

# Etude expérimentale du contrôle du déclenchement de l'ébullition en espace confiné par déformation dynamique de paroi

Laetitia LEAL<sup>1</sup>, Pascal LAVIEILLE<sup>1</sup>, Marc MISCEVIC<sup>1\*</sup>, François PIGACHE<sup>2</sup>, Lounès TADRIST<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire PLAsma et Conversion de l'Energie - LAPLACE - UMR 5213 - Université Paul Sabatier  
118 route de Narbonne - 31062 Toulouse

<sup>2</sup> Laboratoire PLAsma et Conversion de l'Energie - LAPLACE - UMR 5213 - ENSEEIHT - 2, rue  
Charles Camichel - BP 7122 - 31071 Toulouse Cedex 7

<sup>3</sup> Laboratoire IUSTI - 5 rue Enrico Fermi - Technopôle de château Gombert  
13453 Marseille Cedex 13

\*(auteur correspondant : marc.misevic@laplace.univ-tlse.fr)

**Résumé** - Une technique diminuant la surchauffe au déclenchement est proposée. Elle consiste à diminuer la surchauffe au déclenchement de l'ébullition en vase dans un milieu confiné par déformation dynamique de paroi. Un dispositif expérimental a été réalisé afin de vérifier l'intérêt de cette technique. Les résultats expérimentaux obtenus permettent de quantifier la diminution de la température de déclenchement de l'ébullition qui est comparée à des modèles théoriques.

## Nomenclature

$a$	amplitude, $m$	$T$	température, $K$
$a_o$	amplitude maximale, $m$	$\Delta T$	surchauffe $\Delta T = T_w - T_{sat}$ , $K$
$D$	diamètre de la paroi de confinement, $m$	<i>Symboles grecs</i>	
$e$	distance entre la paroi chauffante et la paroi de confinement au repos, $m$	$\lambda$	conductivité thermique, $W.m^{-1}.K^{-1}$
$e_x$	vecteur unitaire du repère fixe	$\rho$	masse volumique du fluide, $kg.m^{-3}$
$e_y$	vecteur unitaire du repère fixe	$\sigma$	tension de surface, $N.m^{-1}$
$f$	fréquence de la déformation de la paroi de confinement, $Hz$	$\Omega$	volume, $m^3$
$h_{lv}$	chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$	<i>Indices</i>	
$p$	pression, $Pa$	$c$	critique
$r$	rayon, $m$	$l$	liquide
$t$	temps, $s$	$sat$	saturation
		$v$	vapeur
		$w$	paroi

## 1. Introduction

Dans le contexte actuel de la miniaturisation et de l'augmentation de la puissance des composants électroniques, les besoins en refroidissement sont de plus en plus importants. Pour la communauté énergétique, l'impératif est de gérer à court terme des densités de flux supérieures à  $100W/cm^2$  et pouvant atteindre à plus moyen terme  $1000W/cm^2$ . Le niveau de contraintes est élevé : il faut développer des solutions de refroidissement capables d'évacuer de très fortes densités de flux avec une différence de température limitée entre la source et le puits et cela dans un contexte de réduction des échelles et d'augmentation de l'intégration des systèmes. L'étude consiste à proposer une technique active d'intensification et de contrôle des transferts de chaleur lors de l'ébullition en milieu confiné en déformant une des parois d'échange. La surchauffe de la paroi nécessaire pour déclencher l'ébullition peut engendrer la détérioration du

composant. L'objectif est donc de contrôler les transferts de chaleur, en particulier, en réduisant la surchauffe nécessaire au déclenchement de l'ébullition. Une voie possible pour diminuer cette surchauffe est de déformer mécaniquement la paroi de confinement afin d'engendrer des surpressions et des dépressions dans le liquide. La variation de pression, induite par la déformation mécanique de la paroi de confinement, augmente le niveau de métastabilité du liquide et permet ainsi de déclencher l'ébullition pour une température de paroi moins importante.

Un modèle hydrodynamique [1] couplé à un modèle de nucléation ont été développés afin de prédire la surchauffe au déclenchement en fonction de l'amplitude et de la fréquence de la déformation dynamique, ainsi que du degré de confinement. Ces modèles sont brièvement présentés dans une première partie. Le dispositif expérimental conçu et réalisé est ensuite détaillé et des expériences sans et avec déformation dynamique sont comparées entre elles. Une analyse est finalement proposée par confrontation des résultats théoriques et des résultats expérimentaux.

## 2. Modèle hydrodynamique d'un fluide en espace confiné lors de la déformation dynamique d'une paroi

Le modèle hydrodynamique consiste à évaluer les dépressions et les surpressions obtenues dans un liquide confiné entre une paroi chauffante et une paroi de confinement. Cette dernière est déformée dynamiquement en son centre et est maintenue fixe à ses extrémités. Les variations de pression sont calculées en fonction du degré de confinement au repos, ainsi que de l'amplitude et de la fréquence de la déformation. Les équations du modèle sont celles de Navier Stokes. Le modèle hydrodynamique ayant été présenté dans une communication antérieure [1], seules les hypothèses et le résultat (figure 2) correspondant à la configuration considérée ici sont reportés.

Les principales hypothèses du modèle sont que l'écoulement est 1D et radial, que le fluide est un fluide parfait et incompressible dont les propriétés thermophysiques sont constantes et que la déformation de la membrane est sinusoïdale au cours du temps :  $a(t) = a_0 \sin(2\pi ft)$ .

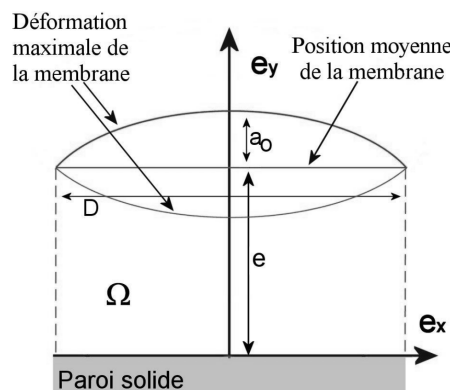


Figure 1 : Schéma de principe (les échelles ne sont pas respectées : en réalité  $e$  et  $a \ll D$ )

## 3. Modèle du déclenchement de la nucléation

Les variations de pression induites par la déformation dynamique se traduisent par des variations du degré de métastabilité du liquide à une température donnée. Afin de prédire si l'amplitude de ces variations est suffisante pour atteindre la limite de métastabilité et déclencher l'ébullition, un modèle de nucléation décrivant des embryons piégés en paroi a été réalisé.

Un embryon de vapeur peut être piégé dans les cavités d'une surface chauffée lorsque celle-

ci est rugueuse. Pour qu'il devienne actif, il faut que la surchauffe au voisinage de l'embryon le rende instable. Une petite fluctuation de pression ou de température suffit alors à le faire croître de manière irréversible. Le rayon critique de la bulle peut être estimé par le rayon d'ouverture de la cavité. La surchauffe au déclenchement est alors :  $T_w - T_{sat}(p) = \frac{2\sigma T_w}{\rho_v h_{lv} r_c}$ . Le modèle de nucléation permet ainsi de quantifier à quelle pression l'ébullition se déclenche pour une température de liquide donnée (figure 3). Le modèle hydrodynamique permet de connaître la pression du liquide en fonction des paramètres de déformation de la membrane ainsi que du degré de confinement. En couplant ces deux modèles, il est possible de déterminer les paramètres théoriques de déformation qui permettront le déclenchement de la nucléation. Les résultats expérimentaux seront comparés à ceux obtenus théoriquement dans le paragraphe 5.2.

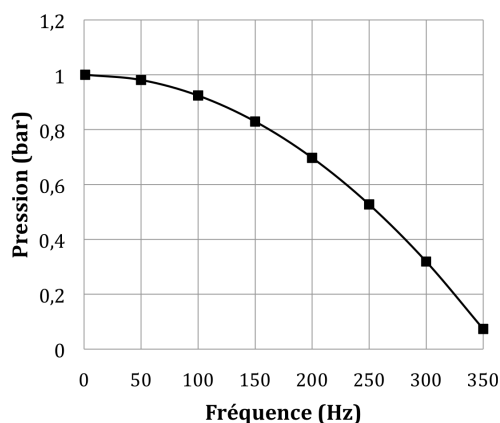


Figure 2 : Minimum de pression obtenu pour une distance paroi chauffante/paroi de confinement de  $625\mu m$  et une amplitude de déformation  $a_0$  de  $210\mu m$

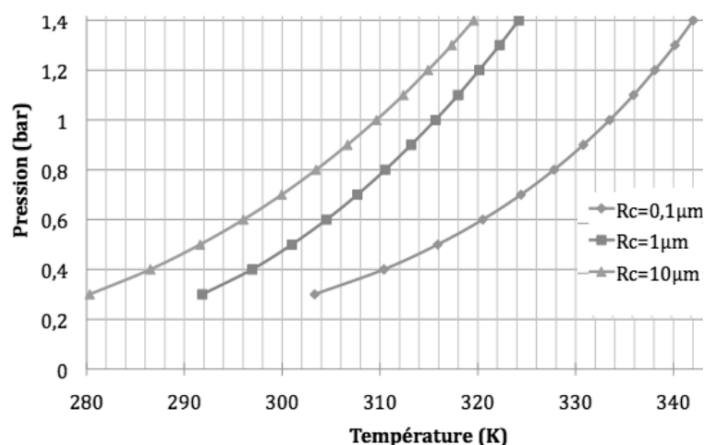


Figure 3 : Pression de déclenchement de la nucléation en présence d'embryons piégés en paroi ( $R_c$  : rayon d'ouverture de la cavité)

#### 4. Présentation du dispositif et du protocole expérimentaux

Le dispositif expérimental (figure 4) permet d'étudier le déclenchement de l'ébullition en vase dans un espace confiné avec ou sans déformation dynamique de paroi. Il est composé d'une enceinte, thermostatée par de l'eau, dans laquelle se situent le corps de chauffe et la paroi de confinement. Le fluide (n-pentane) est confiné entre la paroi chauffée et la paroi de confinement. L'espacement entre ces deux parois est réglable entre  $50\mu m$  et  $2\text{ cm}$  avec une précision de  $10\mu m$ . Le corps de chauffe est un cylindre en aluminium qui a été poli afin d'obtenir des rugosités de l'ordre de  $0.1\mu m$  (surface polie miroir). Son diamètre est de  $56\text{ mm}$ . A  $4\text{ mm}$  sous la paroi chauffée est placée une résistance chauffante de  $40\text{ mm}$  de diamètre. La puissance maximum applicable à cette dernière est de  $125\text{ W}$ . Pour limiter les pertes thermiques, la résistance est entourée de Téflon ( $\lambda = 0.25\text{ W.m}^{-1}.K^{-1}$ ). Dix thermocouples sont répartis à  $2\text{ mm}$  sous la paroi chauffée. L'incertitude sur les mesures de température est de  $\pm 0.2\text{ K}$ . La paroi de confinement (diamètre =  $40\text{ mm}$ ) est un disque en inox de  $0,3\text{ mm}$  d'épaisseur. Elle est déformée dynamiquement en son centre tandis que sa périphérie est maintenue fixe (figure 5). La déformation est obtenue par un actionneur piézoélectrique. La fréquence maximale de déformation est de  $500\text{ Hz}$  et l'amplitude maximale est de  $250\mu m$ . Un circuit annexe permet le dégazage du fluide et la condensation des vapeurs de n-pentane.

Le protocole expérimental consiste, dans un premier temps, à dégazer le n-pentane puis, dans un second temps, à quantifier les variations de la température de la paroi chauffante sous l'effet

de paliers de flux (de 0 à 125 W).

Le circuit de dégazage permet d'évacuer les gaz incondensables et de condenser la vapeur de n-pentane. Lors du dégazage, l'enceinte est thermostatée à une température légèrement supérieure à la température de saturation du n-pentane. La paroi chauffante est soumise au flux thermique le plus important possible (125 W) pendant une vingtaine de minutes. Le n-pentane à proximité de la surface chauffante est alors en ébullition. L'alimentation électrique de la résistance chauffante est alors coupée et l'ébullition s'arrête. Cette phase est répétée une seconde fois. La durée du dégazage est d'une heure.

Lors des expériences, l'enceinte est réglée à 35,5°C soit à une température légèrement inférieure à la température de saturation afin d'éviter l'ébullition parasite. Des paliers de flux sont imposés à la surface chauffante (figure 6). L'amplitude des paliers est variable : elle est plus faible lorsque les conditions de déclenchement de l'ébullition sont proches. Ceci permet de quantifier la température de déclenchement de l'ébullition avec plus de précision. Pour chaque palier, le régime permanent est attendu (12 minutes) et les valeurs des températures sont enregistrées.

Dans cette communication, les paramètres expérimentaux sont les suivants : la distance entre les parois chauffante et de confinement  $e$  est de  $625 \mu m$ , l'amplitude maximale de la déformation  $a_o$  est de  $210 \mu m$  et la fréquence de la déformation est de 100 Hz.

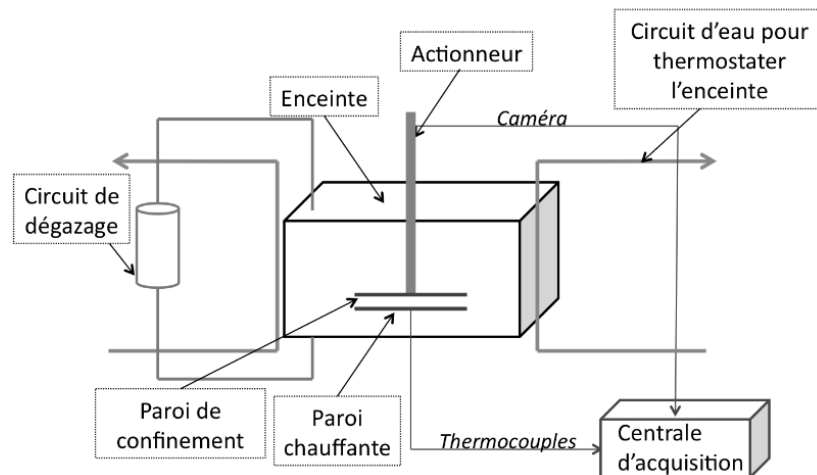


Figure 4 : Schéma du dispositif expérimental

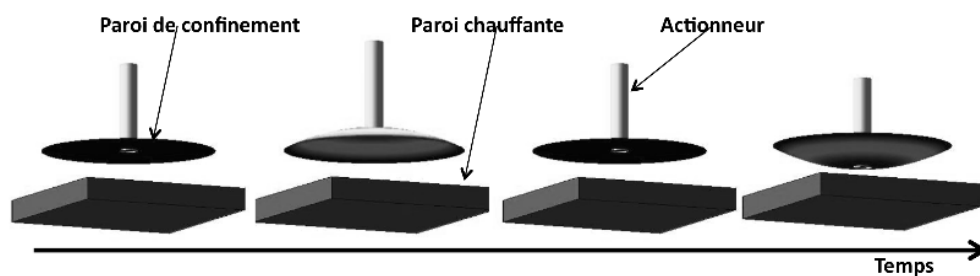


Figure 5 : Position de la membrane au cours de temps

## 5. Résultats expérimentaux

### 5.1. Courbe temporelle

La figure 6 montre l'évolution temporelle de la température sous l'effet de paliers de flux thermiques avec et sans déformation dynamique de la paroi. La surchauffe est la différence

entre la température maximum de la paroi et la température de saturation ( $36^{\circ}\text{C}$ ). Le flux critique pour un tel degré de confinement ( $e = 625\mu\text{m}$ ) est estimé à partir des travaux de Stutz et al. [2] conduisant à une valeur de  $8\text{W}/\text{cm}^2$ . La répartition de la densité de flux n'est pas connue : la densité de flux locale où se déclenche l'ébullition ne peut donc pas être évaluée. Pour cette raison, les résultats sont présentés en fonction de la densité de flux appliquée (rapport entre la puissance électrique et la surface de la résistance). Néanmoins, les résultats obtenus permettent de quantifier la surchauffe au déclenchement de façon précise et d'expliquer de manière qualitative l'influence de la déformation dynamique sur les températures de paroi.

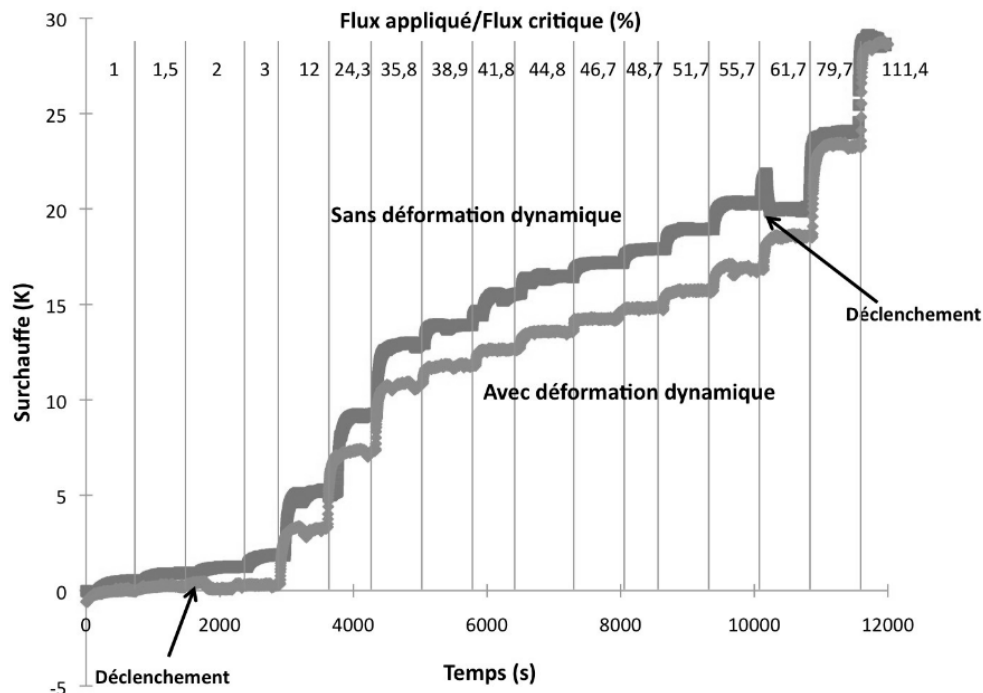


Figure 6 : Evolution temporelle de la température sous l'effet de paliers de flux sans et avec déformation dynamique de la paroi de confinement ( $e = 625\mu\text{m}$ ,  $a_0 = 210\mu\text{m}$  et  $f = 100\text{Hz}$ ). Les paliers de la densité de flux appliquée sont indiqués en fonction du temps sur la partie haute du graphique.

L'ébullition en présence de déformation dynamique de la paroi de confinement se déclenche pour une surchauffe de  $0,2^{\circ}\text{C}$  alors que, sans déformation dynamique de la paroi de confinement, l'ébullition se déclenche pour une surchauffe de  $22^{\circ}\text{C}$  (expérience de la figure 6). La diminution de la surchauffe est très importante puisque deux ordres de grandeurs séparent ces deux niveaux de surchauffe. Cette expérience avec et sans déformation de la paroi a été effectuée plusieurs fois afin de vérifier la reproductibilité des résultats, de quantifier les surchauffes moyennes au déclenchement et de les comparer au modèle.

Une autre observation remarquable peut être faite en comparant les courbes de la figure 6. Le déclenchement de l'ébullition grâce à la déformation dynamique permet une diminution de la température de paroi. La température de paroi reste plus faible avec déformation dynamique que sans et ceci jusqu'à ce que l'ébullition se déclenche dans le cas sans déformation dynamique. Ceci est cohérent avec le fait que le coefficient de transfert de chaleur en ébullition est beaucoup plus fort qu'en conduction/convection. Par contre, l'écart de températures séparant les configurations avec et sans déformation est plus faible que celui attendu : la densité de flux locale change avec le coefficient de transfert thermique et donc par la présence ou non d'ébullition. Une comparaison quantitative de l'écart de température ne pourra être réalisée qu'en connais-

sant la densité de flux locale. Il est probable que, en considérant la densité de flux réelle au niveau de la paroi plutôt que la densité de flux appliquée, les gains en terme d'intensification des transferts soient plus importants.

## 5.2. Comparaison aux modèles

Le cas de l'ébullition libre (non confinée :  $e = 2\text{cm}$ ) a été traité expérimentalement. La moyenne des surchauffes au déclenchement obtenues expérimentalement est de 22,3 K. La paroi étant polie-miroir ( $r_c = 0,1\mu\text{m}$ ), le modèle de nucléation (figure 3) prédit une surchauffe de 25 K. Les résultats expérimentaux et ceux du modèle sont cohérents. Dans le cas de l'ébullition confinée ( $e = 625\mu\text{m}$ ), la moyenne des surchauffes au déclenchement obtenue expérimentalement est de 18,5 K soit 3,8 K en dessous de celle obtenue lors de l'ébullition libre. Dans le cas de l'ébullition confinée avec déformation dynamique de la paroi de confinement, la moyenne des surchauffes au déclenchement obtenue expérimentalement est de 0,8 K. L'actionnement réduit ainsi de 17,7 K la surchauffe. Le modèle hydrodynamique (figure 2) prévoit, dans ces conditions expérimentales, une pression d'environ 0,9 bar. La courbe 3 obtenue à partir du modèle de nucléation montre que, pour une surface polie-miroir ( $r_c = 0,1\mu\text{m}$ ), la température de déclenchement de l'ébullition est d'environ 331 K pour une pression de 0,9 bar et de 334 K pour une pression de 1 bar. La déformation dynamique devrait permettre de diminuer de 3 K la surchauffe au déclenchement par rapport au cas de référence contre 17,7 K constatée expérimentalement. Selon le modèle de nucléation, pour avoir 0,8 K de surchauffe, la pression doit être de 0,4 bar.

Des différences très importantes au niveau des températures de déclenchement sont mises en évidence entre les résultats expérimentaux et les résultats théoriques lorsque l'actionnement est actif. Ces différences traduisent a priori la non prise en compte de certains mécanismes physiques qui vont dans le sens d'une favorisation de la nucléation (par exemple effets convectifs).

## 6. Conclusion

L'étude menée vise à développer une méthode active de contrôle des transferts de chaleur. Cette technique consiste à créer une déformation dynamique d'une paroi pour déclencher à une surchauffe raisonnable l'ébullition en milieu confiné. Dans cette communication, le dispositif expérimental et les résultats obtenus ont été présentés. Ces derniers ont montré que la température de déclenchement de l'ébullition peut être fortement diminuée par la déformation dynamique de la paroi de confinement. La surchauffe au déclenchement de l'ébullition obtenue expérimentalement et celle obtenue théoriquement sont du même ordre quand l'actionnement est inactif. Elles sont fortement différentes quand l'actionnement est actif. Ces écarts mettent en évidence que l'activation de la paroi n'agit pas uniquement sur le degré de métastabilité induit par la variation de pression (dans un liquide incompressible).

### Références

- [1] L. Léal, P. Lavieille, M. Miscovic, L. Tadrist, Modélisation hydrodynamique d'un fluide en espace confiné sous l'effet de la déformation entretenue d'une paroi en vue de contrôler le déclenchement de l'ébullition, *Congrès Français de Thermique*, (2010) pp 487-492
- [2] B. Stutz, M. Lallemand, F. Raimbault, J. Passos, Nucleate and transition boiling in narrow horizontal spaces, *Heat and Mass Transfer*, 45(7) (2009) pp 929-935

### Remerciements

CNRS Energie CITAMPE PR09-3.1.3-2  
FNRAE SYRTIPE