

# 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 <sup>3</sup>	999 kg/m <sup>3</sup>
$c_{p,l} =$	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 <sup>-4</sup> Pa.s	13,1x10 <sup>-4</sup> Pa.s
-----------	---------------------------	----------------------------

**La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6**

$\sigma =$	58,9x10 <sup>-3</sup> N/m	74,2x10 <sup>-3</sup> N/m
------------	---------------------------	---------------------------

**La tension superficielle augmente de 25%**

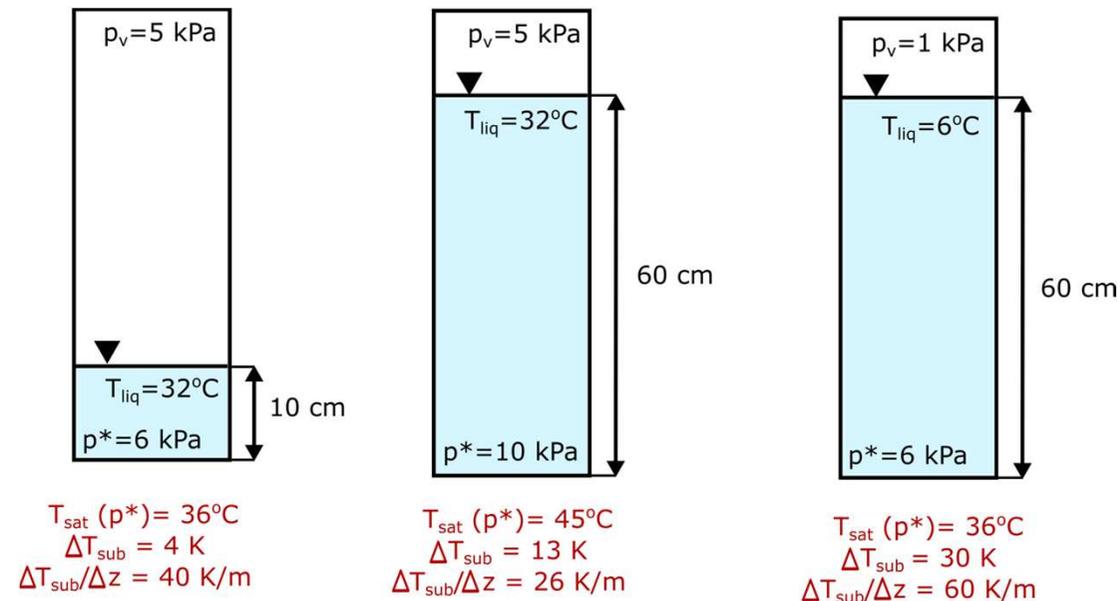
$\rho_v =$	0,598 kg/m <sup>3</sup>	0,0094 kg/m <sup>3</sup>
------------	-------------------------	--------------------------

**La densité vapeur chute d'un facteur 60**

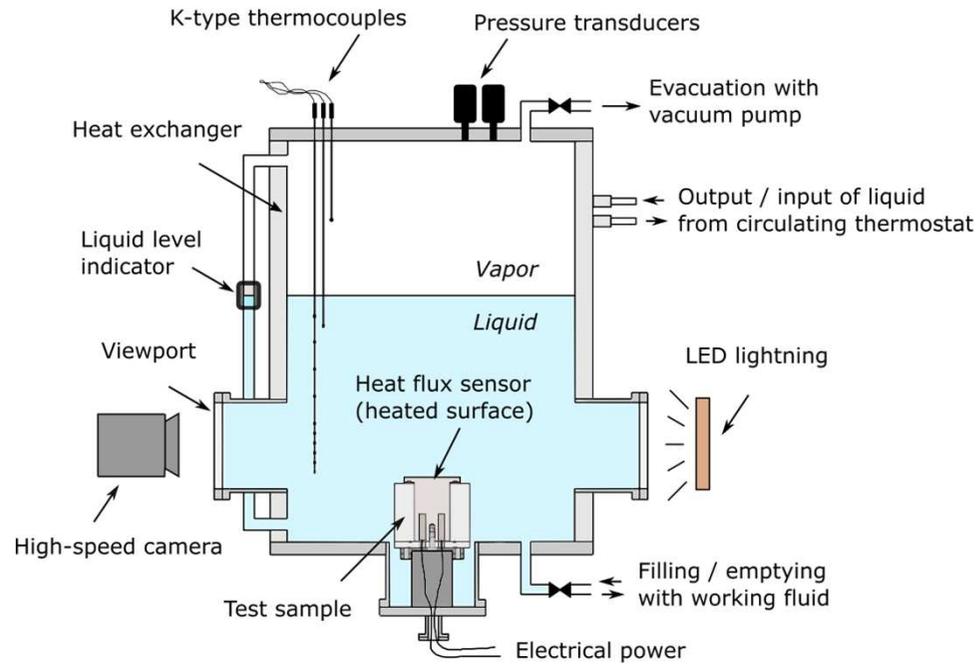
(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

## L'environnement

**Basse pression = Sous refroidissement induit par la pression**



# Dispositif expérimental



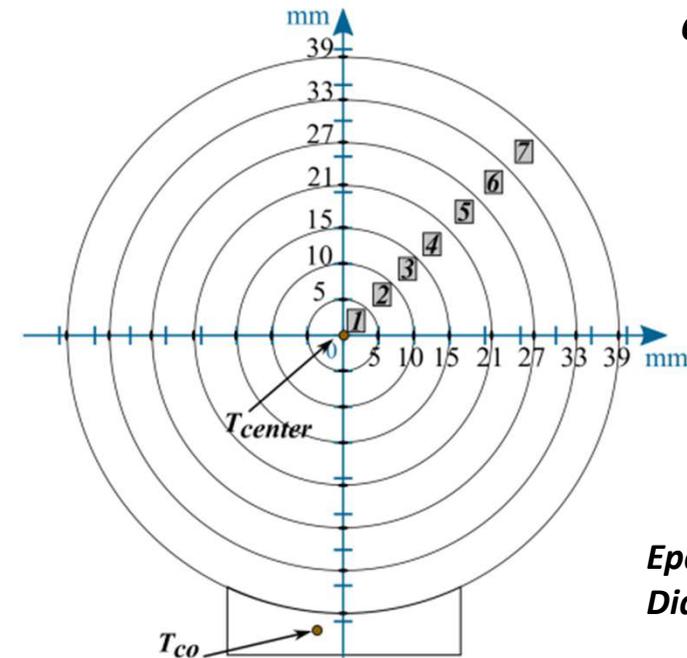
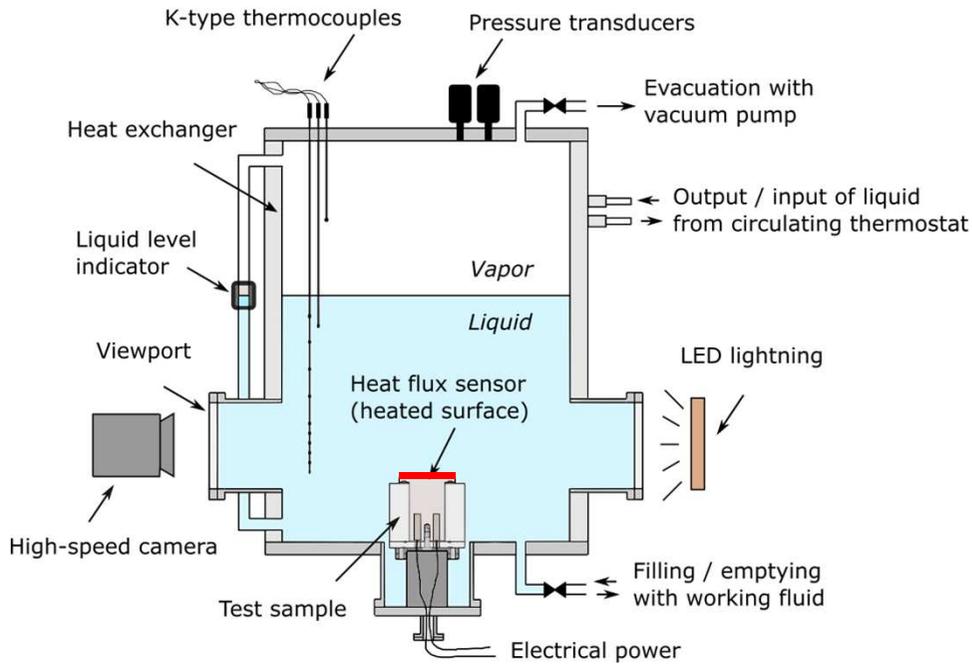
(a)



(b)

# Dispositif expérimental

## Nouveau capteur : Fluxmètre multizones concentriques



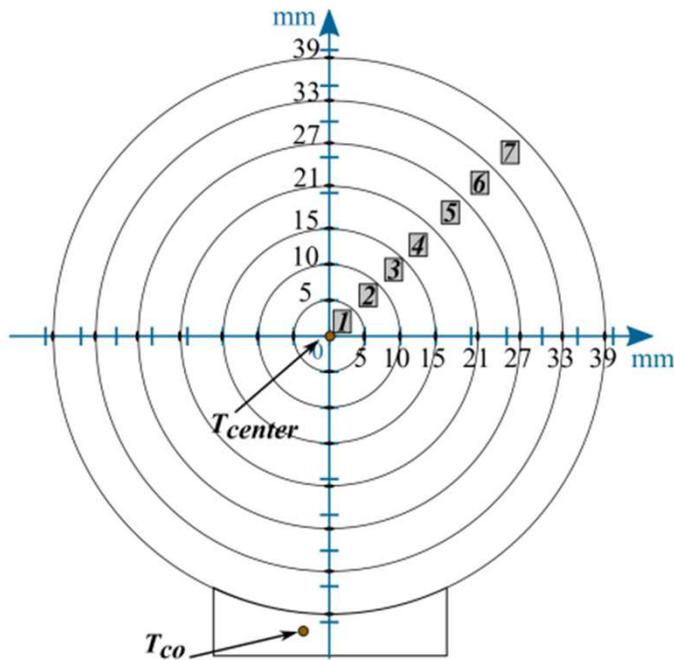
Réalisé par  
CAPTEC

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 :  $\pm 3\%$

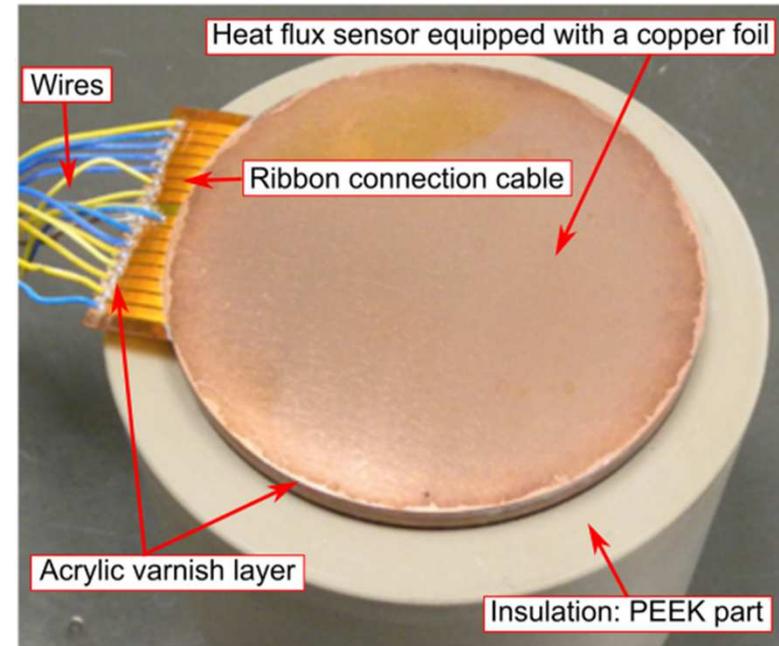
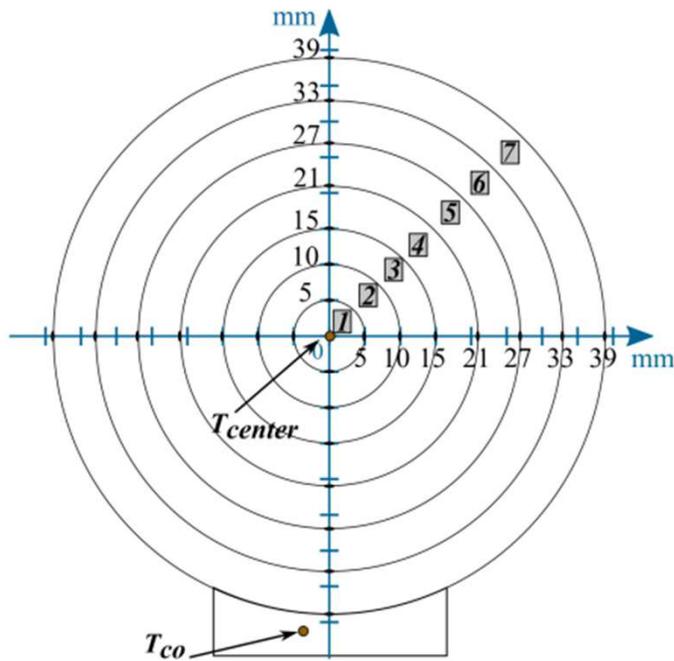
Sensibilité du  $\Delta T$  :  $32 \mu\text{V.K}^{-1}$

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

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

## Dispositif expérimental

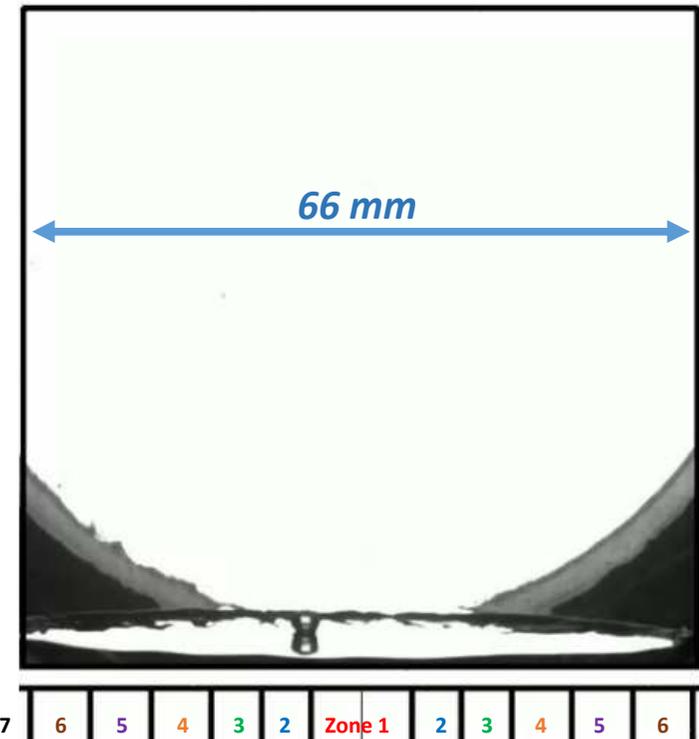
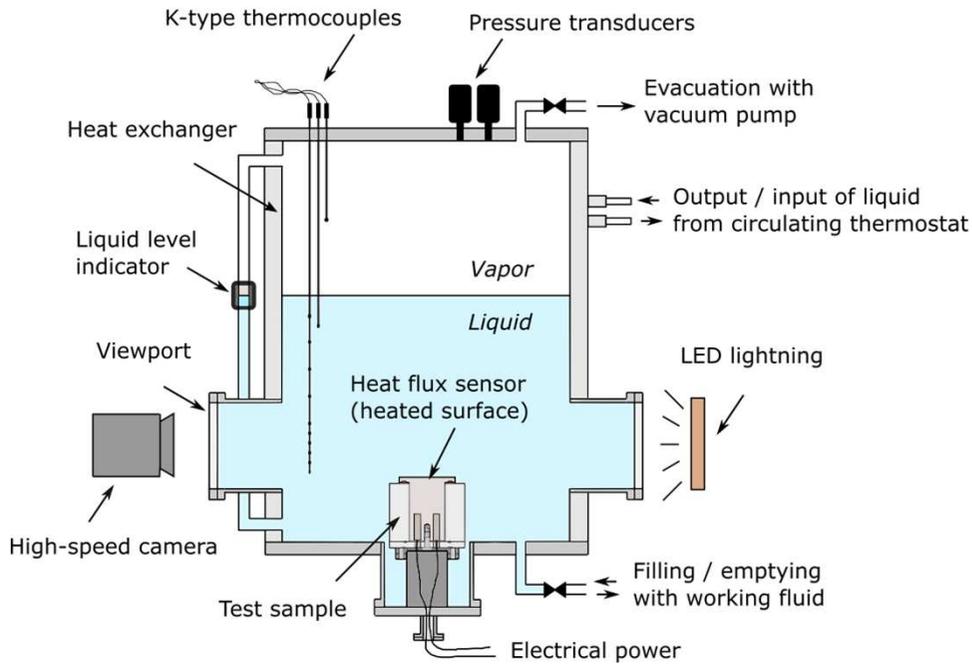
### Nouveau capteur : Fluxmètre multizones concentriques



- ◆ 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

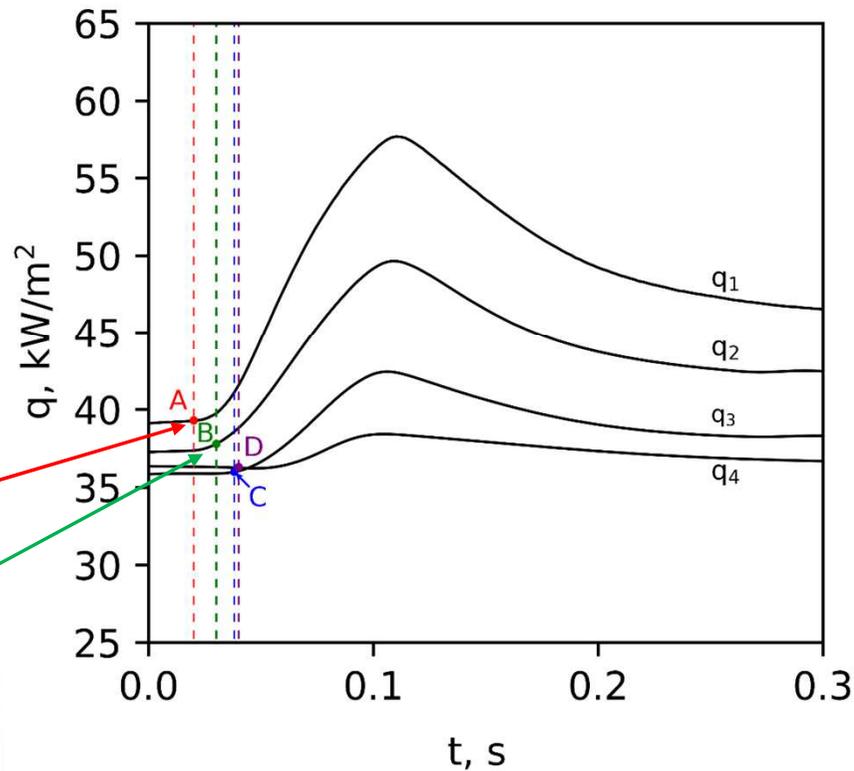


Synchronisation  
des acquisitions vidéo  
et des mesures du fluxmètre

# Exemple de réponse du capteur

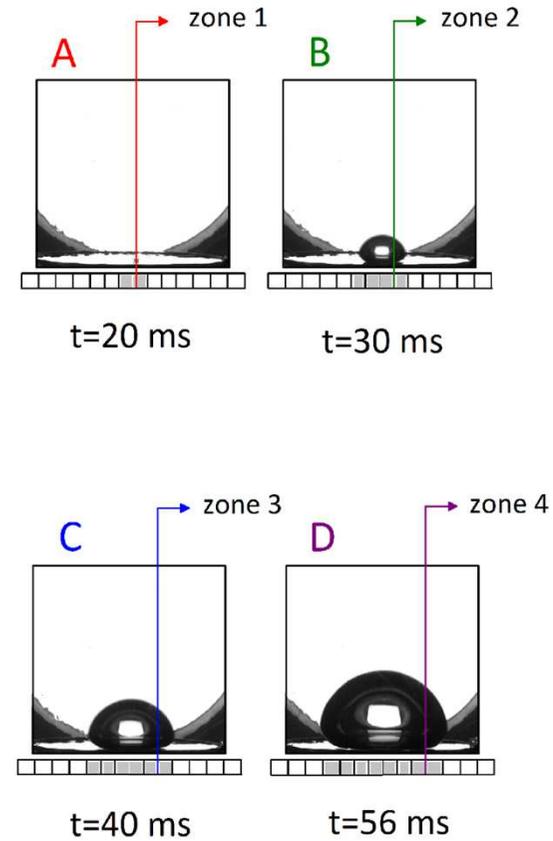
Pression de vapeur = 4,1 kPa  
Hauteur de liquide = 15 cm  
Flux imposé = 220 W

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



Nucléation

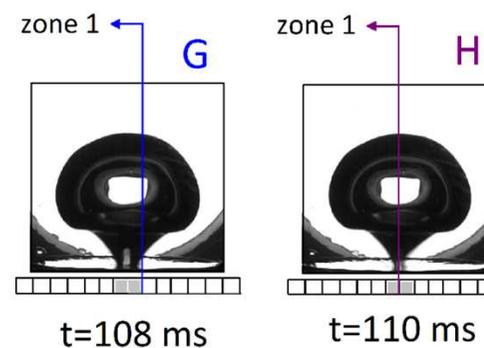
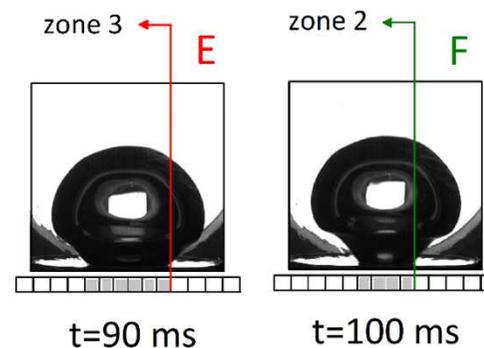
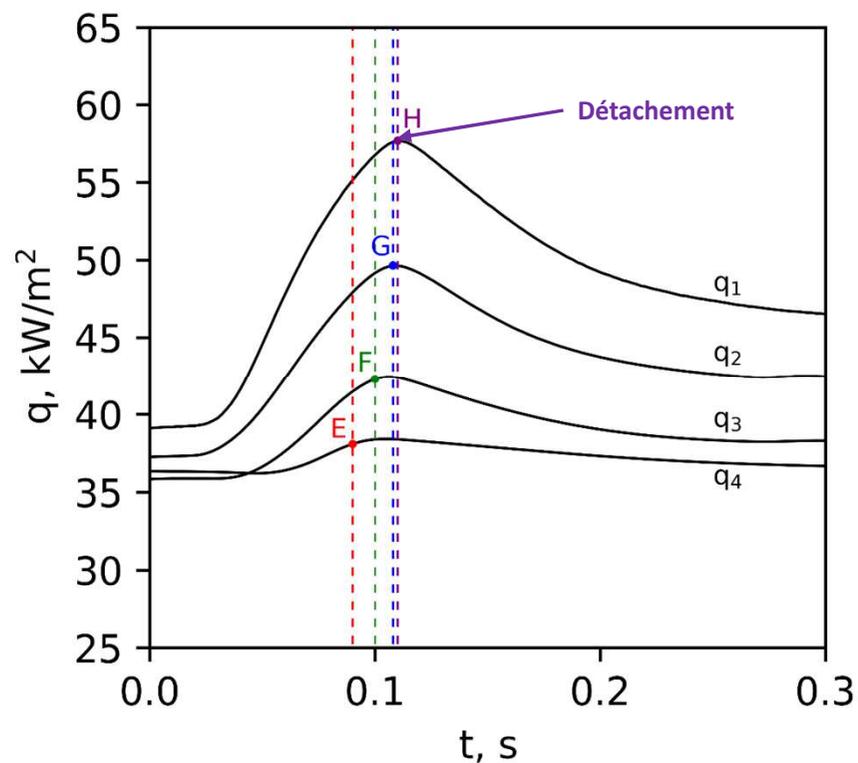
Evaporation d'un microfilm liquide



# 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 <sup>3</sup>	999 kg/m <sup>3</sup>
$c_{p,l} =$	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 <sup>-4</sup> Pa.s	13,1x10 <sup>-4</sup> Pa.s
-----------	---------------------------	----------------------------

**La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6**

$\sigma =$	58,9x10 <sup>-3</sup> N/m	74,2x10 <sup>-3</sup> N/m
------------	---------------------------	---------------------------

**La tension superficielle augmente de 25%**

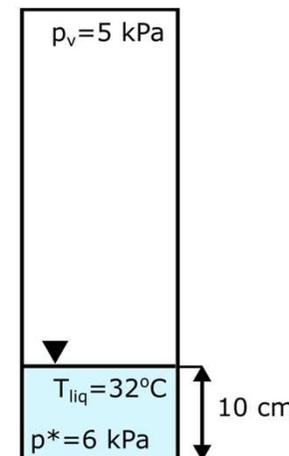
$\rho_v =$	0,598 kg/m <sup>3</sup>	0,0094 kg/m <sup>3</sup>
------------	-------------------------	--------------------------

**La densité vapeur chute d'un facteur 60**

(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

## L'environnement

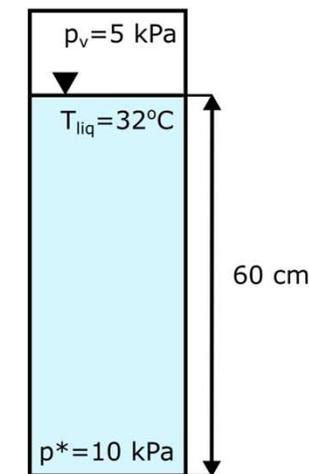
**Basse pression = Sous refroidissement induit par la pression**



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

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

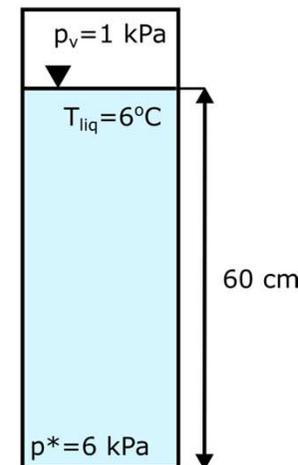
$$\Delta T_{\text{sub}}/\Delta z = 40 \text{ K/m}$$



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

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

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



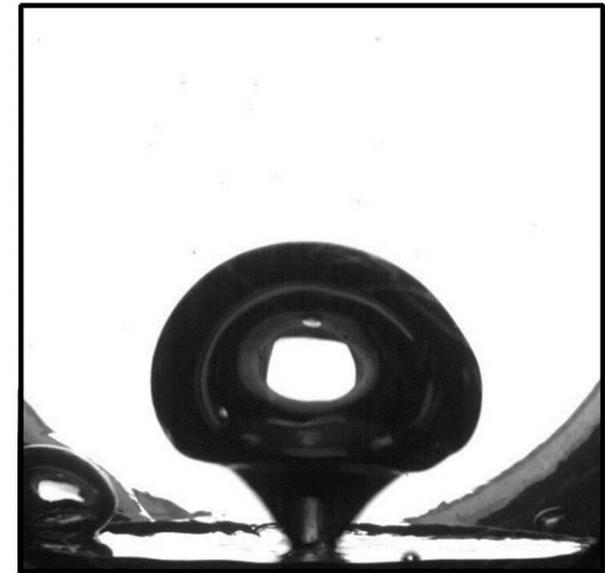
$$T_{\text{sat}}(p^*) = 36^\circ\text{C}$$

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

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

## Influence de la pression de vapeur

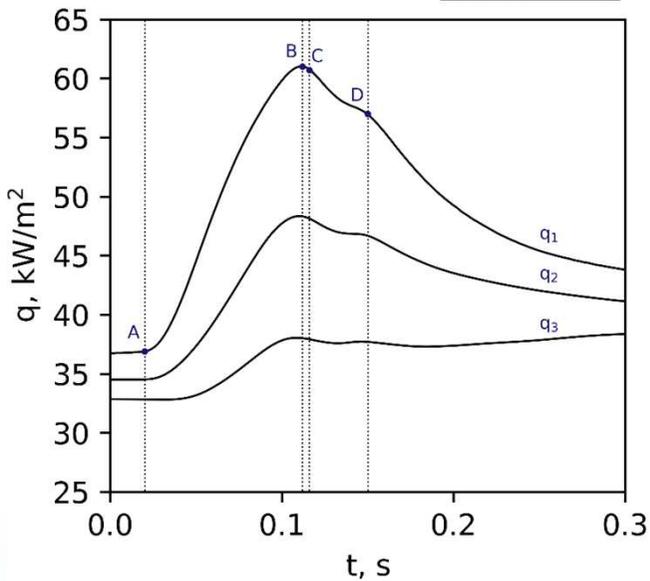
- Pression de vapeur ( $p_v$ ) : 2,6 kPa - 3,6 kPa - 4,1 kPa
- Hauteur de liquide fixe : 15 cm
- Puissance imposée fixe : 220 W
- Fréquence d'acquisition : 0,002 s



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

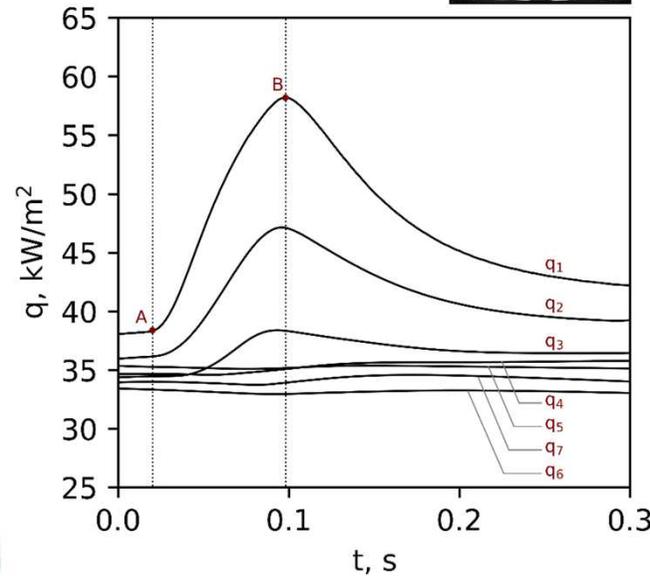
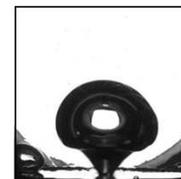
## 1) Bulle en forme de « champignon »

$p_v = 2,6$  kPa



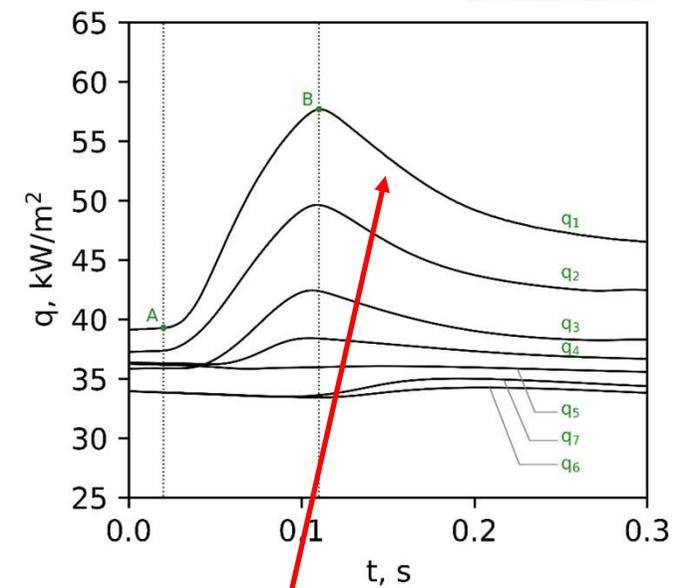
## 2) Bulle en forme de sphéroïde aplatie

$p_v = 3,6$  kPa



## 3) Bulle en forme de « champignon » par Cavitation

$p_v = 4,1$  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 <sup>3</sup>	999 kg/m <sup>3</sup>
$c_{p,l} =$	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%**

$\mu_l = 2,8 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$        $13,1 \times 10^{-4} \text{ Pa.s}$   
**La viscosité liquide augmente d'un facteur 4,6**

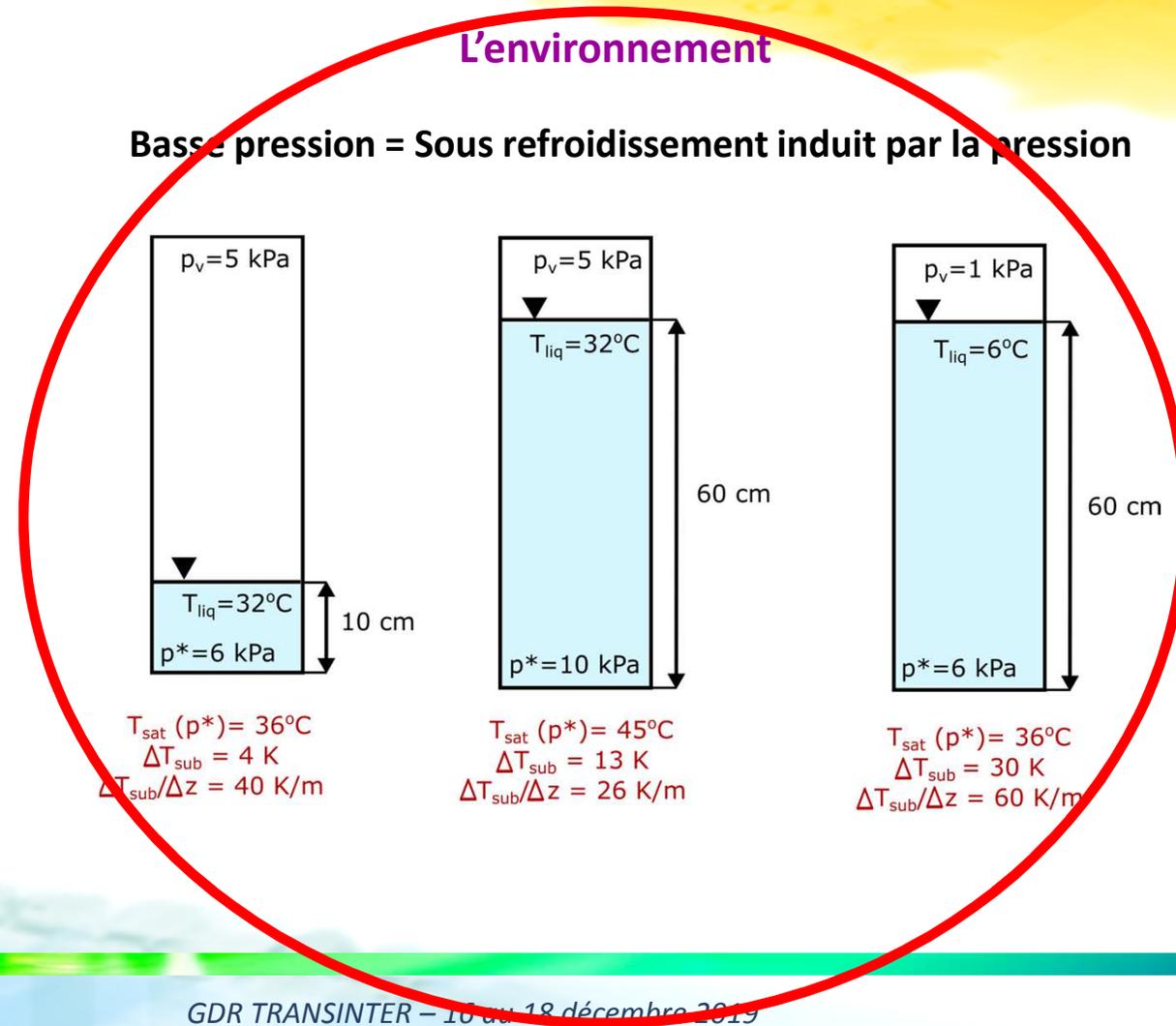
$\sigma = 58,9 \times 10^{-3} \text{ N/m}$        $74,2 \times 10^{-3} \text{ N/m}$   
**La tension superficielle augmente de 25%**

$\rho_v = 0,598 \text{ kg/m}^3$        $0,0094 \text{ kg/m}^3$   
**La densité vapeur chute d'un facteur 60**

(point triple eau : 0,6 kPa - 0,01°C)

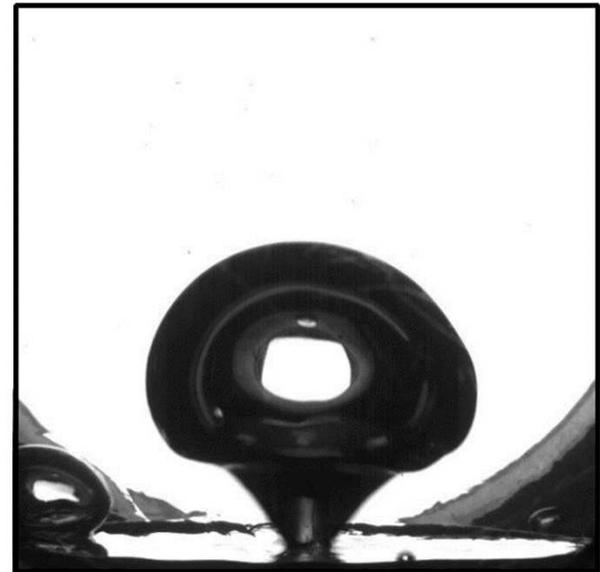
## L'environnement

**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



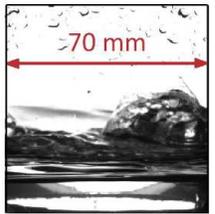
# Influence de la hauteur de liquide

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

HI = 2 cm

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

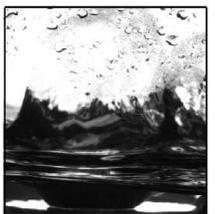
(1) t=0 ms



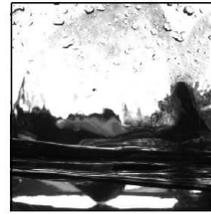
(2) t=24 ms



(3) t=60 ms



(4) t=112 ms



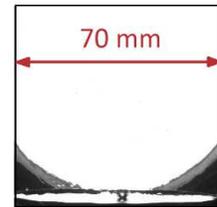
$p_{\text{wall}} = 3.8 \text{ kPa}$

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

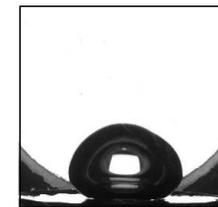
HI = 15 cm

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

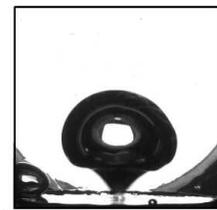
(1) t=0 ms



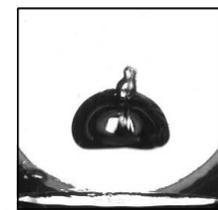
(2) t=40 ms



(3) t=78 ms



(4) t=90 ms



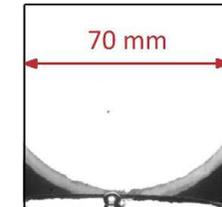
$p_{\text{wall}} = 5.1 \text{ kPa}$

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

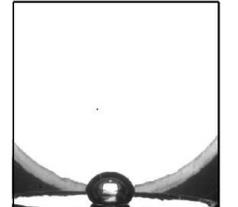
HI = 28 cm

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

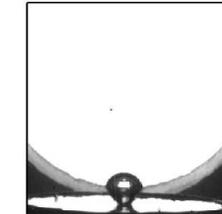
(1) t=0 ms



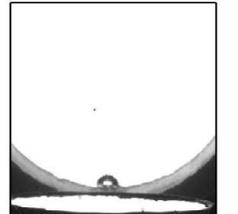
(2) t=20 ms



(3) t=28 ms



(4) t=32 ms



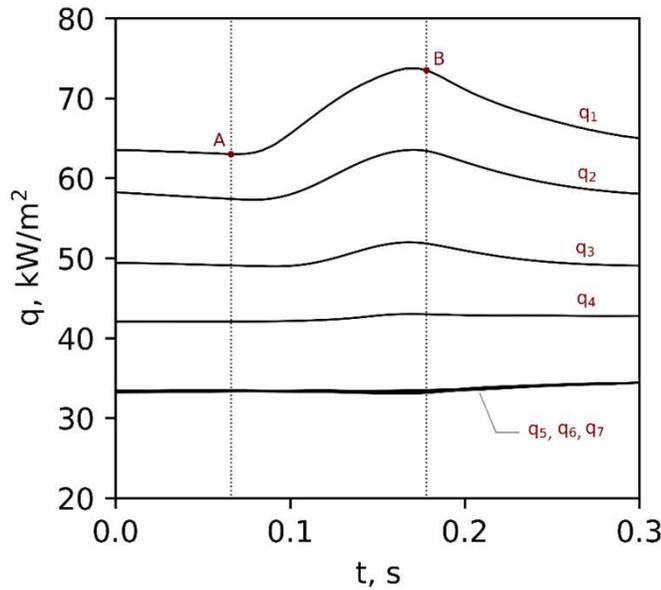
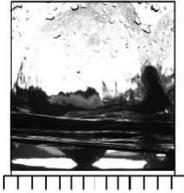
$p_{\text{wall}} = 6.3 \text{ kPa}$

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

# Influence de la hauteur de liquide

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

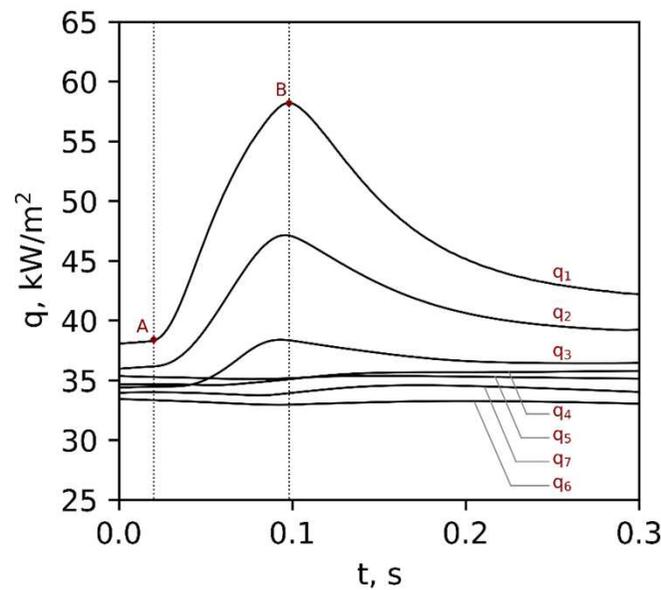
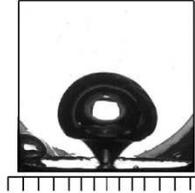
HI = 2 cm



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

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

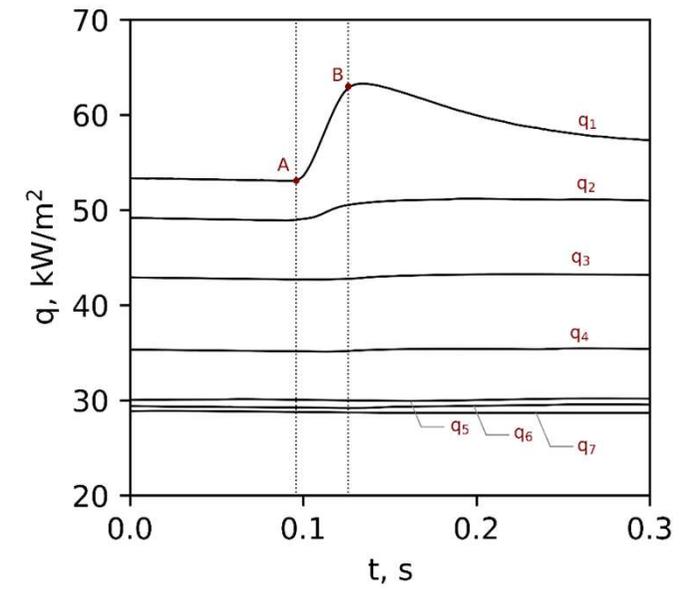
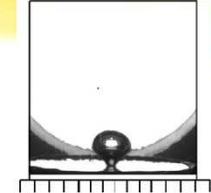
HI = 15 cm



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

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

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, ...