

Etude expérimentale de l'ébullition en vase de l'eau à pression subatmosphérique : Nouveau capteur pour l'analyse locale de la dynamique de croissance des bulles

Romuald RULLIERE, Jocelyn BONJOUR

À partir des travaux de thèse de : Florine GIRAUD (2015), Sandra MICHAIE (2018), Karolina WOJTASIK

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

Identification de systèmes innovants de production de froid

=> **Systèmes à sorption** = alternative prometteuse
pour les applications de climatisation

Evaporateur utilisant l'**eau** comme fluide frigorigène :
 $P_{\text{sat}}(T = 10 \text{ °C}) \approx 1 \text{ kPa}$

→ Dimensionnement empirique car, à ces faibles
pressions, les phénomènes de transfert de chaleur par
ébullition sont mal connus → Composants peu compacts
méritant d'être optimisés (*Projet ANR ECOSS*).

→ Modélisation de l'échangeur s'appuie sur une bonne
compréhension des mécanismes fondamentaux à l'origine
de son fonctionnement

Recherche sur les transferts thermiques par ébullition

Etat de l'art : Description fine des processus de base de
l'ébullition à $P \geq P_{\text{atm}}$

Forts acquis expérimentaux au CETHIL

→ **Approche expérimentale**

→ Objectif : Revisiter les connaissances des mécanismes
fondamentaux de naissance, croissance, détachement de
bulles

Originalité : atteindre cet objectif en étudiant l'ébullition
à (très) faible pression



Particularités de l'ébullition à basse pression

Propriétés thermophysiques de l'eau à saturation

$T_{\text{sat}} =$	100°C	10°C
$P_{\text{sat}} =$	101 kPa	1,23 kPa
$\rho_l =$	958 kg/m ³	999 kg/m ³
$c_{p,l} =$	4,22 kJ/kg.K	4,20 kJ/kg.K
$\lambda_l =$	0,68 W/m.K	0,58 W/m.K
$\Delta h_{lv} =$	2256 kJ/kg	2477 kJ/kg

La chaleur latente augmente de 10%

$\mu_l =$	2,8x10 ⁻⁴ Pa.s	13,1x10 ⁻⁴ Pa.s
-----------	---------------------------	----------------------------

La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6

$\sigma =$	58,9x10 ⁻³ N/m	74,2x10 ⁻³ N/m
------------	---------------------------	---------------------------

La tension superficielle augmente de 25%

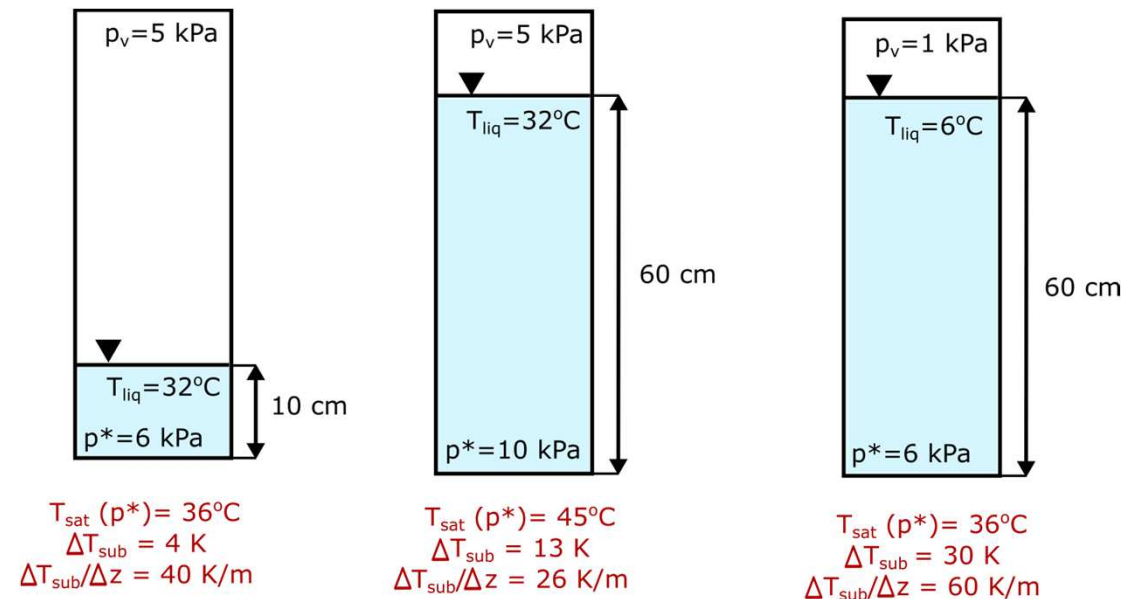
$\rho_v =$	0,598 kg/m ³	0,0094 kg/m ³
------------	-------------------------	--------------------------

La densité vapeur chute d'un facteur 60

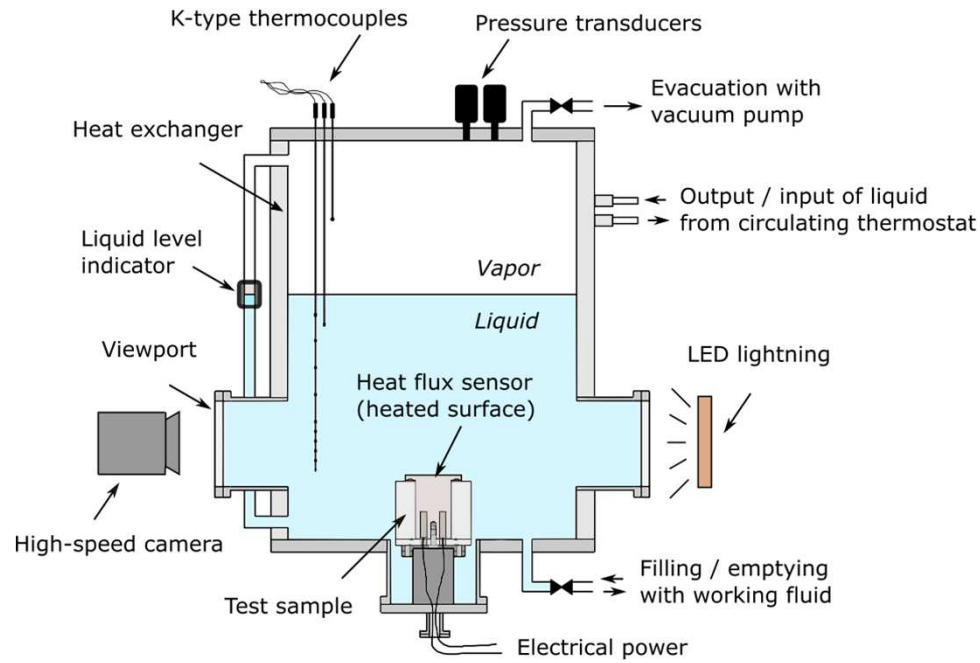
(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

L'environnement

Basse pression = Sous refroidissement induit par la pression



Dispositif expérimental



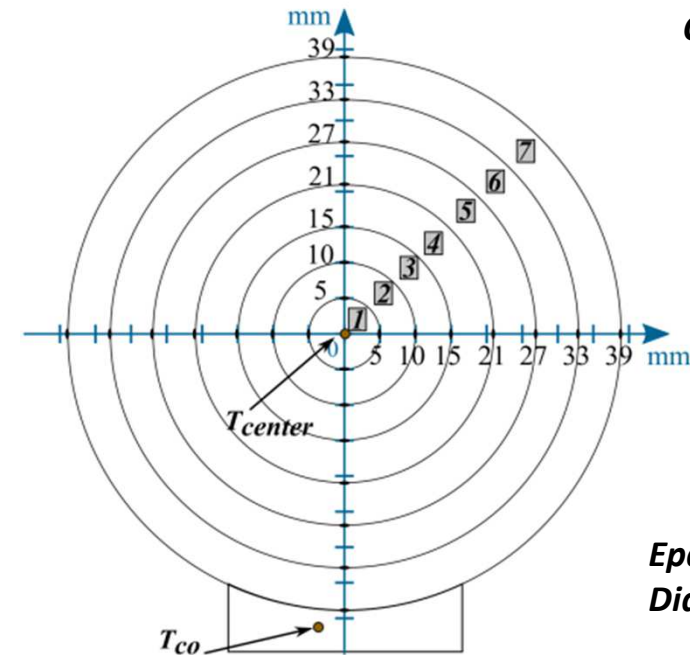
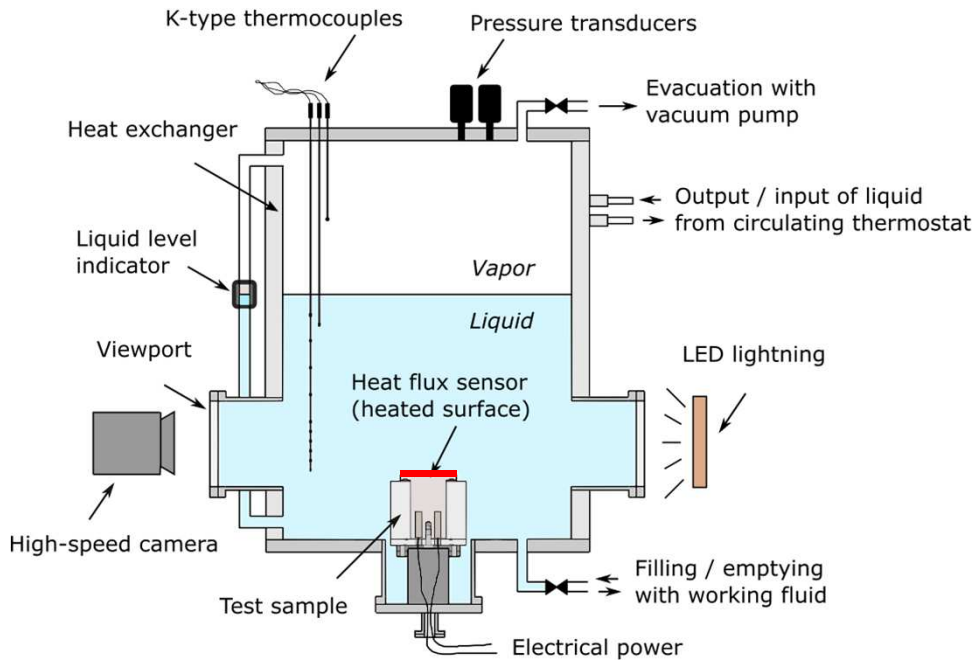
(a)



(b)

Dispositif expérimental

Nouveau capteur : Fluxmètre multizones concentriques



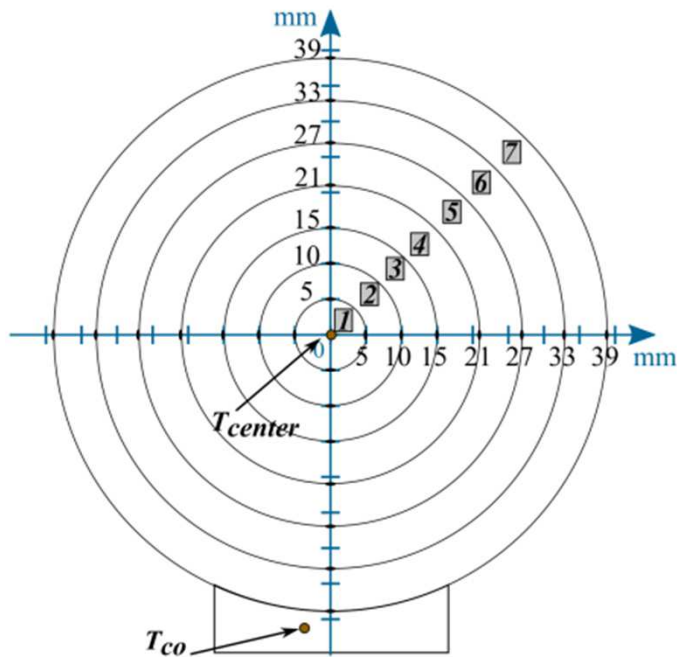
Réalisé par
CAPTEC

Épaisseur : 0,5mm
Diamètre : 78 mm

- ◆ 7 zones concentriques de mesure => 7 capteurs de densité de flux indépendants (HF1 à HF7)
- ◆ 1 mesure de température au niveau de la connexion
(permettant la détermination de la température au centre : $T_{centre} = T_{co} + \Delta T$)

Dispositif expérimental

Nouveau capteur : Fluxmètre multizones concentriques



Sensitivities of measurement zones of the heat flux sensor.

Zone number	s, $\mu\text{V} (\text{W m}^{-2})^{-1}$
Zone 1	0.667
Zone 2	2.50
Zone 3	4.14
Zone 4	8.02
Zone 5	11.7
Zone 6	14.1
Zone 7	13.8

Incertitude relative du fluxmètre : $\pm 3\%$

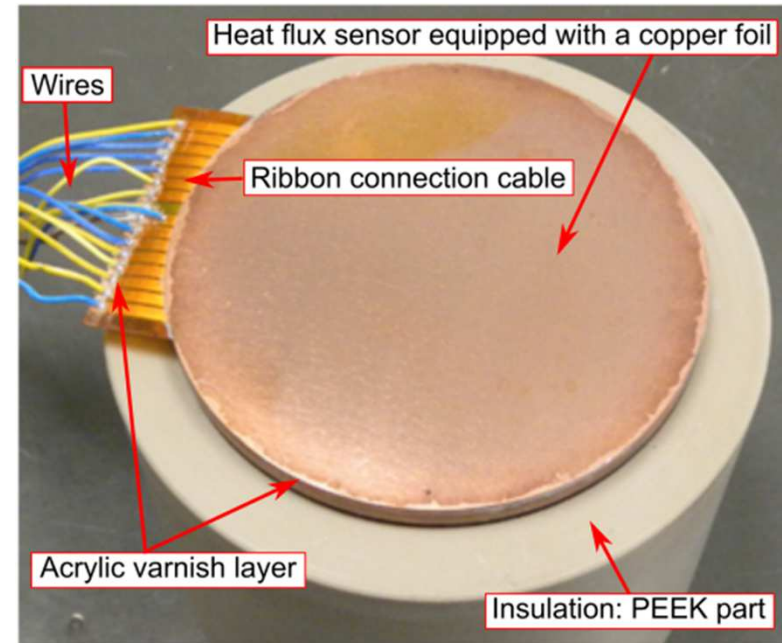
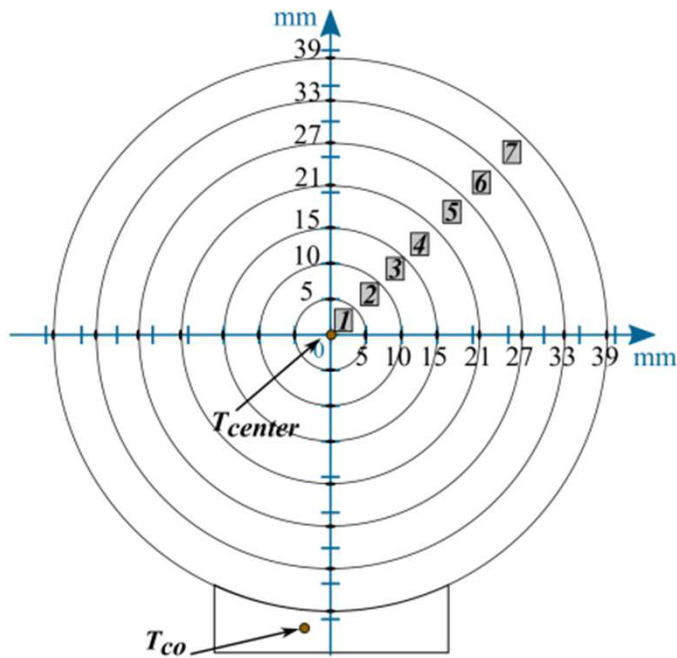
Sensibilité du ΔT : $32 \mu\text{V.K}^{-1}$

Incertitude sur T_{co} : $\pm 0,5^\circ\text{C}$

Fréquence d'acquisition de la caméra et du fluxmètre : 2 ms

Dispositif expérimental

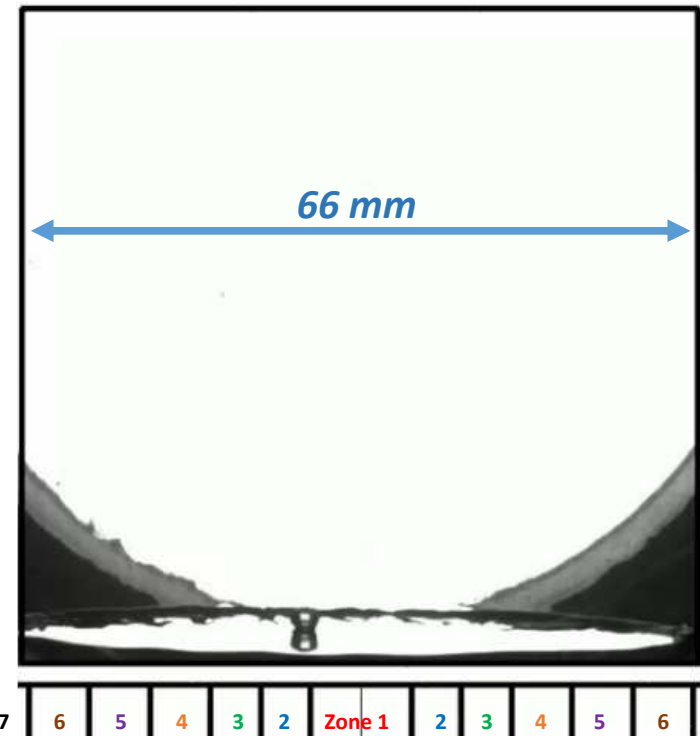
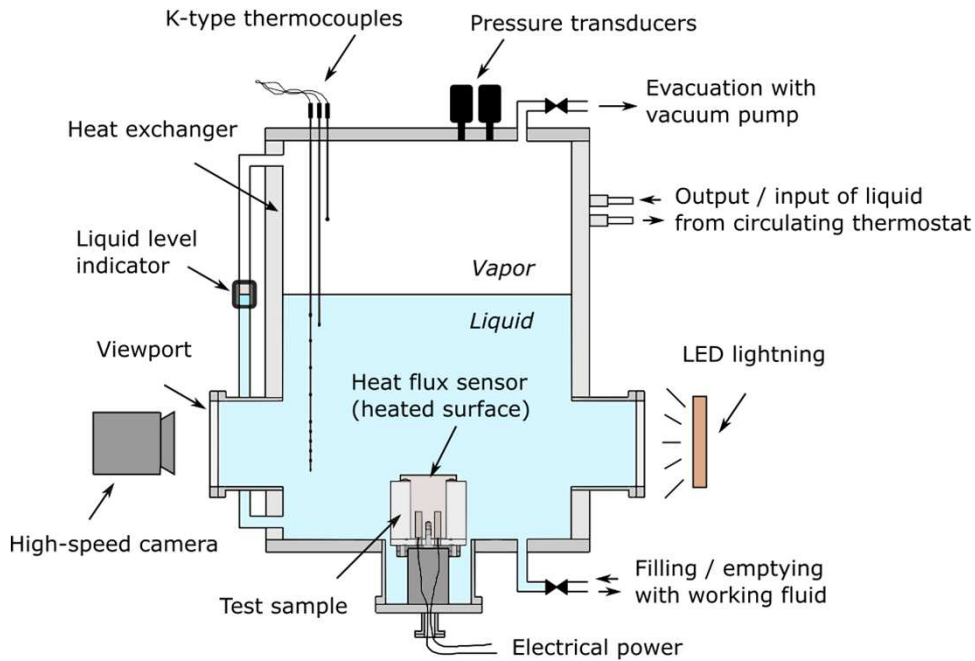
Nouveau capteur : Fluxmètre multizones concentriques



- ◆ Capteur recouvert d'un feuillet en cuivre (épaisseur : 0,3 mm) poli miroir ($R_a = 0,4 \mu\text{m}$)
- ◆ 1 site de nucléation artificiel au centre (diamètre : $116 \mu\text{m}$, profondeur : $160 \mu\text{m}$)

Exemple de réponse du capteur

Pression de vapeur = 4,1 kPa
Hauteur de liquide = 15 cm
Flux imposé = 220 W

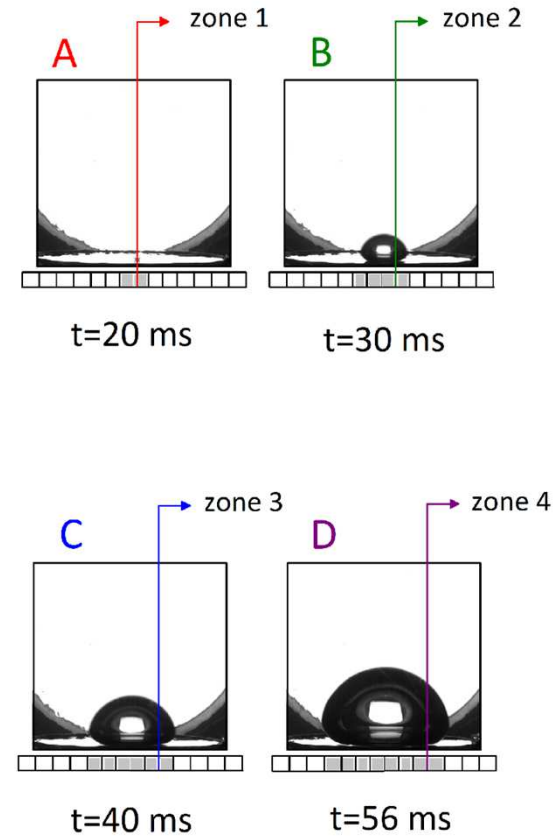
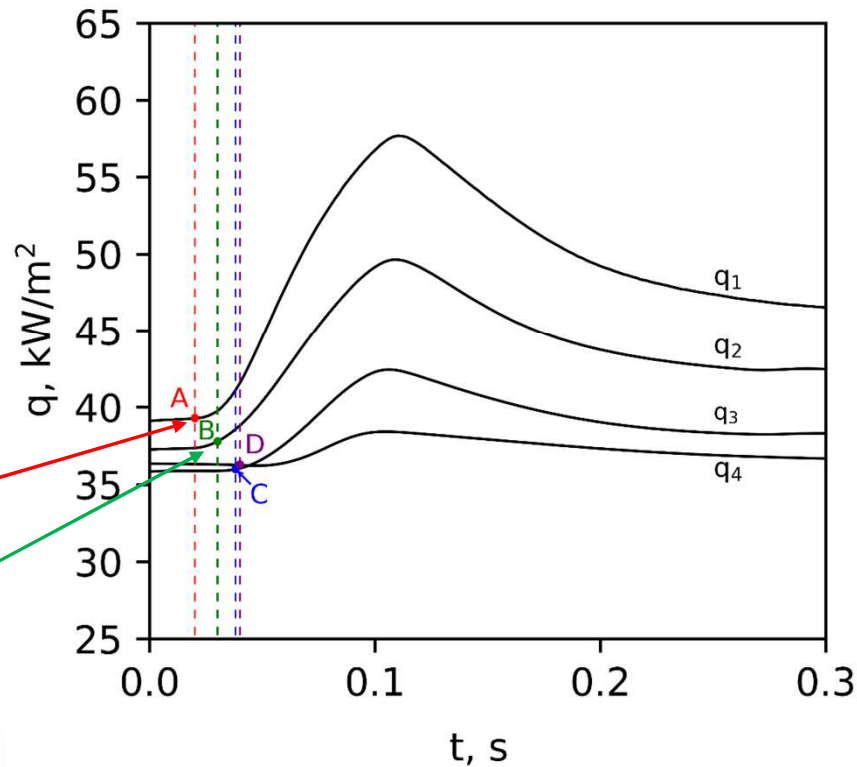


Synchronisation
des acquisitions vidéo
et des mesures du fluxmètre

Exemple de réponse du capteur

Pression de vapeur = 4,1 kPa
Hauteur de liquide = 15 cm
Flux imposé = 220 W

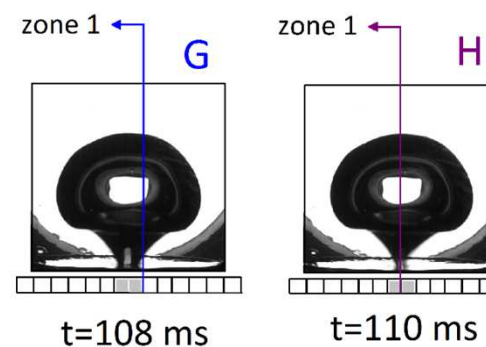
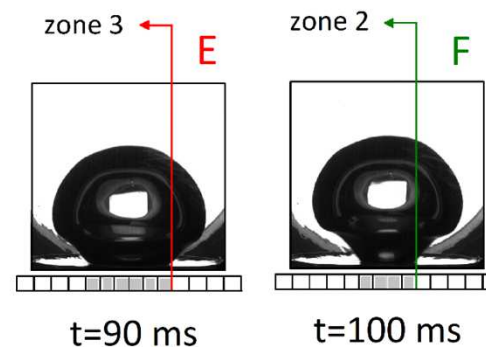
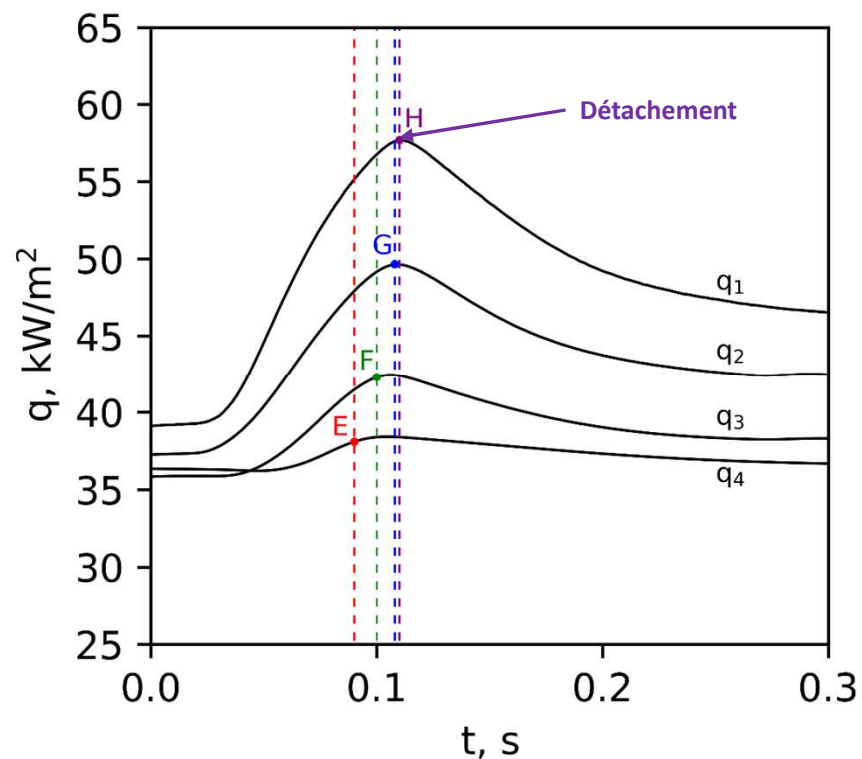
Analyse de la dynamique de croissance de bulle : Expansion du pied de bulle



Exemple de réponse du capteur

Pression de vapeur = 4,1 kPa
Hauteur de liquide = 15 cm
Flux imposé = 220 W

Analyse de la dynamique de croissance de bulle : Contraction du pied de bulle





Particularités de l'ébullition à basse pression

Propriétés thermophysiques de l'eau à saturation

$T_{\text{sat}} =$	100°C	10°C
$P_{\text{sat}} =$	101 kPa	1,23 kPa
$\rho_l =$	958 kg/m ³	999 kg/m ³
$c_{p,l} =$	4,22 kJ/kg.K	4,20 kJ/kg.K
$\lambda_l =$	0,68 W/m.K	0,58 W/m.K
$\Delta h_{lv} =$	2256 kJ/kg	2477 kJ/kg

La chaleur latente augmente de 10%

$\mu_l =$	2,8x10 ⁻⁴ Pa.s	13,1x10 ⁻⁴ Pa.s
-----------	---------------------------	----------------------------

La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6

$\sigma =$	58,9x10 ⁻³ N/m	74,2x10 ⁻³ N/m
------------	---------------------------	---------------------------

La tension superficielle augmente de 25%

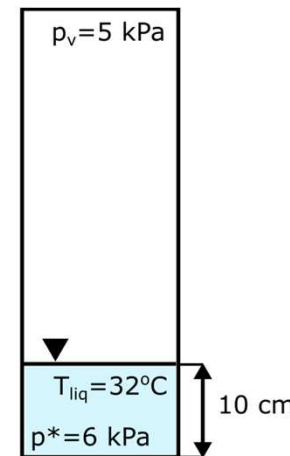
$\rho_v =$	0,598 kg/m ³	0,0094 kg/m ³
------------	-------------------------	--------------------------

La densité vapeur chute d'un facteur 60

(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

L'environnement

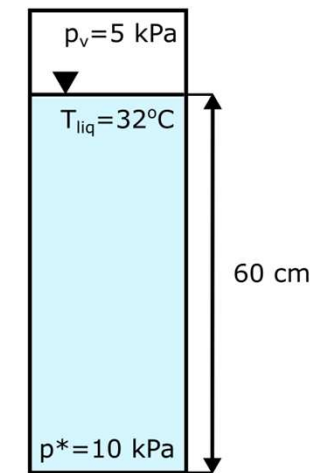
Basse pression = Sous refroidissement induit par la pression



$$T_{\text{sat}}(p^*) = 36^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{sub}} = 4 \text{ K}$$

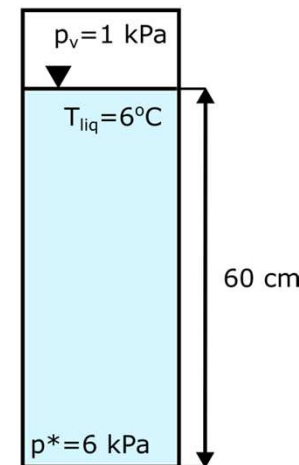
$$\Delta T_{\text{sub}}/\Delta z = 40 \text{ K/m}$$



$$T_{\text{sat}}(p^*) = 45^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{sub}} = 13 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{sub}}/\Delta z = 26 \text{ K/m}$$



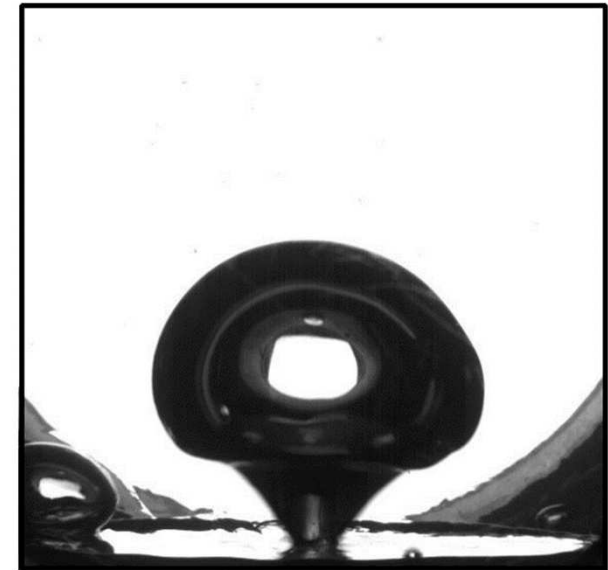
$$T_{\text{sat}}(p^*) = 36^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_{\text{sub}} = 30 \text{ K}$$

$$\Delta T_{\text{sub}}/\Delta z = 60 \text{ K/m}$$

Influence de la pression de vapeur

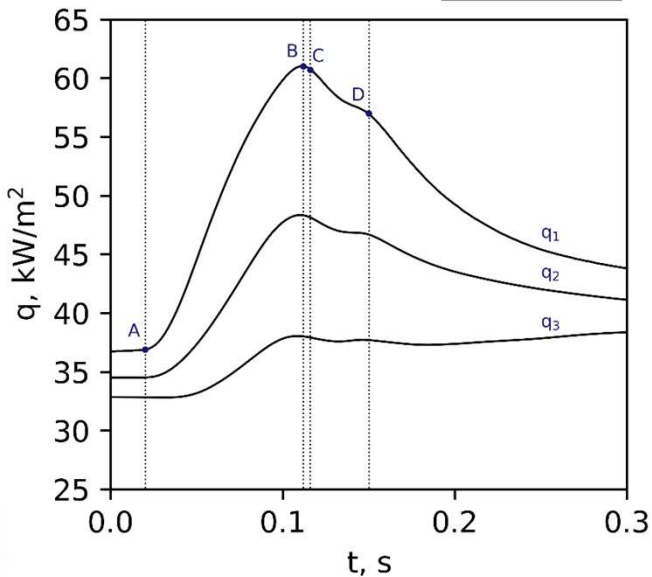
- Pression de vapeur (p_v) : 2,6 kPa - 3,6 kPa - 4,1 kPa
- Hauteur de liquide fixe : 15 cm
- Puissance imposée fixe : 220 W
- Fréquence d'acquisition : 0,002 s



➔ Mise en évidence de 3 « régimes » d'ébullition
Complémentarité de la visualisation et de la signature thermique

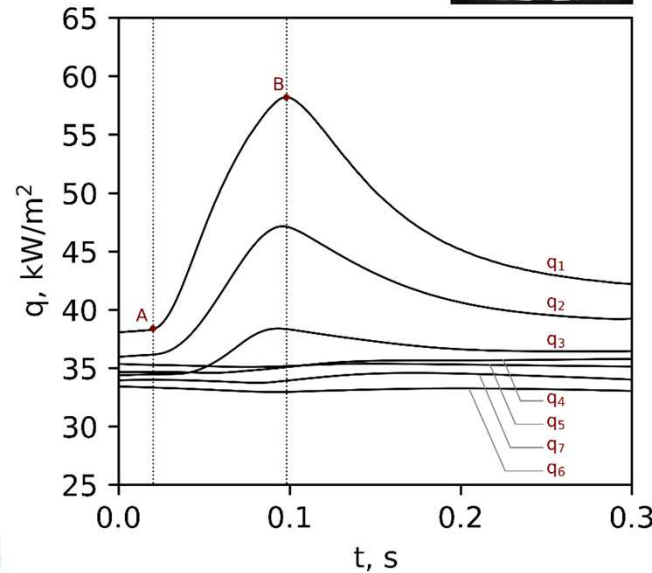
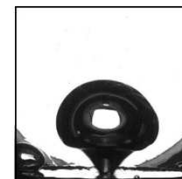
1) Bulle en forme de « champignon »

$p_v = 2,6 \text{ kPa}$



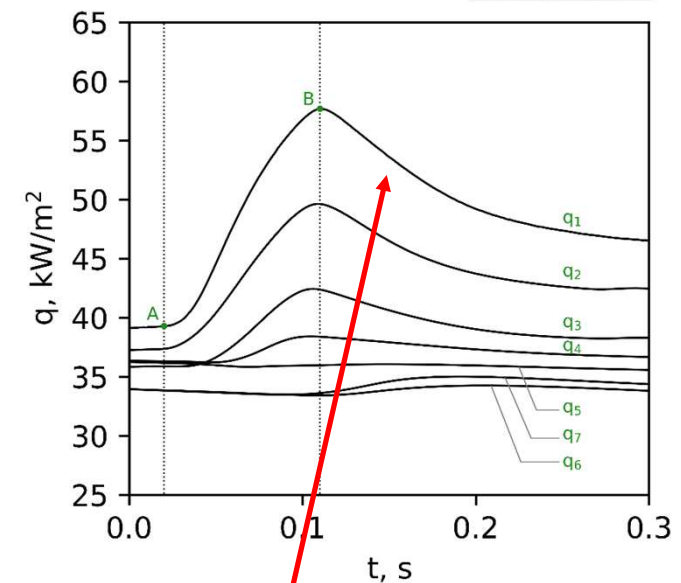
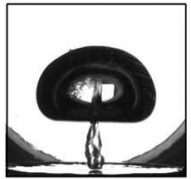
2) Bulle en forme de sphéroïde aplatie

$p_v = 3,6 \text{ kPa}$



3) Bulle en forme de « champignon » par Cavitation

$p_v = 4,1 \text{ kPa}$



La « signature thermique » permet de mettre en évidence la formation de la seconde bulle par cavitation



Particularités de l'ébullition à basse pression

Propriétés thermophysiques de l'eau à saturation

$T_{\text{sat}} =$	100°C	10°C
$P_{\text{sat}} =$	101 kPa	1,23 kPa
$\rho_l =$	958 kg/m ³	999 kg/m ³
$c_{p,l} =$	4,22 kJ/kg.K	4,20 kJ/kg.K
$\lambda_l =$	0,68 W/m.K	0,58 W/m.K
$\Delta h_{lv} =$	2256 kJ/kg	2477 kJ/kg

La chaleur latente augmente de 10%

$\mu_l =$	2,8x10 ⁻⁴ Pa.s	13,1x10 ⁻⁴ Pa.s
-----------	---------------------------	----------------------------

La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6

$\sigma =$	58,9x10 ⁻³ N/m	74,2x10 ⁻³ N/m
------------	---------------------------	---------------------------

La tension superficielle augmente de 25%

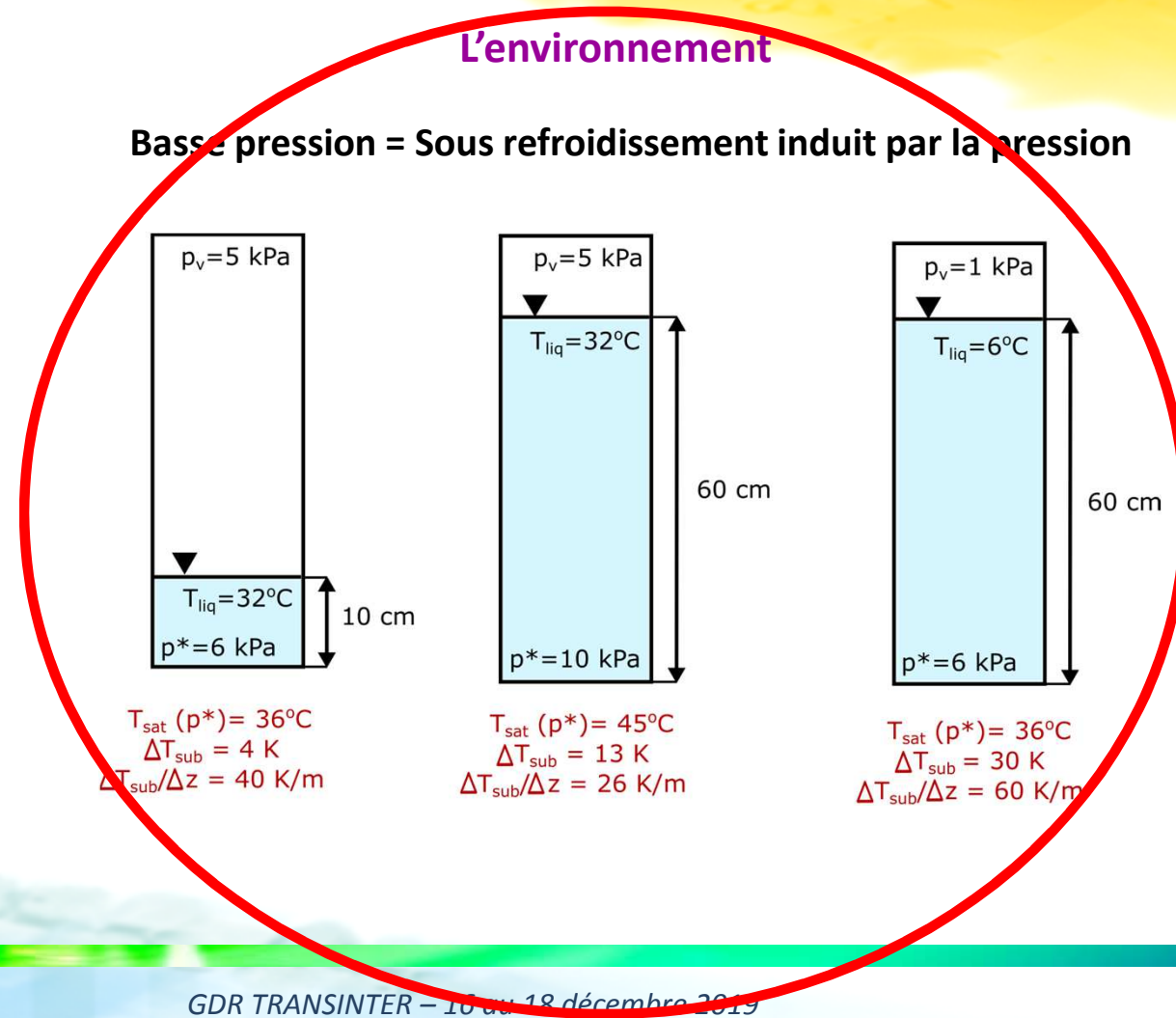
$\rho_v =$	0,598 kg/m ³	0,0094 kg/m ³
------------	-------------------------	--------------------------

La densité vapeur chute d'un facteur 60

(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

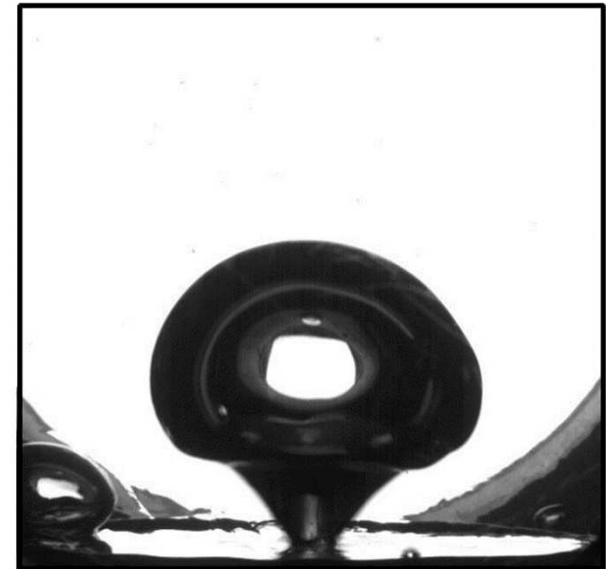
L'environnement

Basse pression = Sous refroidissement induit par la pression



Influence de la hauteur de liquide

- Pression de vapeur (p_v) fixe : 3,6 kPa
- Hauteur de liquide : 2 cm - 15 cm – 28 cm
- Puissance imposée fixe : 220 W
- Fréquence d'acquisition : 0,002 s



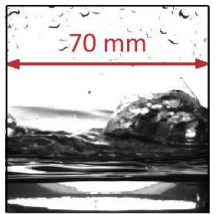
Influence de la hauteur de liquide

Pression de vapeur = 3,6 kPa
Flux imposé = 220 W

HI = 2 cm

$t_{\text{bubble}} = 112 \text{ ms}$

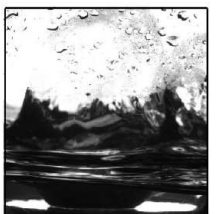
(1) t=0 ms



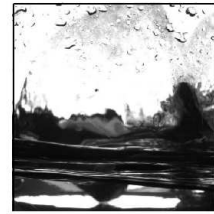
(2) t=24 ms



(3) t=60 ms



(4) t=112 ms



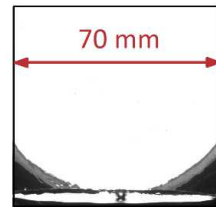
$p_{\text{wall}} = 3.8 \text{ kPa}$

$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 1 \text{ K}$

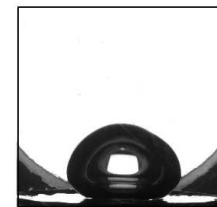
HI = 15 cm

$t_{\text{bubble}} = 78 \text{ ms}$

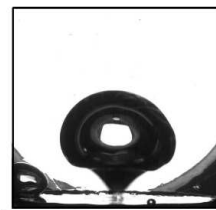
(1) t=0 ms



(2) t=40 ms



(3) t=78 ms



(4) t=90 ms



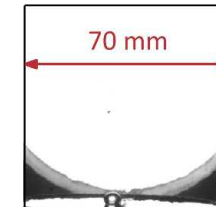
$p_{\text{wall}} = 5.1 \text{ kPa}$

$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 6 \text{ K}$

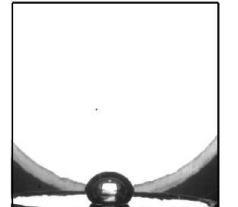
HI = 28 cm

$t_{\text{bubble}} = 28 \text{ ms}$

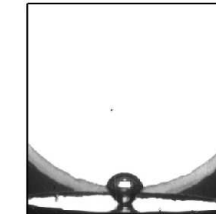
(1) t=0 ms



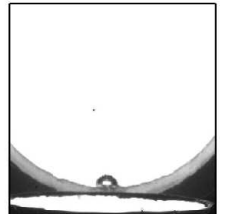
(2) t=20 ms



(3) t=28 ms



(4) t=32 ms



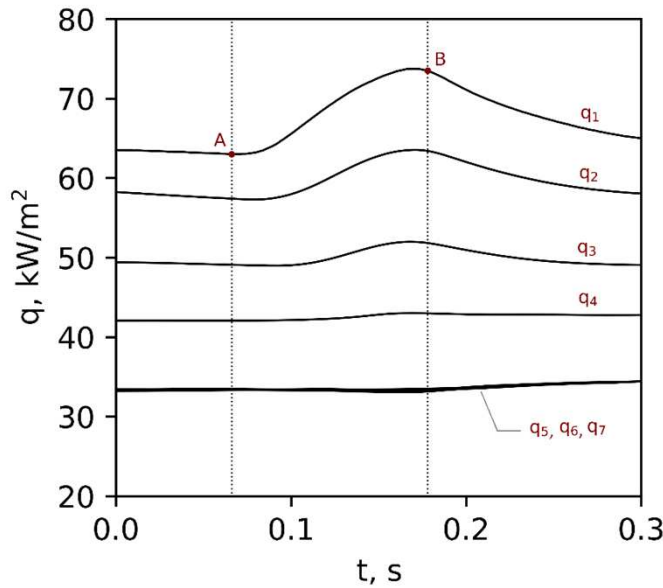
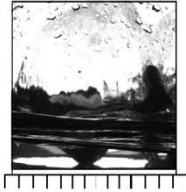
$p_{\text{wall}} = 6.3 \text{ kPa}$

$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 10 \text{ K}$

Influence de la hauteur de liquide

Pression de vapeur = 3,6 kPa
Flux imposé = 220 W

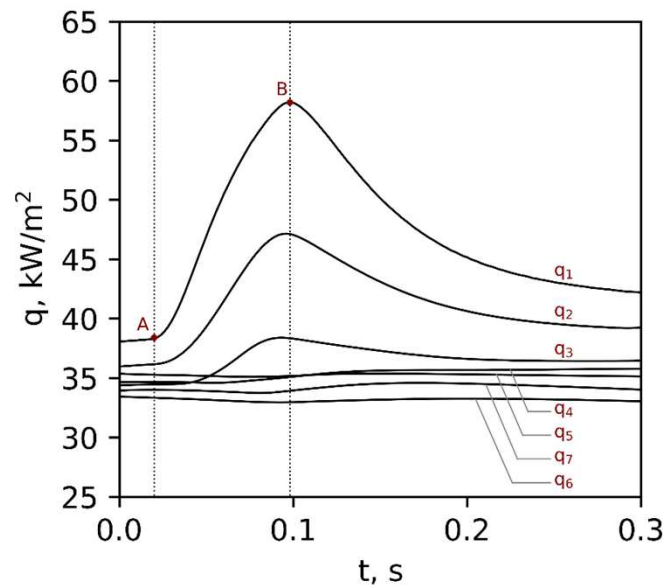
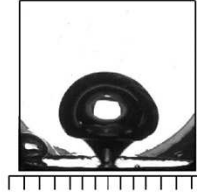
HI = 2 cm



$$p_{\text{wall}} = 3.8 \text{ kPa}$$

$$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 1 \text{ K}$$

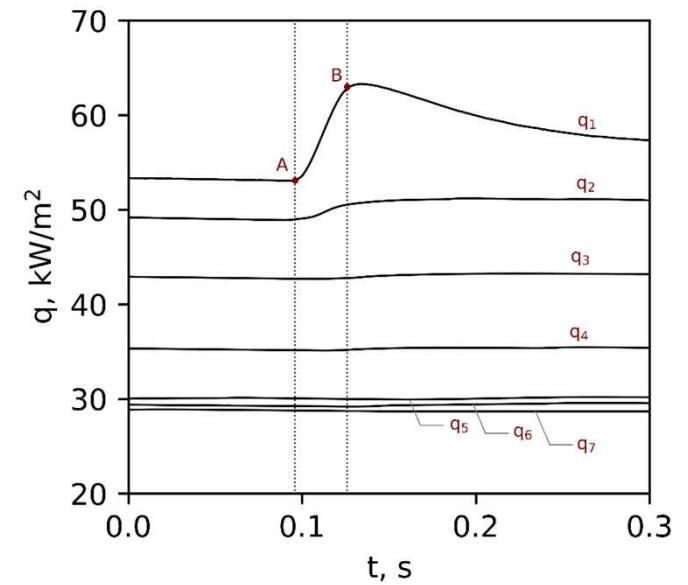
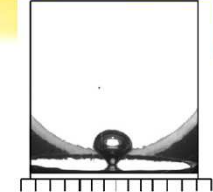
HI = 15 cm



$$p_{\text{wall}} = 5.1 \text{ kPa}$$

$$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 6 \text{ K}$$

HI = 28 cm



$$p_{\text{wall}} = 6.3 \text{ kPa}$$

$$\Delta T_{\text{sub(wall)}} = 10 \text{ K}$$

Conclusion et perspectives

Aspect fondamental

Mise en évidence des spécificités de l'ébullition de l'eau à basse pression :

- ⇒ Bulle de taille centimétrique ayant une forme de sphéroïde aplatie voire, après le détachement, de champignon (jet de liquide/ germe de vapeur)
- ⇒ Nouvel éclairage sur les mécanismes d'ébullition en augmentant d'au moins un ordre de grandeur les échelles temporelles et spatiales
- ⇒ Sous refroidissement induit par la pression (importance de la hauteur de liquide)

Intérêt de l'utilisation d'un fluxmètre multizones concentriques synchronisé avec une caméra rapide permettant de suivre le transfert thermique local lors de la croissance de la bulle

- ⇒ Suivi du déplacement du pied de bulle (de la nucléation jusqu'au détachement) et détermination du transfert local
- ⇒ Mise en évidence de bulle par cavitation

Aspect applicatif

- ⇒ Risque d'assèchement rapide de la paroi dû à la taille des bulles
- ⇒ Risque de fatigue du matériau due également aux fortes fluctuations de la surchauffe pariétale

Enjeux futurs

- ⇒ Etude de l'ébullition sur une surface rugueuse (eau et autres fluides)
- ⇒ Modélisation physique des forces mises en jeu et modélisation des transferts de chaleur
- ⇒ Recommandations pour la conception d'évaporateurs compacts : espacement entre les plaques ou tubes, niveau de remplissage, ...