

Fondamentaux de l'ébullition en vase (pression-surface-nucléation)

**Mostafa AL MASRI, Serge CIOULACHTJIAN, Frédéric LEFEVRE
Sandra MICHAIE, Romuald RULLIERE, Jocelyn BONJOUR**

CETHIL – UMR5008 CNRS, INSA Lyon, Univ. Lyon 1
Campus LyonTech La Doua– INSA de Lyon
Bât. Sadi Carnot - 9 rue de la Physique
69621 VILLEURBANNE Cedex

Contexte

- **Optimisation des performances thermiques, de la compacité, ...
des échangeurs diphasiques**

→ 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**

Forts acquis expérimentaux (description fine des processus de base de l'ébullition à $P \geq P_{atm}$)

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

Originalité : atteindre cet objectif en étudiant :

- l'influence de la topographie de surface,
- l'influence de la pression (variation des propriétés du fluide)



Approche expérimentale

Projet NUCLEI

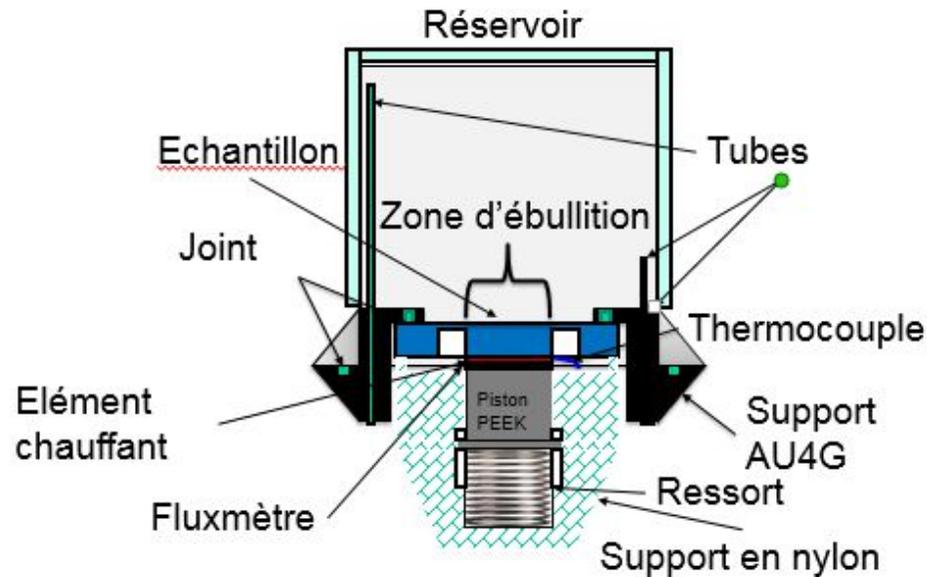
Projet ANR- 12-SEED-0003-01

Optimisation des performances thermiques des échangeurs
diphases par **contrôle** de la topographie
et de la chimie de surface



Mostafa AL MASRI, Serge CIOULACHTJIAN, Frédéric LEFÈVRE

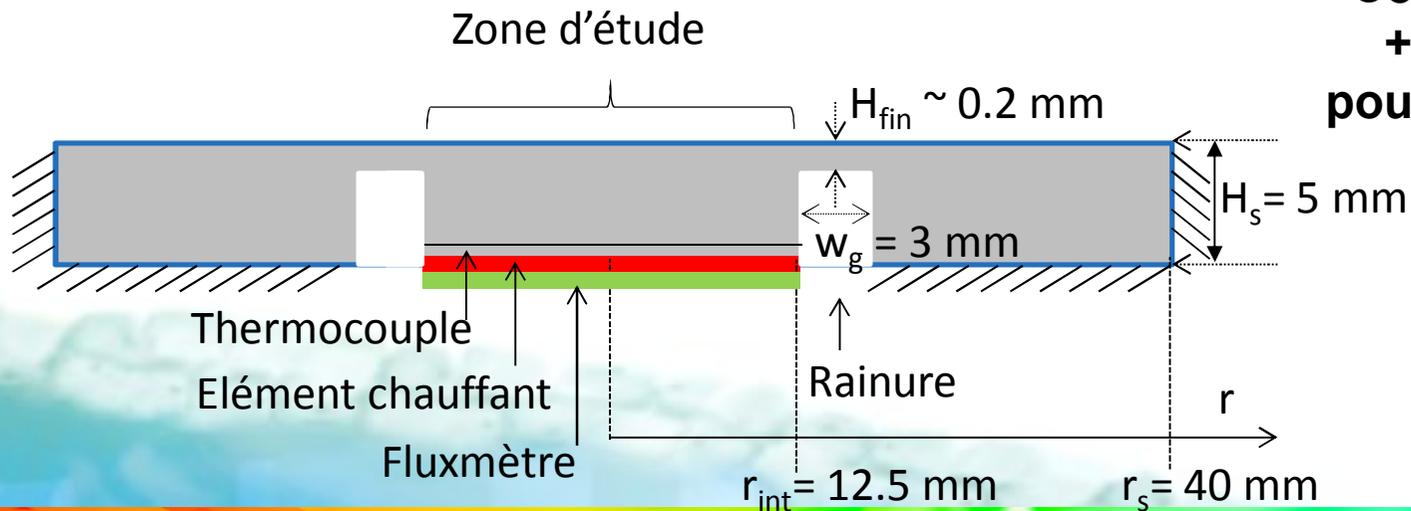
Dispositif expérimental



**Fluide :
acetone**

**Echantillon
en aluminium**

**Compatibilité chimique
+ grande mouillabilité
pour éviter de « piéger »
de la vapeur**

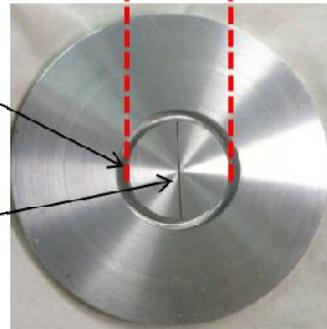


Dispositif expérimental

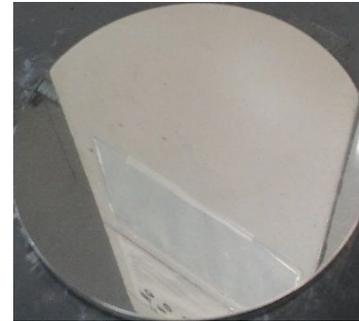
Zone chauffée

Rainure annulaire
pour limiter les
pertes thermiques

Micro rainure
pour insérer un
thermocouple

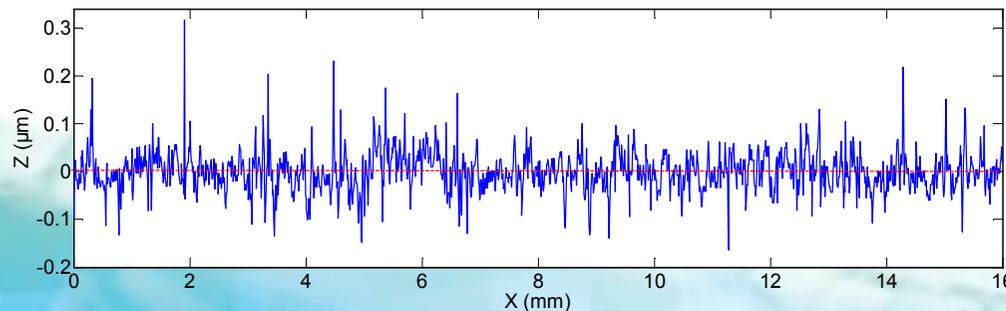


Vue de dessous



Vue de dessus

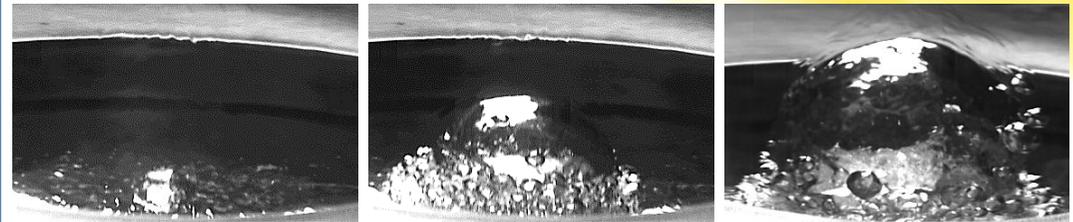
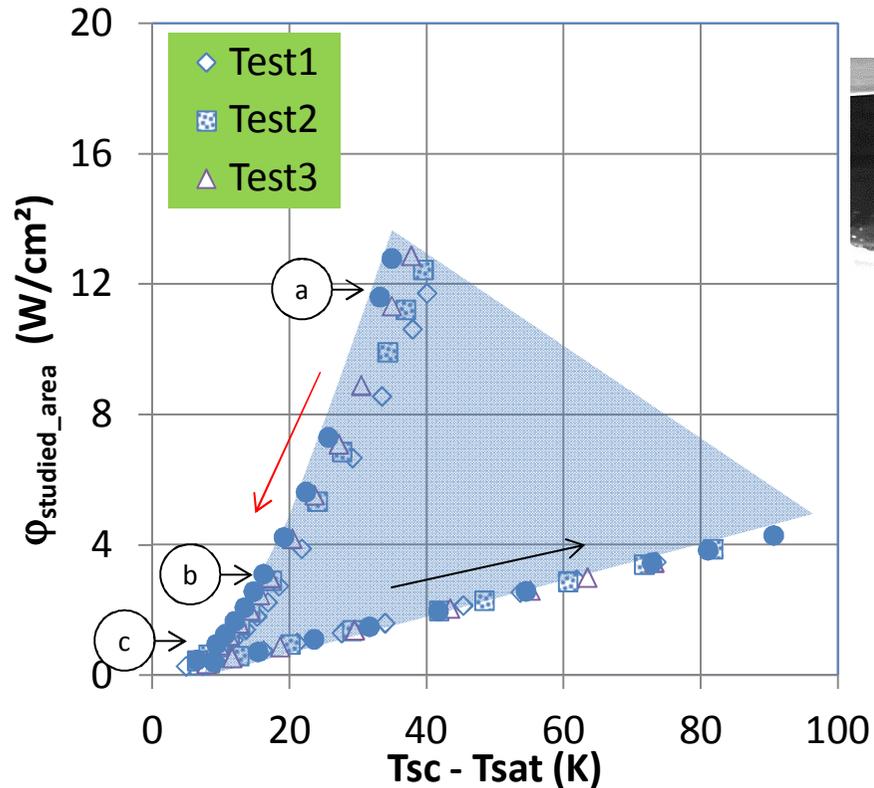
Exemple de profil de rugosité mesuré par
microscopie confocale



Trois types de topographies de surface :

- Ultra-lisse (Polie-miroir)
(RMS ~ 60 nm)
- Ultra-lisse avec défauts (polie-miroir
avec défauts)
- Rugueuse (RMS ~ 5 µm)

Résultats : Surface ultra-lisse

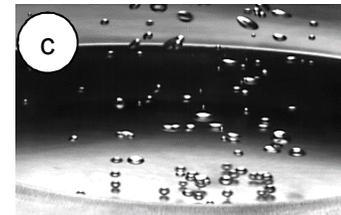
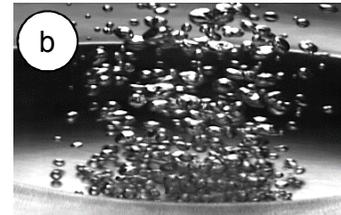
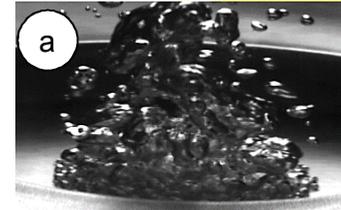
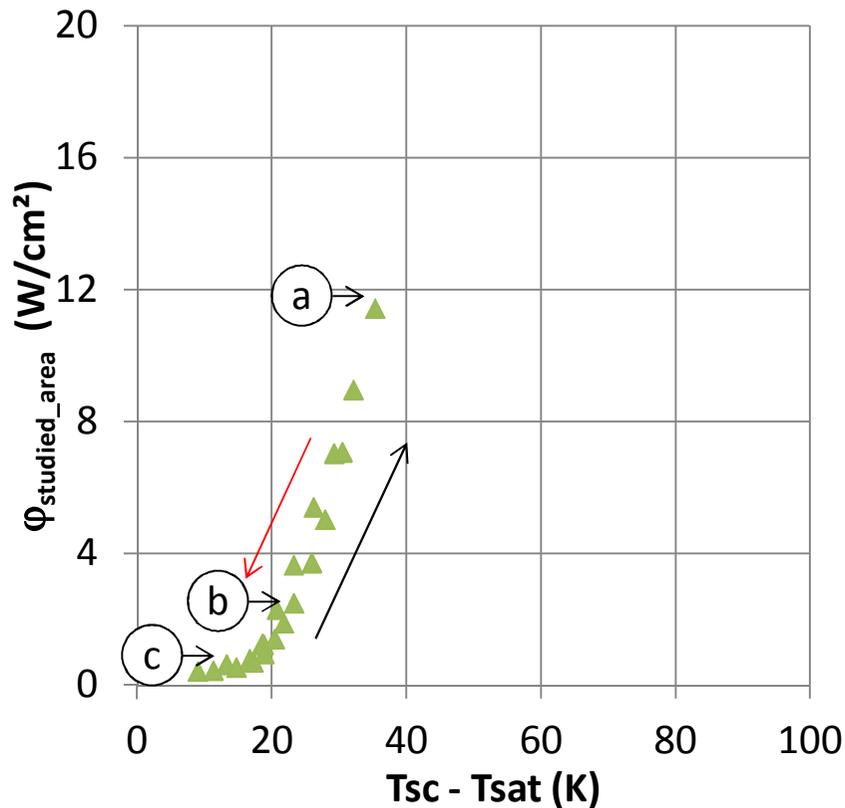


Ebullition explosive



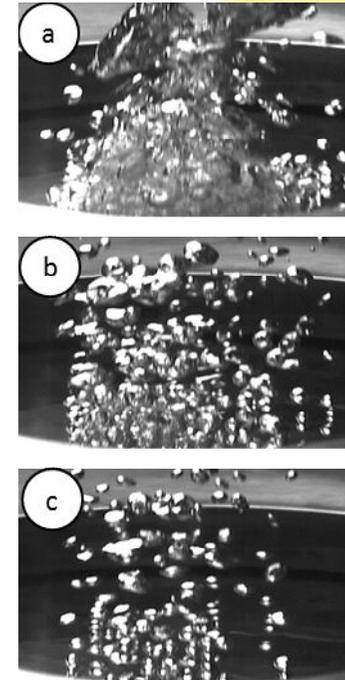
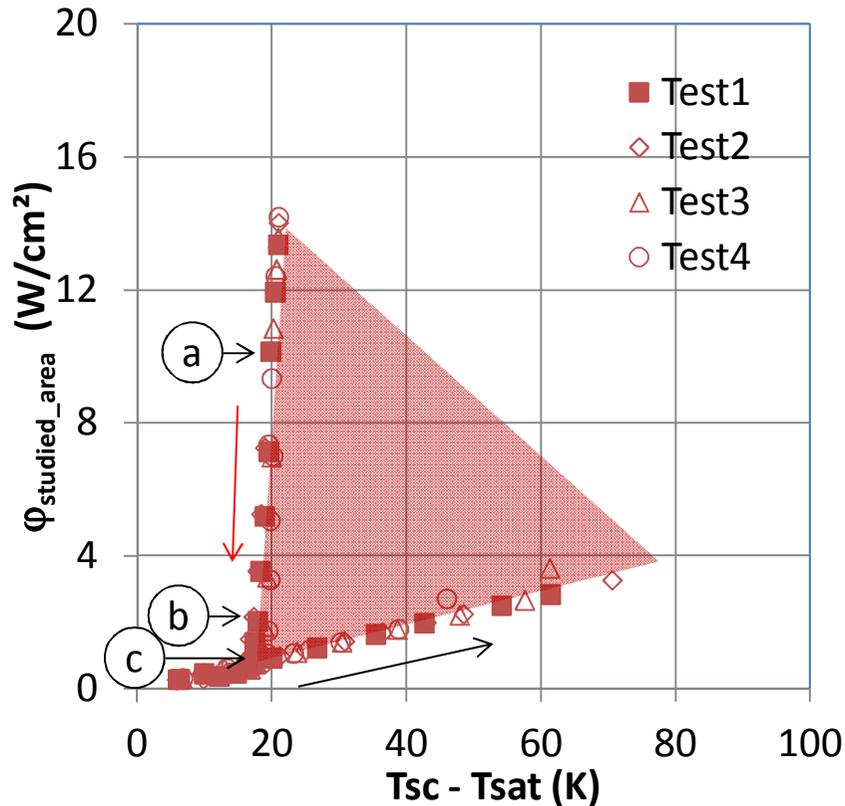
- Forte surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition
- Croissance rapide d'une grosse bulle ("ébullition explosive")
- Forte coalescence à haut flux
- Fort hysteresis entre les courbes à flux croissant et décroissant
- Multitude de très petites bulles à bas flux (pas de sites préférentiels)

Résultats : Surface rugueuse



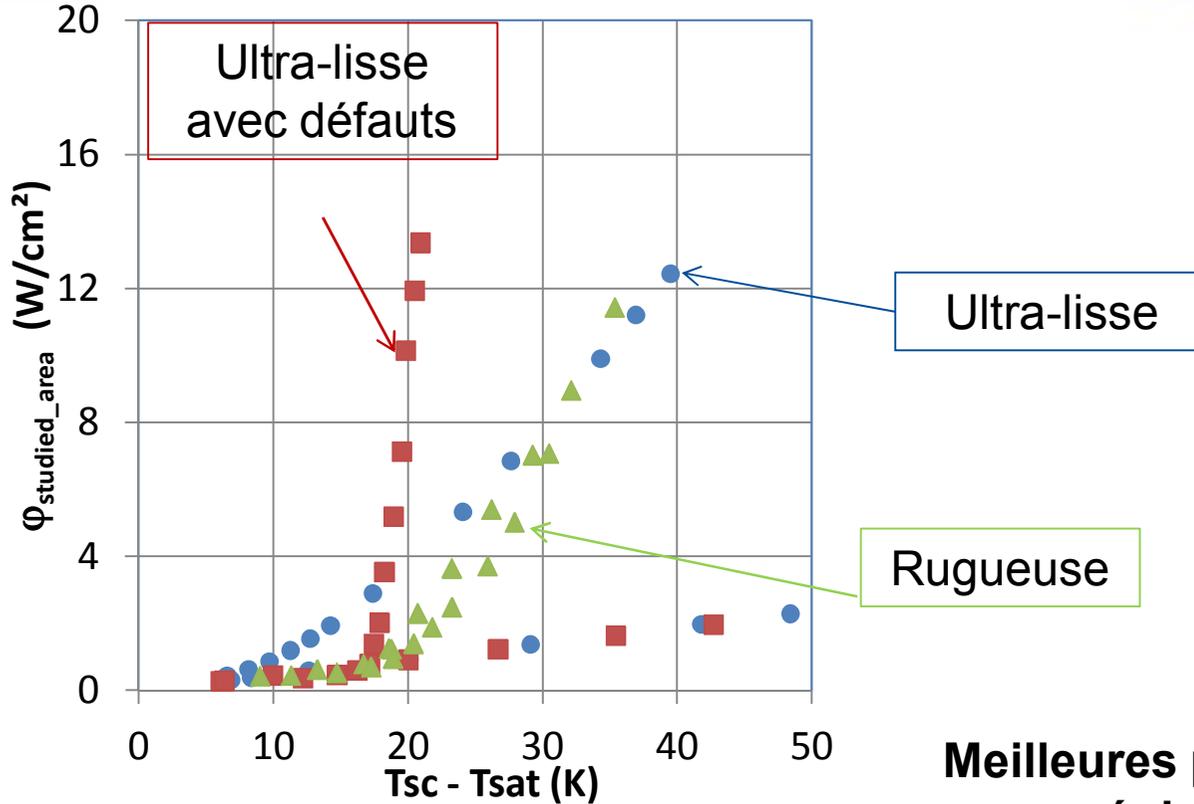
- Faible surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition
- Pas d'“ébullition explosive”
- Très faible hysteresis entre les courbes à flux croissant et décroissant
- Nombre limité de sites de nucléation à bas flux

Résultats : Surface ultra-lisse avec défauts

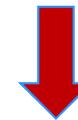


- Forte surchauffe nécessaire pour déclencher l'ébullition
- Croissance rapide d'une grosse bulle ("ébullition explosive")
- Hysteresis incomplet entre les courbes à flux croissant et décroissant
- Nombre limité de sites de nucléation à bas flux (quelques sites isolés "captent" le flux de chaleur et ne permettent pas l'activation d'autres sites)

Synthèse des résultats expérimentaux



**Meilleures performances thermiques
en régime d'ébullition nucléée**



**Surface ultra-lisse avec quelques sites de nucléation
judicieusement positionnés sur la surface**

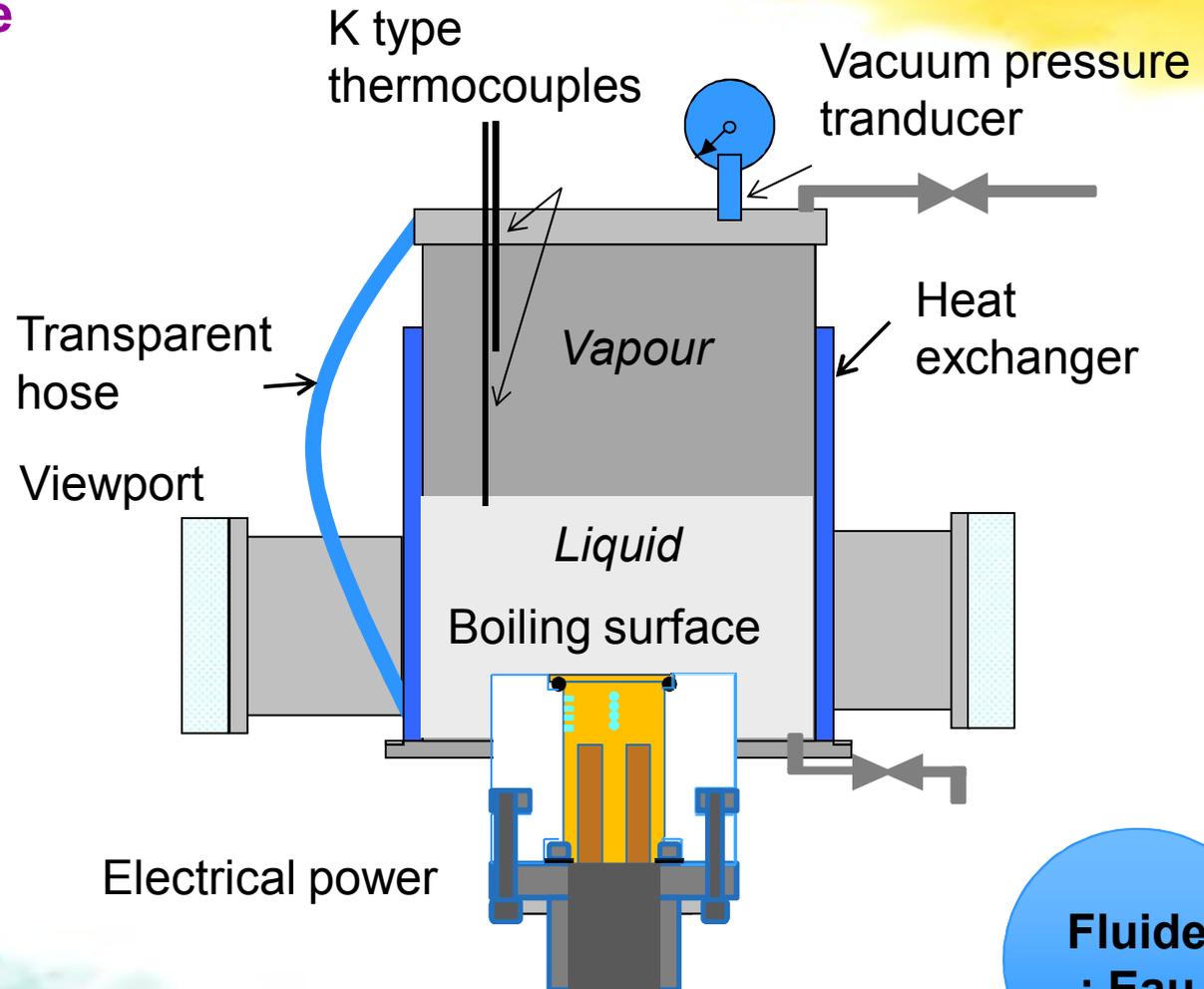
Ebullition en vase sur un site de nucléation unique : effet de la pression depuis la pression atmosphérique jusqu'aux très faibles pressions



Sandra MICHAIE, Romuald RULLIERE, Jocelyn BONJOUR

Dispositif expérimental

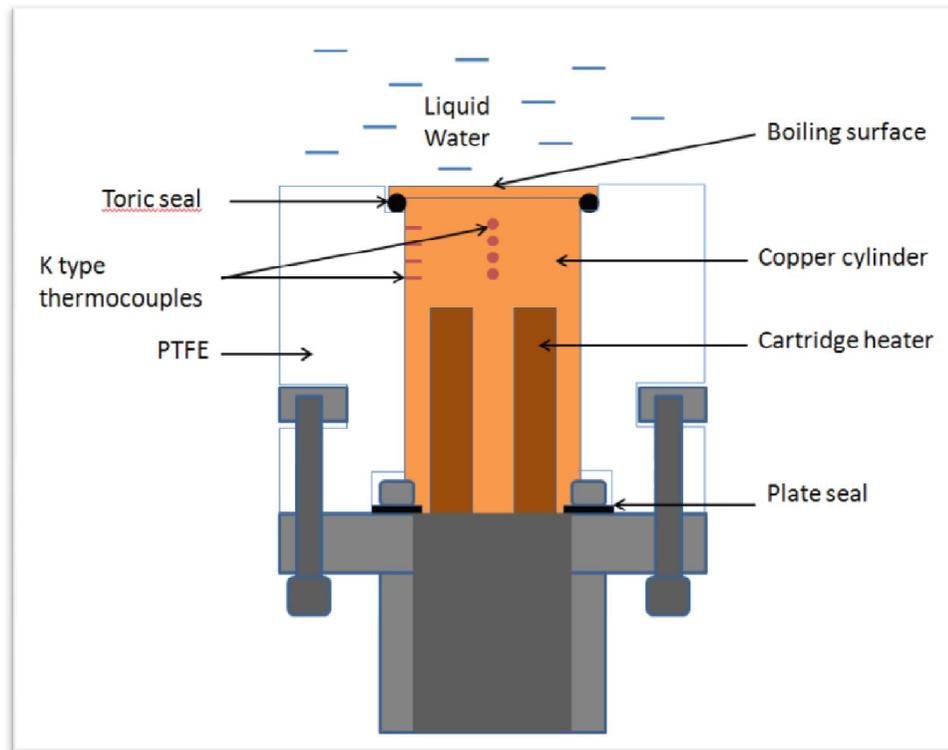
Description de l'enceinte



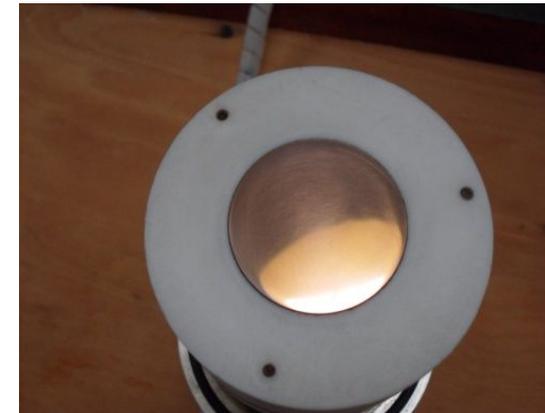
Fluide
: Eau

Dispositif expérimental

Description de la surface d'étude



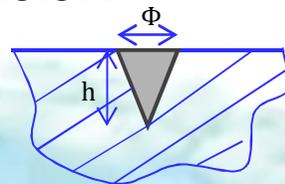
**S = 19.6 cm² en cuivre
polie-miroir (Ra = 0.4 μm)**



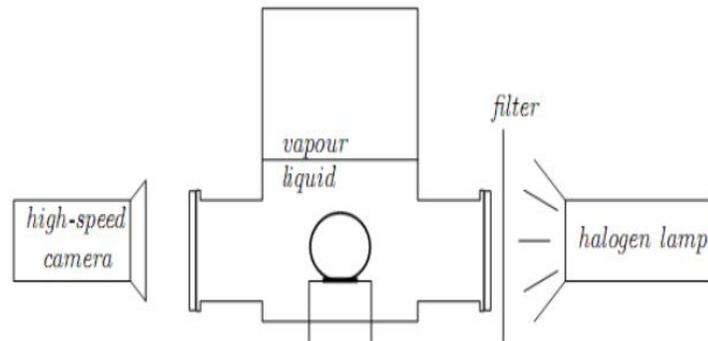
Site de nucléation artificiel :

$\Phi = 110 \mu\text{m}$

$h = 73 \mu\text{m}$



Visualisation par caméra rapide



101.4 kPa (100°C)

50 mm



Bulles sphériques
Taille millimétrique

Conditions d'essais

(videos ralenties $\times 35$ - $\times 40$)

Fluide = Eau

Hauteur de liquide = 17,30 cm

$$P_{\text{wall}} = P_{\text{vap}} + \rho_l g H_l$$

Densité de flux imposée = 2,7 W.cm⁻²

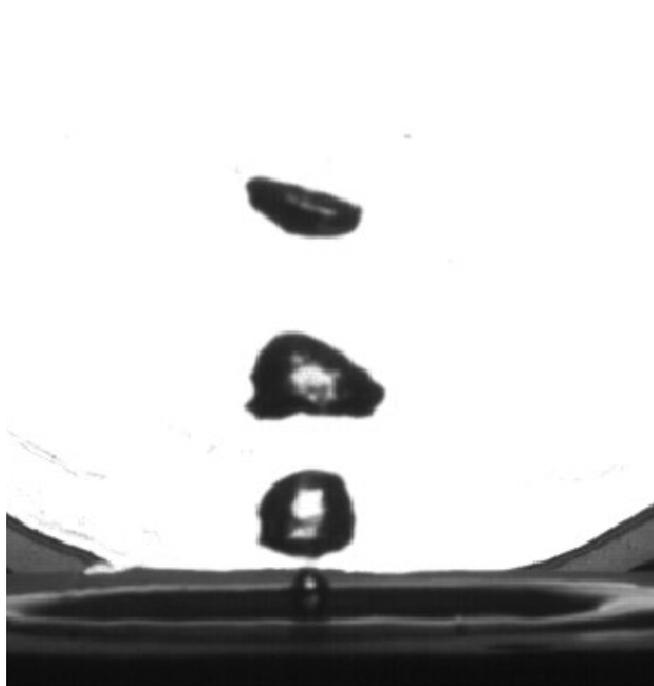
Essais de $T_{\text{sat}} = 100^\circ\text{C}$ (soit $P_{\text{vap}} (= P_{\text{sat}}) = 101,4$ kPa)

à $T_{\text{sat}} = 35^\circ\text{C}$ (soit $P_{\text{vap}} (= P_{\text{sat}}) = 5,6$ kPa)

Résultats expérimentaux

47.4 kPa (80°C)

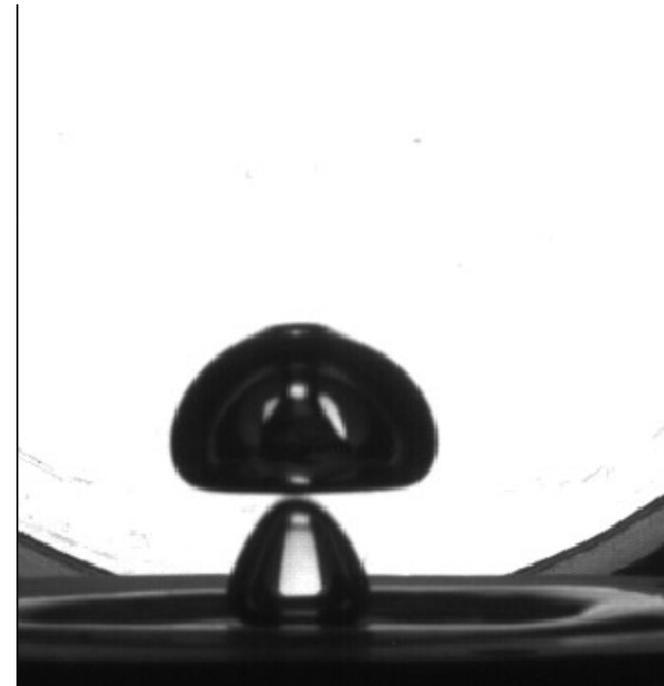
50 mm



Régime de transition
Groupes successifs de plusieurs bulles
formant des colonnes de vapeur

20.0 kPa (60°C)

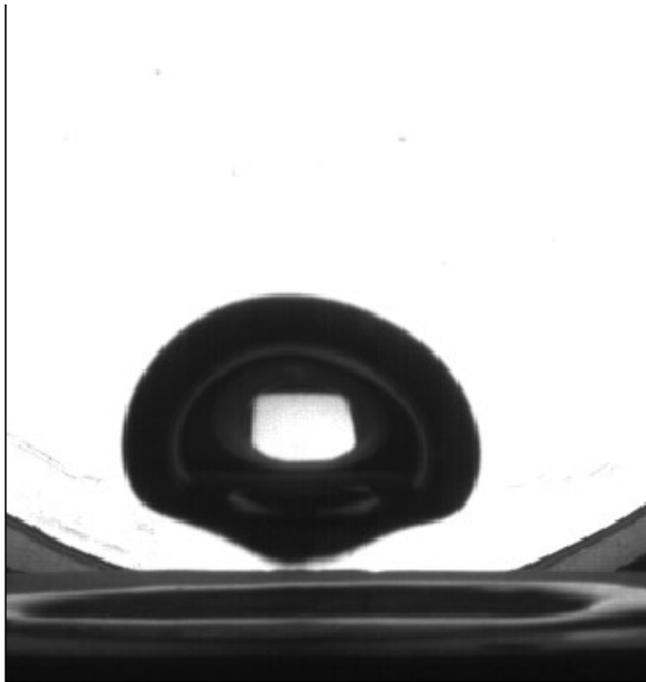
50 mm



Paires de bulles
La 2^{ème} bulle est "aspirée" dans le sillage de la 1^{ère}
Forme de champignon sans coalescence
Taille centimétrique

5.6 kPa (35°C)
50 mm

12.4 kPa (50°C)
50 mm

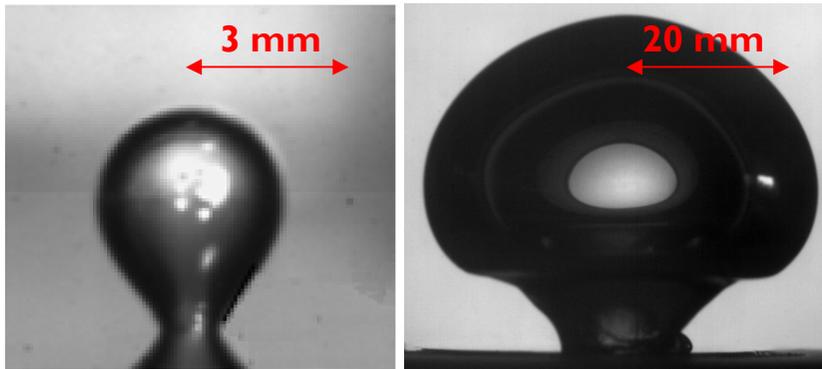


Bulle isolée
Forme sphéroïde aplatie
La fréquence diminue



Grosse bulle isolée
Forme sphéroïde aplatie
Long temps d'attente

Morphologie des bulles au détachement



Pression atm.

Basse pression

Evolution des propriétés physiques de l'eau à saturation

Entre 100 et 10°C :

La densité vapeur chute d'un facteur 60

La tension superficielle augmente de 25%

La chaleur latente augmente de 10%

La viscosité liquide augmente d'un facteur 4.6

Bulles de taille centimétrique, Forme de sphéroïde aplatie

→ inhomogénéité en pression et en sous-refroidissement,

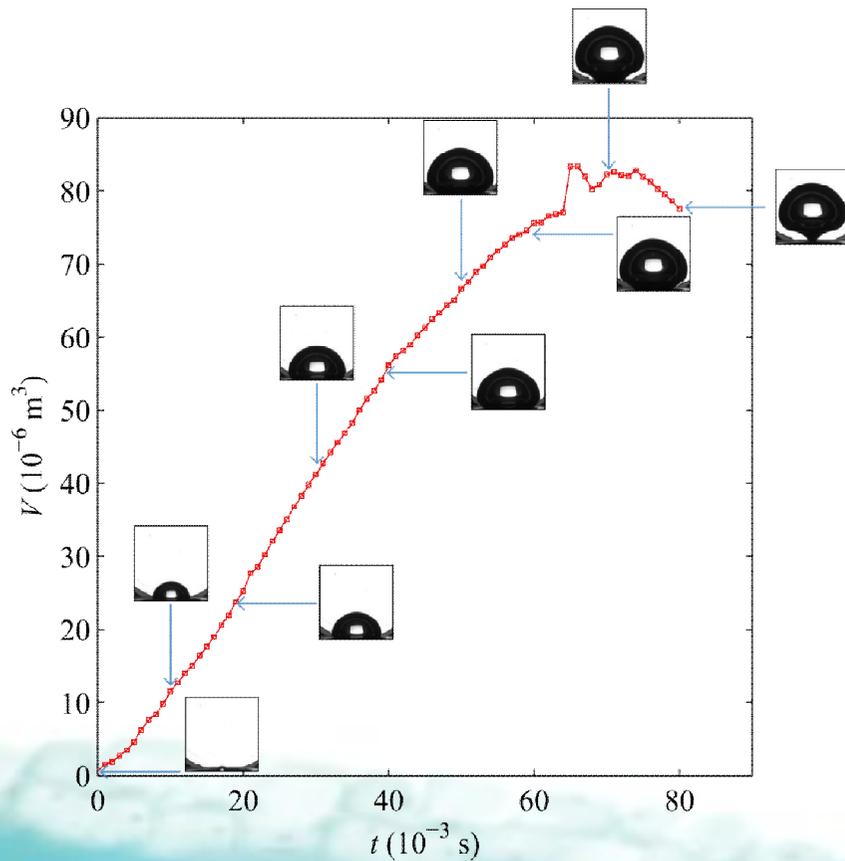
→ variation des propriétés thermophysiques de l'eau,

→ rapport des forces appliqué à la bulle différent de celui appliqué à P_{atm}

Nouvel éclairage sur les mécanismes d'ébullition en augmentant d'au moins un ordre de grandeur les échelles temporelles et spatiales

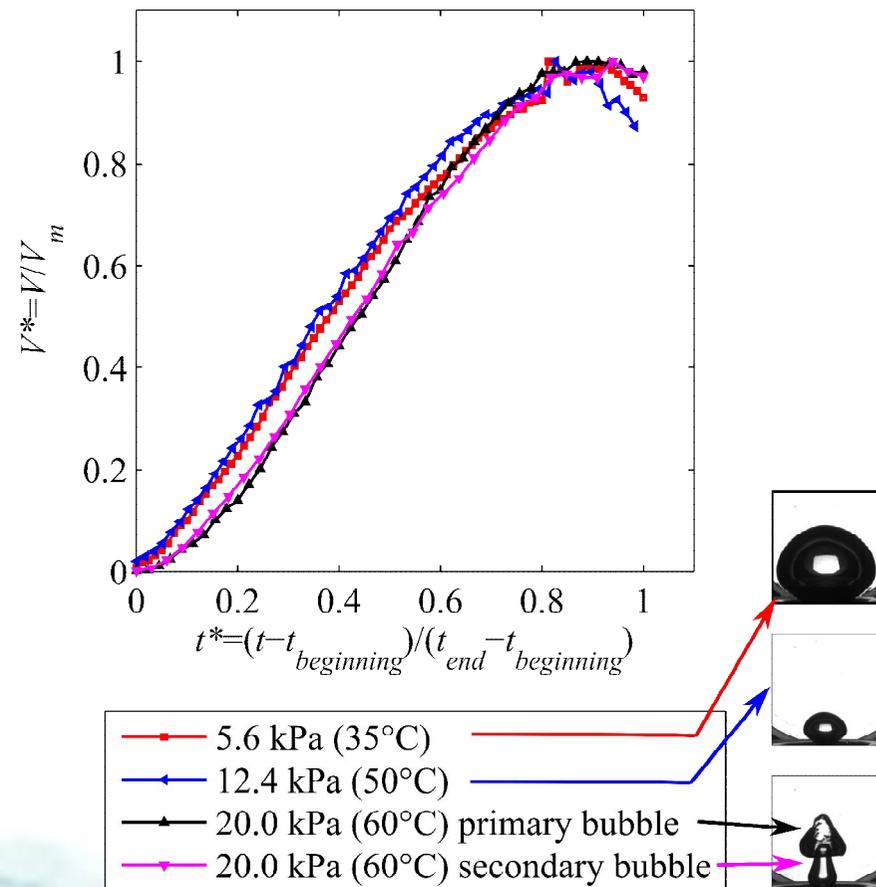
Résultats : dynamique de croissance des bulles

Volume en fonction du temps de chaque bulle de son apparition au détachement



Exemple d'une bulle à 5,6 kPa (35°C)

Volume adimensionné en fonction du temps adimensionné de chaque bulle de son apparition au détachement



Aspect fondamental

Meilleure compréhension des phénomènes fondamentaux de l'ébullition

Aspect applicatif (échangeurs)

- Augmentation du coefficient d'échange thermique avec l'état de surface
- Risque d'assèchement de la paroi dû à la taille des bulles

Enjeux futurs

Etude de l'influence de l'état de surface :

- Compréhension du phénomène de nucléation
- Détection optique du plasmon de surface (détection du premier germe de vapeur – échelle nanométrique)
- Influence de la chimie de surface (effet de la mouillabilité)

Etude de l'influence de la pression :

- Utilisation d'un autre fluide (modification des propriétés du fluide, mouillabilité)
- Identification du poids relatif des forces
- Etude de l'ébullition de l'eau dans un canal d'évaporateur (recommandations pour la conception d'évaporateurs), Etude thermique