

# Ebullition sur plaque plane en microgravité

Anne HOORNAERT, Catherine COLIN\*, Wladimir BERGEZ, Olivier KANNENGIESER

Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse – UMR 5502

Allée Camille Soula – 31400 Toulouse

\* (auteur correspondant : [colin@imft.fr](mailto:colin@imft.fr))

**Résumé** - Dans le cadre d'un programme de recherche sur le comportement des ergols dans les réservoirs de lanceurs, l'ébullition sur une plaque plane de 4 cm x 3 cm a été étudiée en condition de microgravité. Des mesures du flux de chaleur transmis au liquide et de la température de la paroi ont été réalisées simultanément à des visualisations de la formation de la couche de bulles sur la paroi. Des résultats préliminaires sont présentés dans ce papier.

## Nomenclature

$C_p$	capacité thermique massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$	$T$	température, $K$
$h$	coefficient d'échange, $W.m^{-2}.K^{-1}$	$U$	tension, $V$
$h_{lv}$	chaleur latente de vaporisation, $kJ/kg$	<i>Symboles grecs</i>	
$I$	intensité, $A$	$\alpha$	diffusivité thermique, $m^2.s^{-1}$
$Ja$	Jacob number	$\rho$	masse volumique, $kg.m^{-3}$
$Pr$	Prandtl number	<i>Indices et exposants</i>	
$Q$	puissance, $W$	$L$	liquide
$q$	densité de flux thermique, $W.m^{-2}$	$p$	paroi
$S$	surface d'échange, $m^2$	$sat$	saturation

## 1. Introduction

L'ébullition nucléée libre sur une paroi est un mode de transfert de chaleur très efficace qui est utilisé dans de nombreuses applications industrielles : thermosiphons, refroidissement de composants électroniques. La modélisation du flux de chaleur échangé en ébullition nucléée reste cependant complexe. Les modèles les plus élaborés [1, 2] considèrent 3 contributions élémentaires : un flux de chaleur dû à la vaporisation des bulles, un flux dû à la conduction instationnaire dans le liquide venant remouiller la paroi après le départ des bulles, un flux de chaleur par convection naturelle ou forcée entre les sites de nucléation.

L'ébullition nucléée est également présente dans les applications spatiales qui nous intéressent plus particulièrement. En particulier dans les réservoirs des lanceurs qui sont soumis au rayonnement solaire, en phase balistique, en absence de convection naturelle on peut observer des gradients de températures significatifs au voisinage des parois même en présence d'un faible flux de chaleur. La paroi peut être localement surchauffée et de l'ébullition nucléée peut se produire à certains endroits, particulièrement dans les réservoirs cryogéniques. Il est donc crucial de pouvoir prédire le comportement des bulles de vapeur en paroi et le flux de chaleur échangé en régime d'ébullition nucléée en microgravité. Plusieurs études sur l'ébullition en microgravité ont été effectuées par le passé et les principaux résultats sont rassemblés dans deux articles de synthèse [3, 4]. Dans le cas d'expériences menées sur plaque plane tournée vers le haut, en microgravité, le déclenchement de l'ébullition se produit pour des surchauffes de paroi plus faibles qu'en gravité normale. En microgravité en l'absence de convection naturelle, le transfert de chaleur se fait principalement par conduction dans le liquide. Les tailles de bulles en microgravité sont très importantes au voisinage de la paroi. De grosses bulles stagnent sur la paroi, alimentées par la

coalescence de petites bulles se déplaçant latéralement sur la paroi. Suite à ces mécanismes de coalescence, le détachement de grosses bulles peut être observé, mais ces bulles ne quittent pas vraiment le voisinage de la paroi. Malgré des tailles de bulles très différentes en gravité normale et en microgravité, il semble que les transferts thermiques en régime d'ébullition nucléée soient comparables. Cependant les corrélations utilisées pour prédire les flux de chaleur en gravité normale ne sont pas extrapolables aux conditions de microgravité.

Le but de la présente étude est d'analyser les mécanismes de croissance et de détachement de bulles sur une paroi en microgravité dans des conditions les plus proches possibles de celles que l'on pourrait rencontrer dans des réservoirs cryogéniques de lanceurs. Les expériences en microgravité sont réalisées au cours de vols paraboliques dans l'Airbus A300 Zero G. Pour des raisons de sécurité, les expériences ne sont pas réalisées avec l'oxygène liquide LOx, ni avec l'hydrogène liquide LH2 mais avec du fréon R123 en essayant de respecter au mieux les conditions de similitude sur le nombre de Jacob qui va caractériser la quantité de vapeur produite :

$$Ja = \frac{\rho_l C_{Pl} (T_p - T_{sat})}{\rho_v h_{lv}}$$

Dans le tableau 1, les nombres de Jacob et de Prandtl sont comparés pour l'oxygène liquide LOx, l'hydrogène liquide LH2 à 3 bars dans les conditions des réservoirs et le fréon R123 à différentes pressions.

	oxygène	hydrogène	R123	R123	R123	R123	R123
<i>p</i> [bar]	3	3	1	2	4	6	10
<i>T<sub>sat</sub></i> [K]	102,0	24,58	301	321,3	335,8	362	385
<i>α<sub>l</sub></i> [m <sup>2</sup> /s]	7,08. 10 <sup>-8</sup>	8,2. 10 <sup>-8</sup>	5,07. 10 <sup>-8</sup>	4,8. 10 <sup>-8</sup>	4,4. 10 <sup>-8</sup>	4,2. 10 <sup>-8</sup>	3,9. 10 <sup>-8</sup>
<i>Pr</i>	1,89	1,80	5,46	4,81	4,19	3,87	3,52
<i>Ja</i> (Δ <i>T</i> =10K)	7,74	1,13	13,52	7,39	5,14	2,82	1,82

Tableau 1: Propriétés physiques des fluides et nombres adimensionnels

Avec le Fréon R123, les nombres de Prandtl sont plus grands que pour le LOx et le LH2 à cause de la faible diffusivité thermique du R123. Différentes valeurs du nombre de Jacob peuvent être couvertes en faisant varier la pression du R123. A 2 bars, le nombre de Jacob avec le R123 est proche de celui obtenu avec le LOx à 3 bars. La similitude en nombre de Jacob avec l'hydrogène liquide nécessiterait de travailler à des pressions supérieures à 10 bars avec le R123.

## 2. Dispositif expérimental et techniques de mesure

Le dispositif expérimental est composé de trois systèmes :

- le circuit Fréon comportant un réservoir de 7 litres pour le stockage et le dégazage du Fréon, un autre de réservoir de 7 litres connecté à la cellule d'essai et jouant le rôle de pressuriseur
- la circulation d'eau destinée à refroidir la cellule d'essai, le condenseur, le réservoir de préparation et le pressuriseur
- la cellule d'essai (figure 1) dans laquelle le phénomène d'ébullition est étudié.

### 2.1 La cellule d'essai

La cellule d'essai dans laquelle sont menées les expériences d'ébullition a une capacité de 0,7 litres. Elle est composée :

- d'un bloc principal alliage en d'aluminium,

- d'un élément chauffant (figure 2),
- des hublots de visualisation en Pyrex de 10 mm d'épaisseur,
- d'un peigne de 10 thermocouples pour mesurer le profil de température dans le fluide,
- d'un capteur de pression,
- d'un agitateur magnétique avec une chauffe annexe en partie basse.

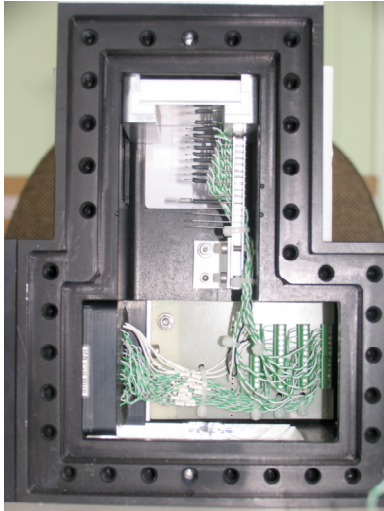


Figure 1 : Cellule d'essai

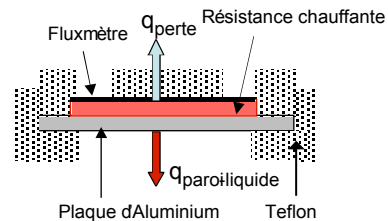


Figure 2 : Plaque chauffante et fluxmètre

L'élément chauffant (figure 2) est constitué d'une résistance ohmique de surface  $S= 3 \times 3\text{ cm}^2$  mise en contact par sa face inférieure avec une plaque d'aluminium servant de surface d'échange avec le Fréon. Le contact est assuré par une compression transmise par un sucre de Téflon situé au-dessus de l'élément chauffant. Trois thermocouples sont positionnés dans la résistance. Une tension constante  $U$  est appliquée aux bornes de la résistance et peut être modifiée entre chaque test. La puissance électrique maximale d'alimentation correspond à un flux de chaleur de l'ordre de  $2 \text{ W/cm}^2$ . Un fluxmètre CAPTEC est disposé sur la partie supérieure de la résistance. Il permet de mesurer directement la densité de flux de chaleur transmise vers le sucre de Téflon ( $q_{pertes}$ ).

Le système d'acquisition de données est composé d'un ordinateur équipé d'un convertisseur A/D PCI-703-64 contenant 64 voies et permettant une fréquence d'acquisition maximum de 100 kHz sur 14-Bit. Ce système est aussi utilisé pour contrôler l'ouverture et la fermeture des électrovalves du circuit de fréon. Les trois composantes de l'accélération pendant les paraboles sont aussi enregistrées au cours de l'expérience. L'acquisition est réalisée à 1 kHz et est pilotée par un programme développé sous Delphi Software.

Des enregistrements vidéo de la croissance de la phase vapeur sur la paroi chauffante sont obtenues avec une caméra PCO 1200hs et avec une vitesse de 50 images/s. La résolution de la caméra est de 1280 x 1024 pixels en mode plein écran. Les images sont synchronisées avec l'acquisition des données numériques.

## 2.2 Mesures du flux thermique et la température de paroi

Le flux thermique transmis au liquide par la surface 3 (Figure 3) est estimé à partir de la puissance électrique  $Q=UI$  et des pertes vers le téflon (surfaces 1). Les pertes thermiques  $Q_{pertes}$  sous la résistance chauffante 2 sont mesurées par un fluxmètre directionnel CAPTEC situé à l'interface élément chauffant/Téflon. Les pertes thermiques latérales  $Q_{lat}$  vers les autres blocs de téflon sont estimées par un calcul de conduction. Dans ce but, le système de chauffe

avec son isolation thermique a été modélisé dans COMSOL. La géométrie du système est représentée sur la figure 3. Les conditions aux limites sont (i) adiabatique entre le Téflon et le Fréon (surfaces 1), (ii) coefficient d'échange  $h$  entre la plaque d'aluminium et le Fréon (surface 3), et (iii) température fixée pour les autres frontières.

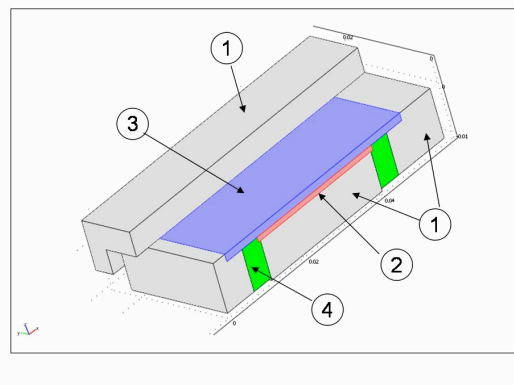


Figure 3 : Géométrie du système de chauffe (1 : Téflon ; 2 : élément chauffant ; 3 : plaque aluminium ; 4 : air).

Différentes simulations ont été effectuées pour des valeurs du coefficient d'échange Al/Fréon variant de  $200 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  à  $1200 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ . Pour chaque simulation, les puissances thermiques suivantes ont été estimées :  $Q_{pertes}$  vers le sucre de téflon,  $Q_p$  transmise au Fréon,  $Q_{lat}$ , les pertes latérales Al/Téflon, et enfin  $Q_{air}$  transmis vers l'air en contact avec la résistance chauffante. Sur la figure 4, la proportion des pertes thermiques latérales et arrières variées par rapport à la puissance électrique totale est portée pour différentes valeurs du coefficient d'échange  $h$ . On remarque que pour les faibles coefficients, elles peuvent atteindre 30 %.

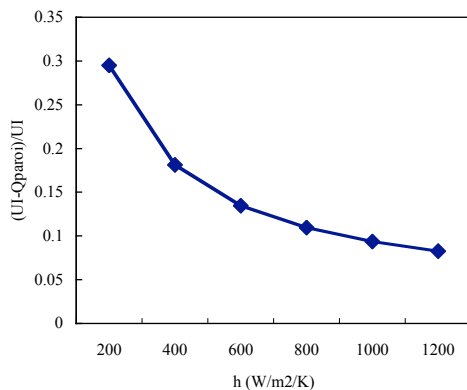


Figure 4 : Evolution de la fraction relative de la puissance thermique perdue avec le coefficient d'échange  $h$  pour  $UI=11,5\text{kW}$ .

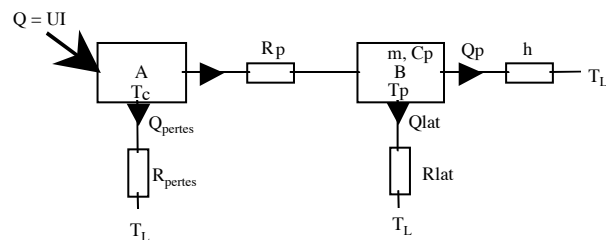


Figure 5 : Schéma de calcul des flux thermiques ; A : élément chauffant ; B : plaque aluminium ;  $R_{pertes}$ ,  $R_{lat}$ ,  $R_p$  et  $h$  = résistances thermiques entre A et le sucre de Téflon, entre B et le Téflon, entre B et A, et entre B et le Fréon ;  $T_L$  température ambiante.

Pour traiter les données en régime stationnaire, on peut modéliser très simplement la géométrie de la figure 3 par un simple modèle algébrique basé sur un assemblage de résistances thermiques (figure 5). A partir de ce modèle, on estime  $Q_{paroi}$  et la température de la paroi,  $T_p$ , à partir des mesures de  $Q$  ( $= UI$  puissance électrique),  $Q_{pertes}$  et  $T_c$  (température de l'élément chauffant). Les résistances thermiques sont calculées à partir des simulations. Elles varient légèrement avec le coefficient  $h$ , mais pour des variations de  $h$  de l'ordre de  $400 \pm 100 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ , ces variations restent inférieures de manière relative à  $10^{-2}$ . Lorsque l'ébullition se déclenche, on observe une brusque diminution de  $T_p$  qui doit être prise en compte dans l'estimation du flux de chaleur transmis au liquide.

### 3. Résultats expérimentaux préliminaires

Une première série d'expériences en microgravité a été effectuée en 2006 à bord de l'Airbus A300 ZéroG au cours d'une campagne de vols parabolique. Les expériences ont été réalisées pour des pressions de 1,1 à 4 bars en ébullition sous-refroidie ou surchauffée. La différence entre la température de saturation  $T_{sat}$  et la température  $T_L$  du liquide loin de la paroi chauffée (en dehors de la couche limite thermique) a varié entre  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  et  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Les puissances thermiques imposées par la résistance ohmique  $Q$  étaient comprises entre 5 W et 20 W, ce qui correspondait à des densités de flux de chaleur entre  $0,3\text{ W/cm}^2$  et  $1,5\text{ W/cm}^2$ . Les surchauffes de paroi (écart entre la température de paroi  $T_p$  et  $T_{sat}$ ) étaient comprises entre  $5\text{ }^\circ\text{C}$  et  $30\text{ }^\circ\text{C}$ .

Au cours de chaque parabole, la chauffe du système était activée avant le début de la phase de microgravité. Pour déclencher rapidement l'ébullition, pendant la période de microgravité limitée à 20 s, la cellule d'essai a été dépressurisée dans la plupart des essais. Les évolutions du flux de chaleur et des différentes températures ont alors été enregistrées de manière synchronisée à l'enregistrement vidéo. Une fois la parabole terminée, la chauffe était stoppée, la vapeur était recondensée par augmentation de la pression dans la cellule d'essai. Les faibles durées de microgravité n'ont pas permis d'obtenir un régime d'ébullition nucléée stationnaire.

Au cours des différentes expériences, deux régimes d'ébullition ont été observés. En régime sous-refroidi où  $T_L < T_{sat}$ , la quantité de vapeur produite est faible. Les bulles croissent sur la paroi, peuvent coalescer et se recondensent partiellement. En régime d'ébullition explosive, la température  $T_L$  est largement supérieure à la température de saturation. Ce régime est obtenu par une dépressurisation de la cellule d'essai. Il conduit à la formation d'une quantité importante de vapeur. Les surchauffes  $T_p - T_{sat}$  minimales, nécessaires au déclenchement de l'ébullition, étaient comprises entre  $5\text{ }^\circ\text{C}$  et  $25\text{ }^\circ\text{C}$  et fonction du sous-refroidissement du liquide. Des résultats expérimentaux préliminaires sont présentés pour un essai sur les figures 6 à 8.

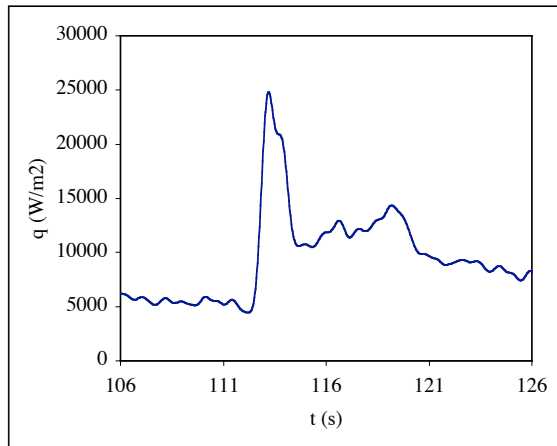


Figure 6: Densité de flux de chaleur ( $\text{W/m}^2$ ) transmis au liquide en fonction du temps (s)

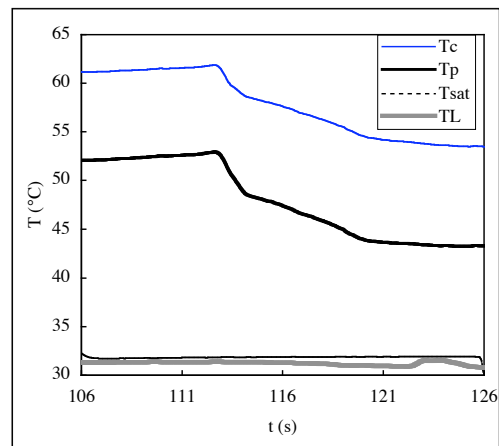


Figure 7: Températures de l'élément chauffant ( $T_c$ ), de la paroi ( $T_p$ ), de saturation ( $T_{sat}$ ), du liquide ( $T_L$ ) à 30 mm de la paroi

La pression à l'intérieur de la cellule d'essai a été réduite à 1,15 bars et l'ébullition a démarré à l'instant  $t = 113\text{ s}$ . Une ébullition explosive avec production d'une grande quantité de vapeur a été observée. Sur la figure 6 est représentée la densité de flux de chaleur transmise au liquide en fonction du temps. Au déclenchement de l'ébullition, le flux chaleur augmente brutalement et la température de la paroi chute. Les évolutions des différentes températures sont portées sur la figure 7. Sur cet essai, la surchauffe de paroi au

déclenchement est de l'ordre de 30 °C. Les températures dans le liquide sont partout supérieures à la température de saturation. La chute de la température de paroi est observée tout au long de l'expérience. L'ébullition absorbe une grande quantité d'énergie, supérieure à celle fournie par la résistance chauffante. L'énergie stockée sous forme de chaleur sensible dans la plaque en aluminium et le téflon est libérée et transmise au fluide. A partir de  $t = 120s$ , la quantité d'énergie disponible n'est plus suffisante pour maintenir l'ébullition et la quantité de vapeur sur la paroi diminue (figure 8).

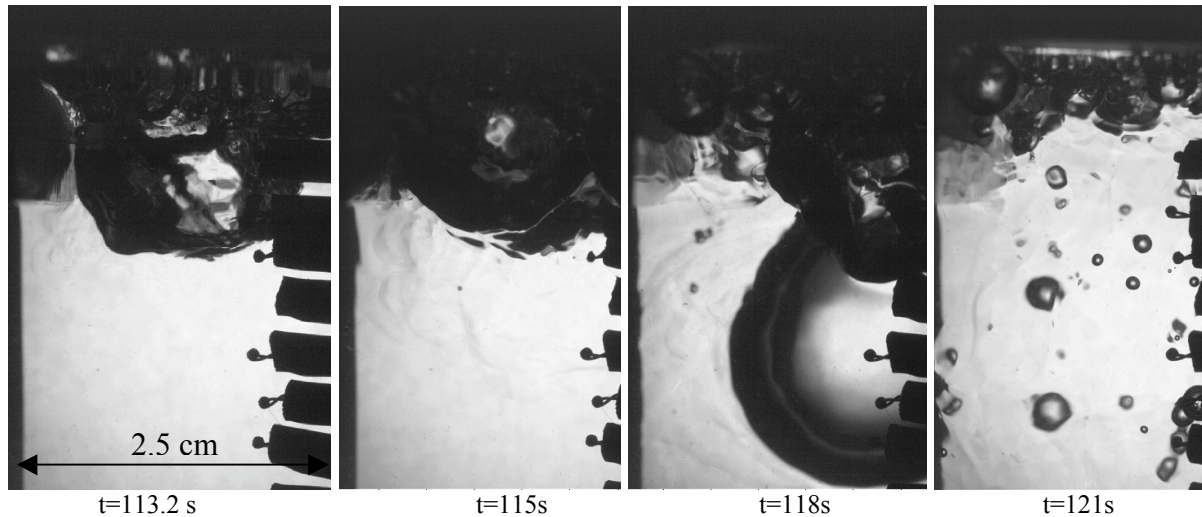


Figure 8: Visualisations de l'ébullition en microgravité.

#### 4. Conclusion

Une première série d'expériences d'ébullition sur une plaque plane en microgravité a été réalisée. Compte tenu des faibles durées de microgravité, afin de déclencher rapidement l'ébullition, la cellule d'essai a été dépressurisée. Deux régimes d'ébullition ont été observés en fonction des conditions expérimentales : ébullition nucléée sous refroidie et ébullition explosive. Afin de mesurer le coefficient d'échange dans les deux régimes d'ébullition un fluxmètre a été placé au dos de la résistance chauffante de manière à estimer les pertes thermiques et des thermocouples ont été insérés dans la résistance chauffante. Des simulations numériques ont permis de montrer que les pertes thermiques n'étaient pas négligeables et devaient être prises en compte pour une mesure précise du coefficient d'échange. Un modèle de résistances thermiques a été établi en régime stationnaire. Les résultats de la campagne de vols paraboliques sont en cours d'exploitation. Seuls quelques résultats préliminaires sont donc présentés.

**Remerciements** : les auteurs souhaitent remercier le Département des Lanceurs du Centre National d'Etudes Spatiales pour avoir financé cette étude dans le cadre du programme franco-allemand COMPERE (COMPortement des ERgols dans les REservoirs).

#### Références

- [1] R.L. Judd , K.S. Hwang, A comprehensive model for nucleate pool boiling heat transfer including microlayer evaporation, *Journal of heat Transfer*, (1976), 623-629
- [2] V.K. Dhir, Boiling heat transfer, *Annu. Rev. Fluid. Mech*, (1998), 30: 365-401
- [3] J. Straub, Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity, *Advances in heat transfer*, Academic Press, (2001), 35, 57-172.
- [4] P. Di Marco, W. Grassi, Pool boiling in reduced gravity, *Multiphase Science and Technology*, (2001) 13, 77-104.