en mesurant les variations des paramètres thermiques (donc la température de surface) pendant l'ébullition. La preuve de concept a été faite au travers des premiers résultats obtenus. Ceux-ci montrent que l'appareil peut détecter les variations de température liées à l'activité des bulles, ce qui permettra d'étudier l'ébullition à petite échelle. Ces résultats préliminaires permettront, par une étude systématique, de contribuer à la détermination des échanges de chaleur lors des phénomènes d'ébullition.

6 Remerciements

Les auteurs remercient l'ANR – FRANCE (Agence nationale de la recherche) pour son soutien financier au projet TraThI (contrat ANR-21-CE50-0009-01). Ce travail a été réalisé dans le cadre de la graduate school EIPHI (contrat ANR-17-EURE-0002). Ce travail a été soutenu par le réseau français RENATECH et son centre technologique FEMTO-ST.

7 Annexe 1 : étapes de microfabrication

La fabrication de l'ébulliomètre nécessite plusieurs étapes de micro-fabrication. De manière synthétique, on commence par une étape de photolithographie (fabrication des motifs grâce aux masques et à la résine photosensible). Puis les couches de platine (épaisseurs de 190 nm sur la face supérieure ; 260 nm sur le dessous) et d'or (connectiques) sont déposées. Sur le wafer en silicium du milieu, une étape de gravure anisotrope profonde (DRIE) permet de créer le vide d'air sous la membrane en verre. Les différents wafers sont ensuite assemblés (soudure anodique ou résine PermiNex®). Enfin, un laser femto-seconde est utilisé afin de créer le site de nucléation sur la face supérieure par ablation.

8 Références

- [1] Y. Sun *et al.*, *Hierarchical sintered porous surfaces with enhanced pool boiling heat transfer performance for high-power cooling applications*, *Appl Therm Eng*, vol. 249, p. 123368, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2024.123368.
- [2] G. Liang and I. Mudawar, *Review of pool boiling enhancement by surface modification*, Jan. 01, 2019, Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.026.
- [3] J. Kim, *Review of nucleate pool boiling bubble heat transfer mechanisms*, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 35, no. 12, pp. 1067–1076, Dec. 2009, doi: 10.1016/J.IJMULTIPHASEFLOW.2009.07.008.
- [4] S. Nukiyama, *Maximum and Minimum Values of Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure*, *J. Soc. Mech. Eng. Jpn.*, vol. 37, pp. 367–374, 1934.
- [5] H. Kharkwal, M. Zamoum, M. Barthès, F. Lanzetta, H. Combeau, and L. Tadriss, *Heat transfer investigation near the onset of nucleate boiling on a single artificial nucleate site: Influence of the wall orientation*, *Appl Therm Eng*, vol. 279, p. 127503, Nov. 2025, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2025.127503.
- [6] <https://platforms.femto-st.fr/centrale-technologie-mimento/>.
- [7] Flutec PP1. Accessed: Nov. 11, 2025. [Online]. Available: [https://www.f2chemicals.com/pdf/sds/FLUTEC%20PP1\(355-04-4\).pdf](https://www.f2chemicals.com/pdf/sds/FLUTEC%20PP1(355-04-4).pdf)
- [8] M. Barthès, *Ebullition sur site isolé: étude expérimentale de la dynamique de croissance d'une bulle et des transferts associés*, Université de Provence - Aix-Marseille I, Aix-Marseille, 2005.