

# Caractérisation de la nucléation hétérogène pour des surfaces lisses et rugueuses

Mostafa AL MASRI<sup>1\*</sup>, Serge CIOULACHTJIAN<sup>1</sup>, Colette VEILLAS<sup>2</sup>, Frédéric CELLE<sup>2</sup>, Isabelle VERRIER<sup>2</sup>, Yves JOURLIN<sup>2</sup>, Michel MARTIN<sup>3</sup>, Christophe PUPIER<sup>3</sup>, Frédéric CRAYSSAC<sup>4</sup>, Frédéric BELLENCONTRE<sup>4</sup>, Pluton PULLUMBI<sup>4</sup>, Frédéric LEFEVRE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centre de Thermique de Lyon, UMR 5008 CNRS INSA Univ. Lyon, F-69621 Villeurbanne

<sup>2</sup>Lab. H. Curien, UMR 5516 CNRS Univ. Lyon, F- 42000 Saint-Etienne

<sup>3</sup>Institut de Recherches En Ingénierie des Surfaces (groupe HEF), F- 42000 Saint-Etienne

<sup>4</sup>Air Liquide, F-78354 Jouy-en-Josas

\* (auteur correspondant : mostafa.al-masri@insa-lyon.fr)

**Résumé** – Le déclenchement de l'ébullition en milieu saturé, a été étudié expérimentalement sur des surfaces planes en aluminium, lisses ou ultra-lisses (RMS variant de 40 nm à 1 µm avec ou sans défauts). Suivant la surface utilisée, trois modes de déclenchement ont été observés : croissance d'une bulle isolée, extension de l'ébullition sur une zone localisée, ou développement explosif d'une grosse bulle envahissant rapidement toute la paroi. Après le déclenchement, l'ébullition à flux décroissant a été analysée.

## 1. Introduction

La recherche de surfaces optimales pour l'ébullition, capables d'évacuer de très hautes densités de flux de chaleur, a fait l'objet de nombreux travaux expérimentaux et théoriques au cours des cinquante dernières années [1] et [2]. Ces recherches trouvent leurs applications dans la réalisation d'échangeurs de chaleur efficaces et compacts dans des applications industrielles de plus en plus nombreuses. Jusqu'à présent, les études se sont surtout focalisées sur des surfaces très complexes possédant une quantité innombrable de sites de nucléation et présentant une surface développée considérable (surfaces à revêtement poreux, surfaces à revêtement de nanoparticules ou de nanotubes de carbone, surfaces avec micro-gravures, etc.). De telles surfaces sont très efficaces et les phénomènes d'intensification sont qualitativement bien compris. Cependant leur grande complexité ne permet pas de mener une étude théorique approfondie ou de repérer les paramètres d'influence les plus importants nécessaires pour réaliser des surfaces optimales, pas nécessairement aussi complexes. Or, les mécanismes physiques de base sont encore mal maîtrisés ou mal compris, tels que par exemple le processus précédant la formation d'une bulle de vapeur stable. Il est donc nécessaire de revenir à des surfaces de base, c'est-à-dire des surfaces ultra-lisses. Paradoxalement, la littérature présente peu d'études du phénomène d'ébullition sur les surfaces ultra-lisses. Les travaux sur les surfaces métalliques avec des rugosités de l'ordre du nanomètre semblent relativement récents et développés que par un petit groupe d'auteurs. Autre fait remarquable, les surchauffes de déclenchement de l'ébullition reportées par ces auteurs sont relativement faibles, en dépit de l'absence de sites de nucléation. Bon et al. [3] ont déclenché l'ébullition nucléée sur des surfaces métalliques ultra-lisses (RMS variant de 30 à 365 nm) avec de très faibles surchauffes de la paroi ( $\Delta T \approx 10$  K) ce qui n'est pas en accord la théorie classique [4]. Ces auteurs ont conclu que la nucléation hétérogène n'est pas due uniquement au piégeage de la vapeur dans les cavités. Selon ces auteurs des considérations théoriques nouvelles doivent être proposées pour comprendre ce phénomène, des techniques expérimentales innovantes doivent être développées et des mesures à des échelles nanométriques doivent être réalisées. Les résultats de [3] sont en accord avec ceux de [5]. Par contre, Whitharana et al. [6] ont étudié l'effet des cavités artificielles pour différentes tailles (de 90 nm à 4,5 µm de diamètre) et ont mesuré les

surchauffes requises pour le déclenchement d'ébullition avec de l'eau sur du silicium (RMS  $\approx$  0,5 nm). Leurs résultats sont en accord avec ceux prédits à partir de l'équation Young-Laplace (associée avec la table thermodynamique pour déterminer la surchauffe nécessaire de la paroi). Les résultats de ces auteurs valident la vision de la théorie classique de la nucléation hétérogène de la bulle. L'analyse bibliographique révèle une insuffisance de travaux expérimentaux sur l'influence de la topographie des surfaces à l'échelle nanométrique. Dans ce travail, une étude expérimentale de l'apparition de l'ébullition nucléée en vase avec un fluide très mouillant (acétone ultra pur) et des échantillons métalliques (aluminium) a été réalisée. Nous avons étudié la nucléation des bulles sur des surfaces ultra-lisses sans défauts, des surfaces lisses avec des défauts et des surfaces rugueuses. L'utilisation d'une caméra rapide, nous a permis de détecter 3 modes de nucléation lors du déclenchement de l'ébullition : nucléation sur un site, extension sur la paroi et ébullition explosive. Nous avons aussi caractérisé les transferts thermiques en ébullition nucléée à flux décroissant.

## 2. Dispositif expérimental

L'échantillon sur lequel s'effectue l'ébullition est un disque (diamètre 80 mm, épaisseur 5 mm) en aluminium (Au4G) (figure 1(a)). La face supérieure de l'échantillon en contact avec le fluide est polie miroir. La face inférieure comporte une rainure annulaire de 25,4 mm de diamètre interne, 5 mm ou 10 mm d'épaisseur et de 4,8 mm de profondeur. Dans sa partie centrale une résistance chauffante circulaire (diamètre 25,4 mm) est positionnée. La rainure permet de limiter les transferts de flux à la périphérie de l'échantillon et donc l'activation de bulles parasites (interstices inévitables à la jointure de l'échantillon avec l'enceinte).

Afin d'évaluer la répartition du flux thermique dans l'échantillon, nous avons développé un modèle numérique. Les conditions limites introduites sont les suivantes. Sur la face inférieure, un flux thermique est imposé dans la zone centrale en contact avec la résistance thermique, le reste de la face inférieure est isolé. Sur la face supérieure, un coefficient de transfert thermique par convection est imposé. La figure 1(b) présente le résultat obtenu pour un flux thermique de 11 W/cm<sup>2</sup>. La température de la partie centrale est homogène, elle décroît très rapidement à la température de saturation du fluide à partir la rainure et le transfert de chaleur vers la périphérie est inférieur à 10 %, ce qui permet d'éviter la formation de bulles parasites.

Les figures 2(a) et 2(b) présentent le dispositif expérimental. L'enceinte utilisée est un réservoir transparent double paroi. Dans l'enveloppe extérieure circule de l'eau provenant d'un bain thermostaté afin de contrôler la température de saturation (à  $\pm$  0,2 °C) et la pression dans le réservoir. Le réservoir est hermétiquement fermé sur un support circulaire en aluminium Au4G à l'aide d'un joint torique PTFE compatible avec le fluide utilisé et d'un collier de fermeture rapide adapté avec ce type de réacteur en verre. Trois tubes traversent le support Au4G pour la mesure de pression, la mesure de température de liquide, le remplissage/vidange de liquide et la réalisation d'un vide primaire préalable à l'aide d'une pompe avant l'introduction du fluide dans l'enceinte.

L'élément chauffant (Captec, diamètre 25,4 mm, épaisseur 0,25 mm, résistance 7  $\Omega$ ) situé contre la face inférieure de l'échantillon est alimenté par un générateur de tension (0 à 24 volts). Un fluxmètre (diamètre 25,4 mm et épaisseur 0,4 mm) placé sous l'élément permet de mesurer les pertes thermiques. Sa sensibilité est 2,62  $\mu$ V/(W.m<sup>2</sup>) et son temps de réponse est 0,3 s. L'ensemble est plaqué sur l'échantillon à l'aide d'un piston isolant (PEEK :  $\lambda = 0,25$  W/(m.K)) relié à un ressort afin d'assurer un bon contact entre les éléments. La température de la face inférieure de l'échantillon est mesurée par un thermocouple de type K inséré dans une micro rainure (figure 1 (a)). Une résistance de référence (étalon 0,001  $\Omega$ ) Keithley 1651 a été

connectée en série avec l'élément chauffant afin de mesurer avec précision la puissance fournie à l'élément chauffant. Le fluide utilisé est de l'acétone (pureté 99,9 %). Avant remplissage, un vide primaire est réalisé dans l'enceinte. L'acétone est ensuite chauffée pour atteindre une pression supérieure à 1 bar ( $\approx 1,1$  bar) afin d'être dégazée, et d'évacuer la présence éventuelle de gaz incondensables. Une bonne correspondance température du fluide avec la pression de saturation donnée dans les tables, assure le dégazage satisfaisant du fluide. Une caméra rapide (Photron Fastcam SA3) permet de visualiser les phénomènes. La fréquence d'acquisition est réglée sur 1000 f/s, la taille d'image est de 384x240 pixels. L'éclairage est assuré à l'aide d'un éclairage LED.

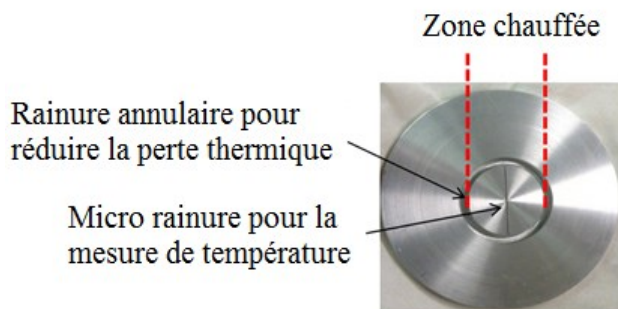


Figure 1 (a) : Vue en dessous de l'échantillon

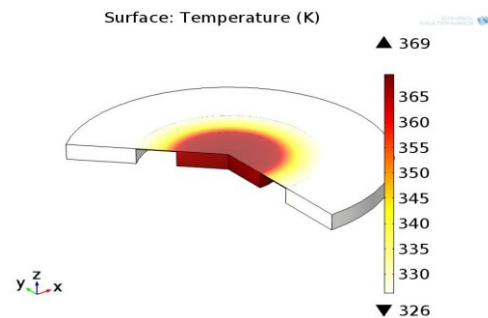


Figure 1 (b) : Résultats numériques

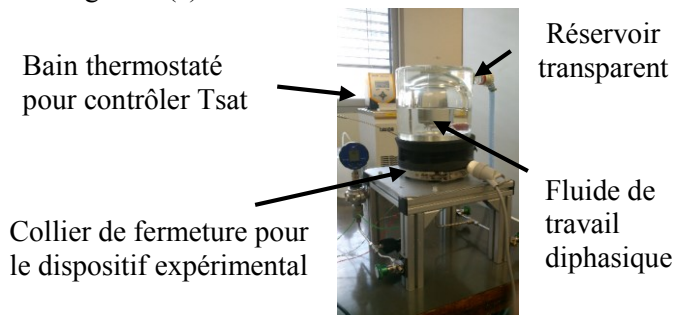


Figure 2 (a) : Dispositif expérimental

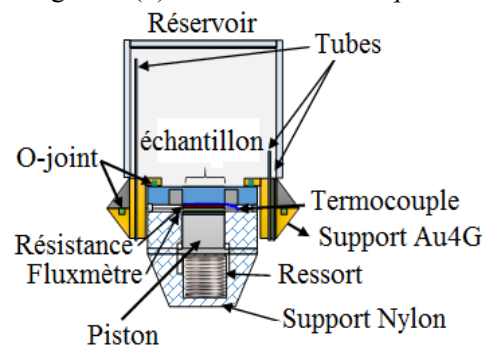


Figure 2 (b) : Schéma du dispositif

### 3. Caractérisation de l'échantillon

Tous les échantillons sont polis mécaniquement afin d'obtenir la rugosité souhaitée à l'aide d'une polisseuse (Lamplan M.M.8600). Les surfaces sont nettoyées avec de l'acétone par bain ultrason. L'état de surface est mesuré à l'aide d'un microscope confocal à lumière blanche. Pour cela, un balayage précis de la surface est effectué sur un grand nombre de lignes (1200 lignes distantes de  $20 \mu\text{m}$ ) afin d'obtenir un profil aussi complet que possible. La résolution de ce microscope est de  $60 \text{ nm}$  pour les 3 directions : horizontales  $x$ ,  $y$  et verticale  $z$ . Le pas de déplacement du capteur est de  $5$  à  $10 \mu\text{m}$  selon  $x$  (direction de la ligne de balayage),  $20$  à  $100 \mu\text{m}$  selon  $y$  (distance entre 2 lignes). La plage de mesures de la hauteur des sites est comprise entre  $60 \text{ nm}$  et  $350 \mu\text{m}$ . Le logiciel (SPIP) associé au microscope confocal trace le profil obtenu sur chacune des lignes, calcule les paramètres de profils ( $R_a$ ,  $RMS$ , etc.) sur chacune des lignes et sur la surface totale balayée. [7] et [8] ont montré que la mesure des paramètres moyens de rugosité ( $R_a$  et  $RMS$ ) est insuffisante pour caractériser le rôle de surface dans l'ébullition. Dans le but d'obtenir plus d'informations sur la géométrie de la surface, nous avons analysé un par un les profils ainsi que la topographie d'ensemble (reconstitué par le logiciel SPIP) pour détecter l'existence de défauts éventuels (cavités plus grandes que les autres). Cette procédure nous a permis de caractériser l'état de surface (tableau 1).

Dans ce tableau 1, la deuxième colonne donne le RMS global de la zone de l'ébullition, la 3<sup>ème</sup> colonne indique le RMS de la majorité des profils linéaires (ceux sans défauts), la 4<sup>ème</sup> colonne donne le RMS maximal obtenu sur une ligne (généralement une ligne avec défaut), la 5<sup>ème</sup> colonne précise le rayon du ou des défauts détectés.

Les échantillons n° 7+, 8+ et 39+ ont été recouverts par une fine couche aluminium ultra pure (épaisseur 300 nm). L'analyse de surface a permis de distinguer 3 catégories : les échantillons ultra-lisses sans défaut local (N° 7+ et 8+), les échantillons ultra-lisses avec défauts locaux (N° 39+, 9 et 11) et l'échantillon rugueux (N°24).

N°	RMS Total $\mu\text{m}$	Majorités des profils RMS	Profil Max. RMS	Défaut (cavité)
7+	0,05	40 à 60 nm	-	-
8+	0,05	40 à 60 nm	-	-
39+	1,1	50 à 70 nm	8 $\mu\text{m}$	r = 25 $\mu\text{m}$
9	1,4	70 à 120 nm	9,06 $\mu\text{m}$	r = 25 $\mu\text{m}$
11	1,76	120 à 200 nm	8,35 $\mu\text{m}$	r = 15 $\mu\text{m}$
24	5	4 à 9 $\mu\text{m}$	14 $\mu\text{m}$	r = 40 $\mu\text{m}$

Tableau 1 : *Caractérisation des échantillons*

## 4. Résultats expérimentaux

L'acétone a été utilisée comme fluide de travail du fait de sa compatibilité chimique avec l'aluminium et de sa grande mouillabilité sur ce matériau (angle de contact acétone/aluminium inférieur à 18°). La probabilité pour que les surfaces ultra-lisses 7+ et 8+ piègent de la vapeur est donc très faible. Chaque échantillon a été testé 3 ou 4 fois dans les mêmes conditions de saturation (pression 1,15 bar, température de saturation 60 °C) afin de vérifier la répétabilité. Les essais ont été réalisés à flux thermiques croissant et décroissant. Ils montrent qualitativement une bonne répétabilité en ce qui concerne les mécanismes visuels, tandis que le point de déclenchement de l'ébullition varie d'un test à l'autre. Pour réaliser ces mesures, la puissance de la résistance a été réglée par petits paliers de puissance. A chaque palier, la température mesurée sous l'échantillon a été relevée après obtention de l'équilibre thermique.

### 4.1 Les modes de la nucléation

Différents mode de nucléation ont été observés : formation de petites bulles sur des sites isolés ou croissance très rapide d'un noyau de vapeur avec extension sur toute la surface de la paroi chauffée (ébullition explosive). Le mode de déclenchement dépend des paramètres suivants : rugosité de la surface, présence de cavités ou de défauts, valeur du flux de chaleur ou de la surchauffe de la paroi atteinte à l'instant du déclenchement.

Dans le cas de surfaces rugueuses possédant un défaut, la nucléation apparaît d'abord sur un site (probablement le défaut). Une première bulle se forme, croît et se détache. Après le détachement de cette bulle, d'autres bulles peuvent éventuellement se développer autour du premier site. L'apparition d'une bulle sur un site provoque une augmentation locale des échanges thermiques autour du site et une convergence, au sein de l'échantillon, des lignes de flux thermiques vers ce site (Bonjour et al. [9]). Si elle est suffisante, cette élévation locale du flux de chaleur peut activer des sites placés à proximité. La figure 3, correspondant à

l'échantillon n°24 (surface rugueuse,  $RMS \approx 5 \mu m$ , avec présence de défauts) illustre bien ce mécanisme. Ici, l'origine des temps est choisie à l'apparition de la première bulle. A  $t = 0$ , une première bulle apparaît (partie gauche de la photographie). A  $t = 5,4 s$  un second site est activé (partie centrale de la photo). Le détachement de la 1ère bulle, au-dessus de ce second site, s'accompagne d'une légère extension de la zone de nucléation. Rapidement, un équilibre est atteint, l'ébullition est alors stable et la surchauffe de la paroi n'évolue plus. Dans le cas de la première bulle (site activé à  $t = 0 s$ , sur la partie gauche) ce phénomène n'apparaît pas, probablement parce que la surface située au voisinage immédiat du site n'est pas assez rugueuse. Comme la surface de l'échantillon n°24 comporte des défauts, le flux de chaleur nécessaire à l'apparition de la première bulle est peu élevé ( $Q$  compris entre  $3,26 W/cm^2$  et  $5,6 W/cm^2$  suivant les essais). L'apparition des premières bulles, se traduit par une chute de la surchauffe de la paroi. Un mécanisme similaire est observé avec l'échantillon n°9.

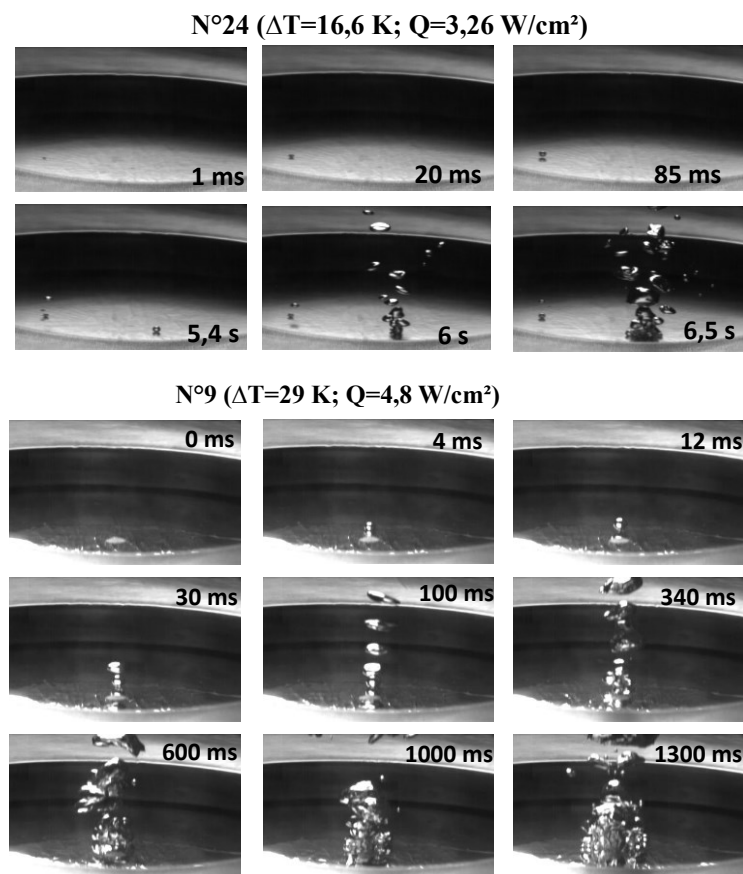


Figure 3 : Apparition de l'ébullition sur des échantillons présentant des défauts

Un mécanisme légèrement différent est observé pour des surfaces plus lisses ( $RMS \approx 200 nm$ ). Ce mécanisme est illustré sur la figure 4. Une bulle apparaît sur un site de nucléation. L'activation du site a lieu pour une surchauffe de paroi élevée (entre  $33 K$  et  $60 K$  suivant les tests de répétabilité) et pour un flux de chaleur intense ( $Q > 7,2 W/cm^2$ , échantillon n°11) car la surface est lisse. Une bulle plus grosse se forme ( $0 < t < 20 ms$ , échantillon n°11, test 1), de nouveaux sites sont activés par recouvrement de la surface par la vapeur, des phénomènes de coalescence ont lieu (test n°1,  $t = 40 ms$  et  $t = 50 ms$  : bulle en forme d'ellipsoïde allongée selon la direction tangente à la surface, caractéristique de la coalescence entre 2 bulles). Finalement une grosse bulle se forme et se détache. Après le détachement de cette grosse bulle, la surchauffe de la paroi a chuté et de nombreux sites ont été activés. L'ébullition s'effectue alors

sous la forme de petites bulles tapissant cette surface. L'équilibre est rapidement atteint. Dans le cas du test n°2 (figure 4), le déclenchement est obtenu pour une surchauffe et un flux thermique plus élevé ( $Q = 10 \text{ W/cm}^2$ ,  $\Delta T = 46 \text{ K}$ ). Il en résulte une évolution plus rapide des phénomènes. Cependant, qualitativement les phénomènes sont similaires, et le déclenchement de l'ébullition semble apparaître sur le même site. Stutz et Moreira [10] ont également observé un mécanisme similaire d'extension de la vapeur sur la paroi (avec le couple pentane/cuivre et une surchauffe nécessaire plus élevée que 40 K).

N°11 Test 1 ( $\Delta T=36 \text{ K}$ ;  $Q=7,5 \text{ W/cm}^2$ ) Test 2 ( $\Delta T=46 \text{ K}$ ;  $Q=10 \text{ W/cm}^2$ )

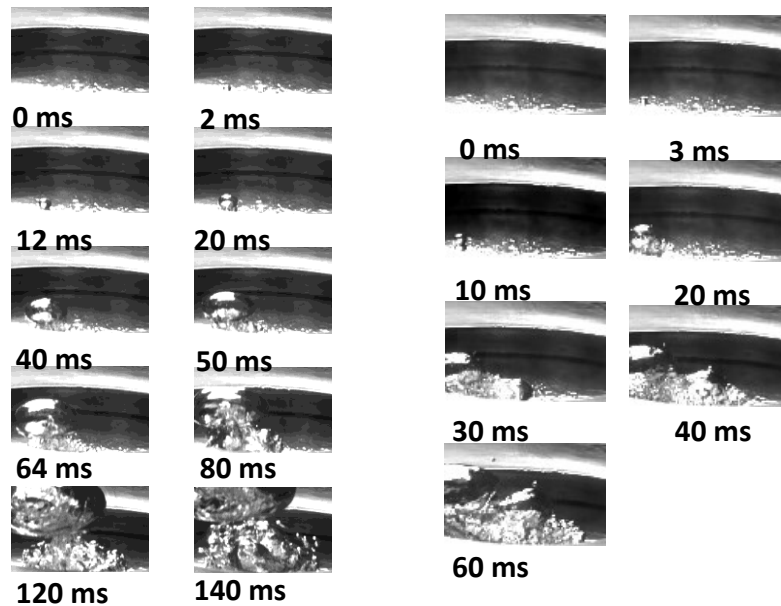


Figure 4 : *Extension sur la paroi*

N°7+ ( $\Delta T=69 \text{ K}$ ;  $Q=14,8 \text{ W/cm}^2$ )

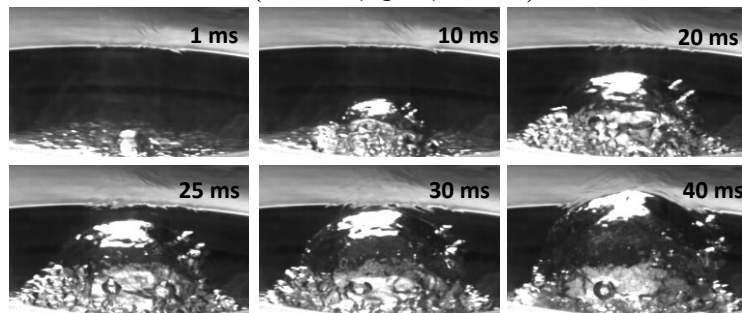


Figure 5 : *Ebullition explosive*

Pour des surfaces ultra-lisses ne comportant pas de défauts (échantillon 7+ et 8+, figure 5), l'ébullition est « explosive » : c'est le troisième mode. Les flux de chaleur et les surchauffes de paroi nécessaires à l'activation de l'ébullition sont très élevés (suivant les tests de répétabilité :  $10 \text{ W/cm}^2 < Q < 14,75 \text{ W/cm}^2$  et  $48 \text{ K} < \Delta T < 84 \text{ K}$ ). Un gros noyau de vapeur (5 mm) de forme hémisphérique se forme très rapidement ( $t < 1 \text{ ms}$ ) sur la paroi, ce noyau de vapeur envahit toute la surface ( $t \approx 10 \text{ ms}$ ) pour former une très grosse bulle (diamètre  $\approx 30 \text{ mm}$ ) en forme d'ellipsoïde légèrement allongée le long de la paroi. Selon les essais de répétabilité, la durée de croissance de cette masse de vapeur, varie entre 45 et 65 ms. Une baisse importante de la température de la paroi (20 à 40 K) accompagne ce phénomène. Le

détachement de la bulle s'accompagne d'une chute de pression dans l'enceinte ( $\approx 2$  kPa). Après le détachement de cette grosse bulle un régime permanent est rapidement atteint, la surface de l'échantillon ( $\varnothing = 25,4$  mm) se couvre entièrement d'une multitude de petites bulles isolées, la pression est rétablie à sa valeur de saturation. Dans la littérature, des bulles de tailles similaires ( $> 10$  mm) ont été observées, mais pour des pressions sub-atmosphérique [11].

#### 4.2 Etude en flux thermique décroissant

Les résultats présentés dans ce paragraphe sont obtenus pour un flux thermique décroissant après activation totale de la zone d'ébullition. La visualisation de chaque test effectué dans les mêmes conditions d'opération et pour le même flux thermique montre que les sites actifs demeurent aux mêmes endroits pour les différents tests répétés. La figure 6 montre la densité de la nucléation pour tous les échantillons dans les mêmes conditions expérimentales. Sur les surfaces ultra-lisses sans défauts (N°7+ et 8+), les densités de sites actifs sont élevées et les tailles des bulles sont les plus petites. Sur les surfaces nano-lisses avec défauts (N° 39+, 9 et 11) la densité de bulles est bien plus faible, les sites sont bien localisés, les tailles des bulles sont plus grandes. La surface rugueuse (N°24) se situe entre les deux précédents types de surface, en ce qui concerne la densité de sites et la taille des bulles. Par conséquent, le nombre de sites de nucléation en régime de flux thermique décroissant dépend directement des caractéristiques de la surface. Pour une densité de flux thermique de  $3 \text{ W/cm}^2$ , les coefficients de transferts thermiques pour les surfaces ultra-lisses sans défauts sont supérieurs de 44 % par rapport aux surfaces ultra-lisses avec défauts et de 34 % par rapport aux surfaces rugueuses.

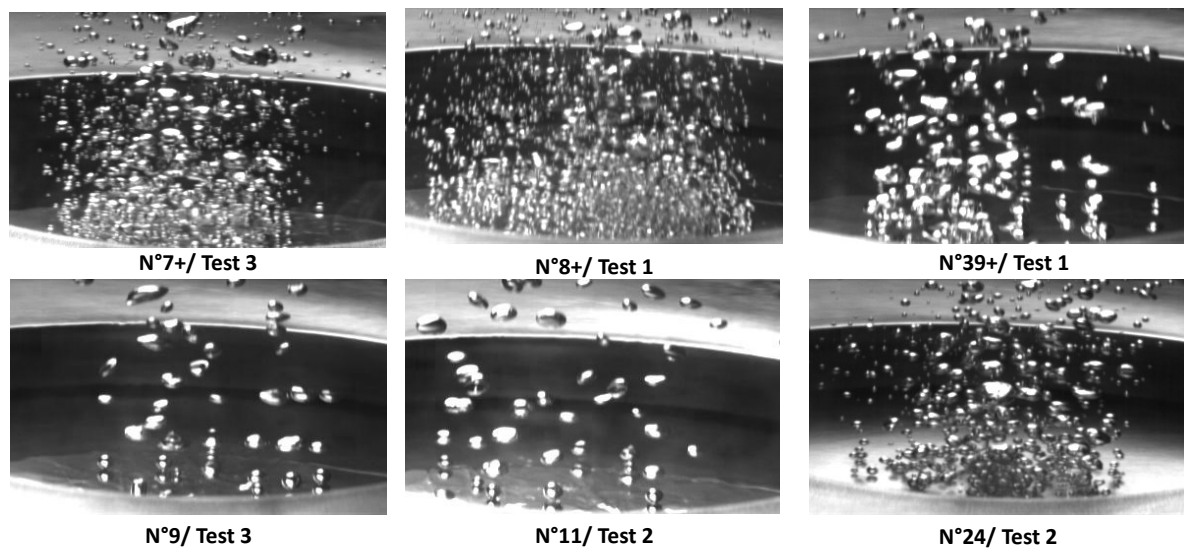


Figure 6: Densité de la nucléation pour un flux de chaleur décroissant  $Q = 3 \text{ W/cm}^2$

Echantillons	8+	39+	9	11	24
$Q (\text{W/cm}^2)$	1,2	2	2	1,8	1,2
$\Delta T (\text{K})$	4,5	10	11	8,5	5,6

Tableau 2 : Surchauffe mesurée pour la disparition de nucléation

Les surchauffes correspondant à la disparition de l'ébullition nucléée et mesurées pour les différents échantillons sont récapitulées dans le tableau 2. La surchauffe requise pour les échantillons présentant des défauts est plus élevée, car une plus grande énergie est nécessaire pour former une bulle de plus grand diamètre.

## 5. Conclusion

Des études expérimentales de l'apparition de l'ébullition nucléée en vase avec un fluide très mouillant et des échantillons en aluminium ont été réalisées. Nous avons étudié la nucléation des bulles dans les conditions de saturation sur des surfaces ultra-lisses sans défaut, des surfaces lisses avec des défauts et des surfaces rugueuses. La surface de ces échantillons a été caractérisée par un microscope confocal et une procédure a été suivie pour caractériser localement la surface. L'utilisation d'une caméra rapide, nous a permis de détecter 3 modes de la nucléation lors du déclenchement de l'ébullition : nucléation sur un site, extension sur la paroi et ébullition explosive. Nous avons aussi caractérisé les transferts thermiques en ébullition nucléée à flux décroissant. A faible flux de chaleur, le coefficient d'échange thermique pour une surface nano lisse sans défauts est meilleur que celui pour une surface nano lisse avec défauts ou pour une surface rugueuse. Ce résultat s'explique par la présence d'une multitude de bulles de toute petite taille sur une surface ultra-lisse, alors que les surfaces avec défauts concentrent le flux de chaleur sur les défauts.

## Références

- [1] Webb, Ralph L. "Donald Q. Kern Lecture Award Paper: Odyssey of the Enhanced Boiling Surface." *Journal of Heat Transfer* 126, no. 6 (2004): 1051.
- [2] Mitrovic, J. "How to Create an Efficient Surface for Nucleate Boiling?" *International Journal of Thermal Sciences*, no. 1 (2006): 1–15.
- [3] Bon, B., Cheng-Kang G., & J. F. Klausner. "Heterogeneous Nucleation on Ultra Smooth Surfaces." *Experimental Thermal and Fluid Science* 35, no. 5 (2011): 746–52.
- [4] Griffith, P., & J. D Wallis. "The Role of Surface Conditions in Nucleate Boiling." Tech. Report. Cambridge, Mass. : Massachusetts Inst. of Technology, Division of Industrial Cooperation, 1958.
- [5] Theofanous, T., J. Tu, A. Dinh, & T. Dinh. "The Boiling Crisis Phenomenon: Part I: Nucleation and Nucleate Boiling Heat Transfer." *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 6–7 (2002): 775–92.
- [6] Witharana, S., B. Phillips, S. Strobel, H. D. Kim, T. McKrell, J.-B. Chang, J. Buongiorno, K. K. Berggren, L. Chen, & Y. Ding. "Bubble Nucleation on Nano- to Micro-Size Cavities and Posts: An Experimental Validation of Classical Theory." *Journal of App. Phys.* 112, no. 6 (2012): 064904.
- [7] McHale, J., & S. V. Garimella. "Nucleate Boiling from Smooth and Rough Surfaces – Part 2: Analysis of Surface Roughness Effects on Nucleate Boiling." *Experimental Thermal and Fluid Science* 44 (2013): 439–55.
- [8] Jones, B., J. McHale, & S. Garimella. "The Influence of Surface Roughness on Nucleate Pool Boiling Heat Transfer." *Journal of Heat Transfer* 131, no. 12 (2009): 121009–121009.
- [9] Bonjour, J., M. Clausse, and M. Lallemand. "Experimental Study of the Coalescence Phenomenon during Nucleate Pool Boiling." *Experimental Thermal and Fluid Science*, no. 3–4 (2000): 180–87.
- [10] Stutz, B., & J. Simões-Moreira. "Onset of boiling and propagating mechanisms in a highly superheated liquid-the role of evaporation waves". *International Journal of Heat and Mass Transfer* (2013): 683-693.
- [11] Giraud, F., Rullière, R., Toubanc, C., Clausse, M., & Bonjour, J.. "Experimental evidence of a new regime for boiling of water at subatmospheric pressure". *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2015, 60, 45-53.

## Remerciements

Le support de l'agence nationale de la recherche dans le cadre du projet "NUCLEI" (ANR-12-SEED-0003) est vivement remercié.