

**ARCUS – Journées Rhônes-Alpes-Brésil**

**TRANSFERTS DE CHALEUR AVEC  
CHANGEMENT DE PHASE LIQUIDE-VAPEUR**

INSA-Lyon 20-24 October 2008

**TRANSFERT DE CHALEUR EN  
ÉBULLITION LIBRE**

**Júlio César Passos**

**[jpassos@emc.ufsc.br](mailto:jpassos@emc.ufsc.br)**



Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico - Departamento de Engenharia Mecânica  
LEPTEN/Boiling  
Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia



# Plan

Introduction

Aspects historiques

Applications

Courbe d'ébullition

Régimes d'ébullition

Influence des différents paramètres

Corrélations pour l'ébullition nucléée

Mécanismes physiques d'intensification

# Historique

## **LEIDENFROST** (Allemagne - 1756)

publie ses observations sur le comportement d'une goutte d'eau sur une plaque chaude, dont le processus de vaporization est retardé à cause d'une couche de vapeur qui maintient la goutte isolée de la plaque.

## **JAKOB et FRITZ** (Allemagne - 1931)

realisent les premières études sur l'effet de la rugosité sur le coefficient des transferts de chaleur par ébullition.

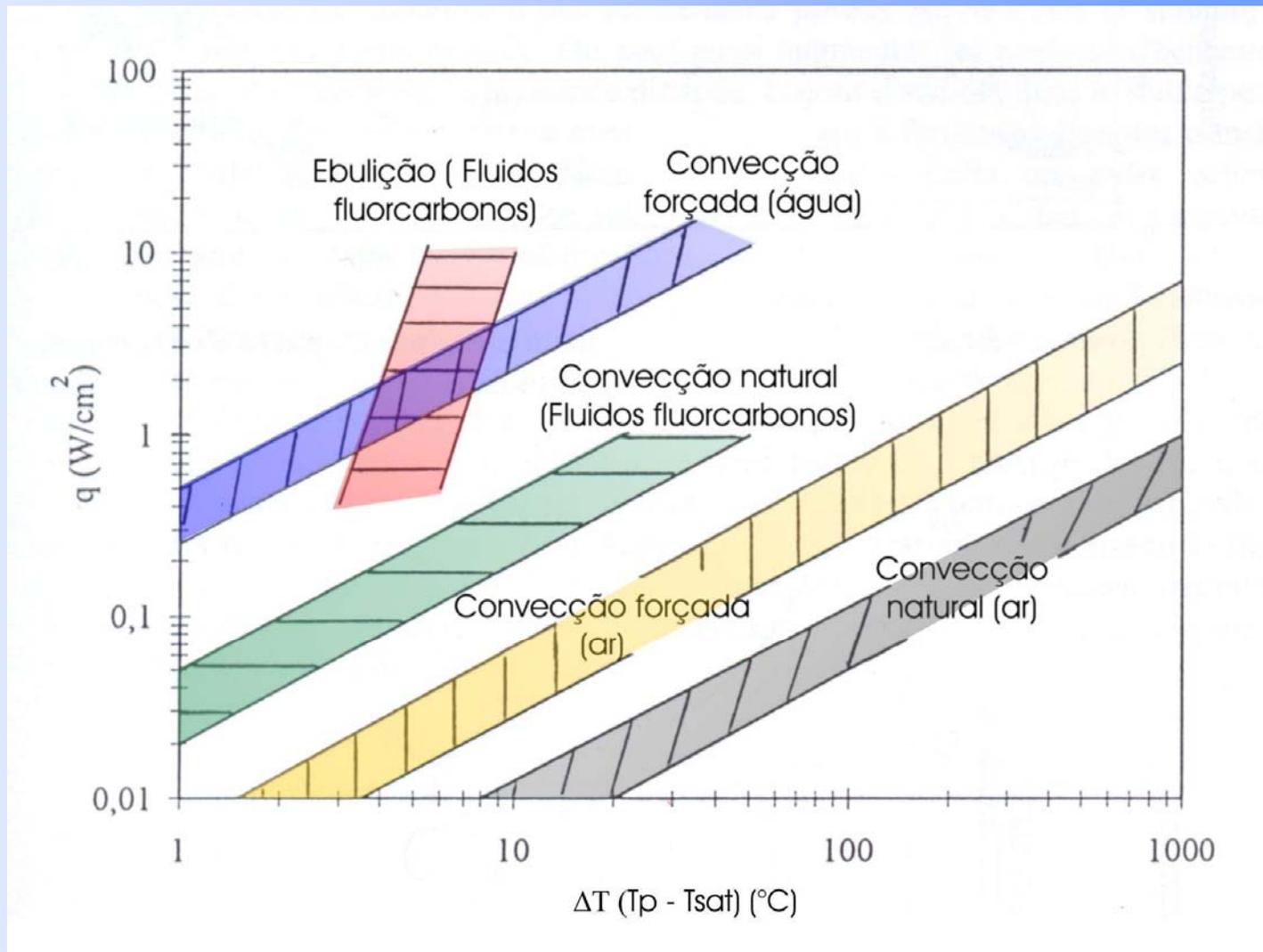
## **NUKIYAMA** (Japon - 1934)

publie des résultats em forme d'une courbe, appelée courbe d'ébullition, et indique, par inférence, l'existence du régime de l'ébullition de transition.

# Motivations

- Transfert de flux chaleur élevé avec une faible différence de températures entre celle de la paroi et celle du liquide.
- Réfrigération et conditionnement de l'air
- Echangeurs de chaleur compacts
- Contrôle thermique
- Sûreté des réacteurs nucléaires

# Motivations



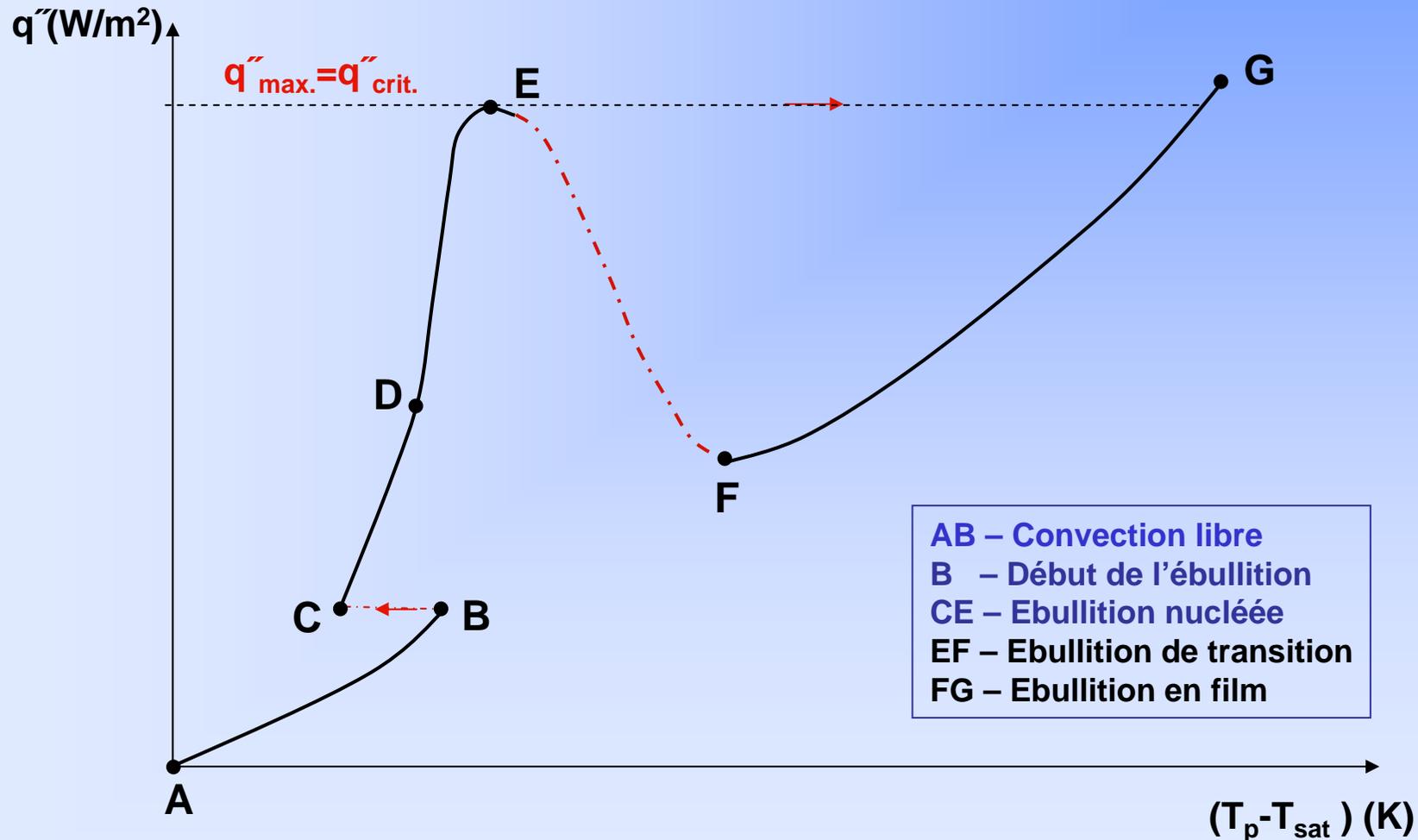
*(in Bonjour (1996), tese INSA-Lyon-França)*

# Courbe d'ébullition

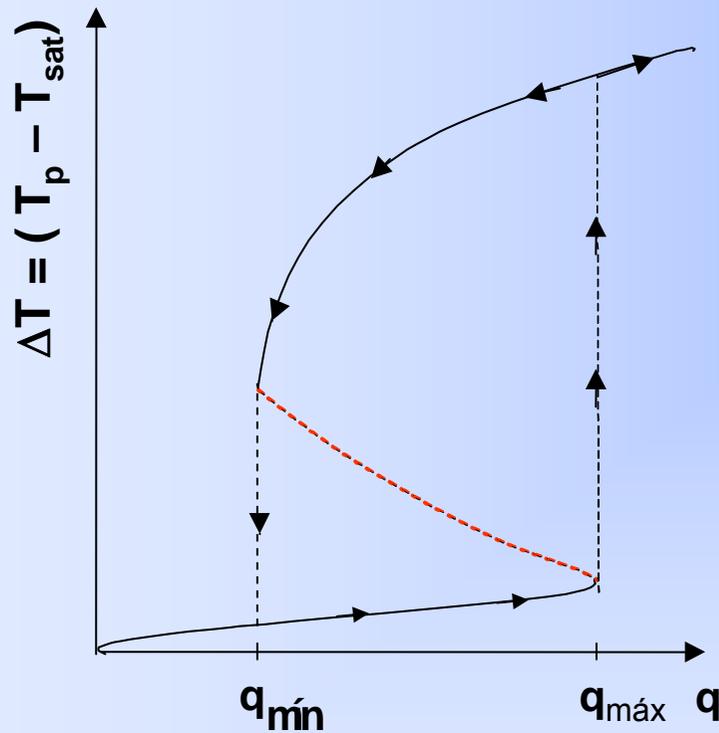


# La courbe d'ébullition (courbe de Nukiyama)

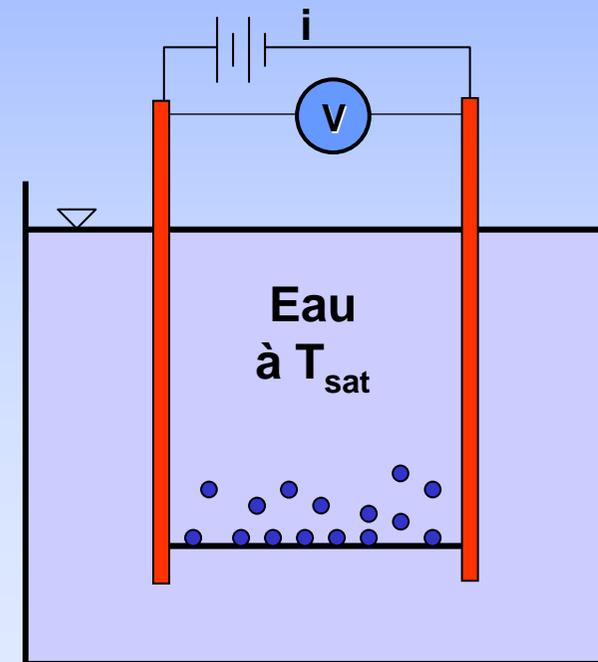
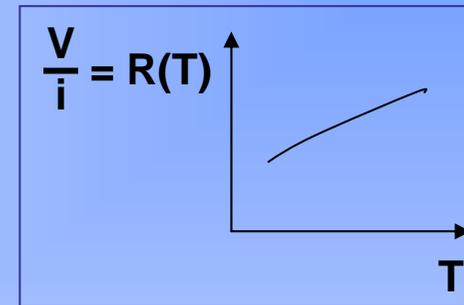
(à flux de chaleur imposé)



# L'Expériment de Nukiyama (1934)

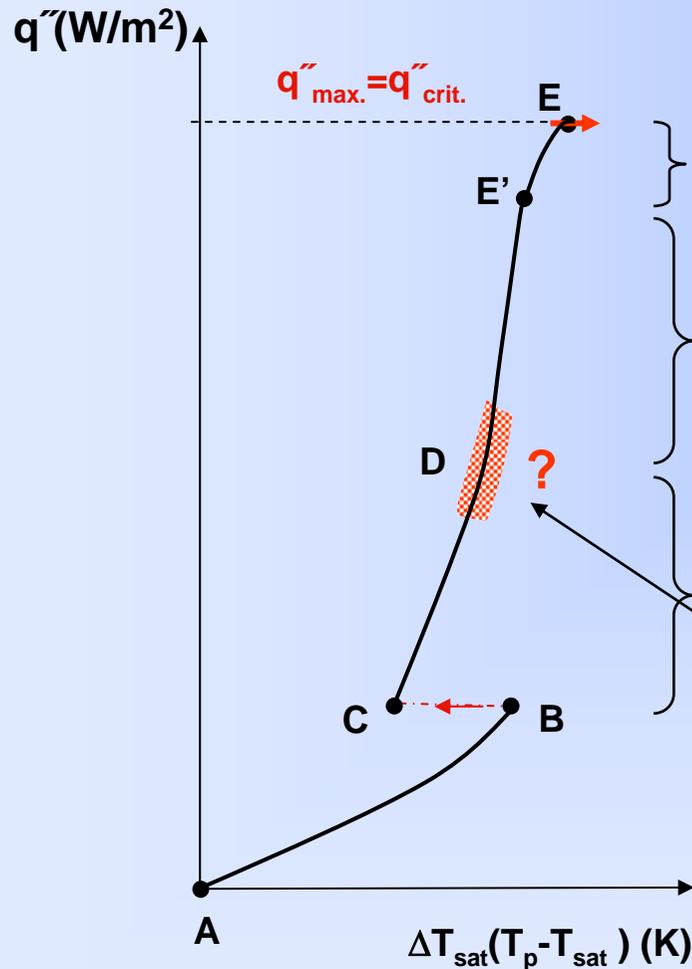


**Ébullition libre**  
("Pool boiling")

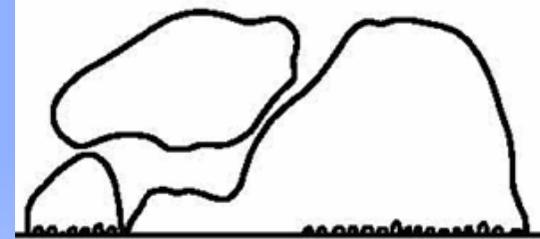


# Régime d'ébullition nucléée

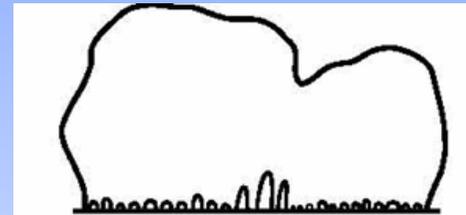
## Différents types de configurations L-V



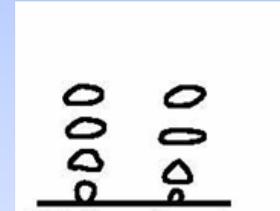
Bulles "coalescées"  
(proche du flux critique)



Bulles  
coalescées



Bulles  
isolées



$$q_{MB} = 0,11 \rho_v h_{lv} \theta^{0,5} \left( \frac{\sigma g}{\rho_l - \rho_v} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Transition CD-DE': Corrélation de Moissis-Berenson

( $\theta$ : angle de contact, en degrés)

# Visualization (1)

Ébullition nucléée du n-Pentane,  $p_{\text{atm}}$ ,  $T_{\text{sat}}=35,8^{\circ}\text{C}$ ,  
sur un disque en cuivre



$T_p = 54^{\circ}\text{C}$   
 $q'' = 40\text{kW/m}^2$

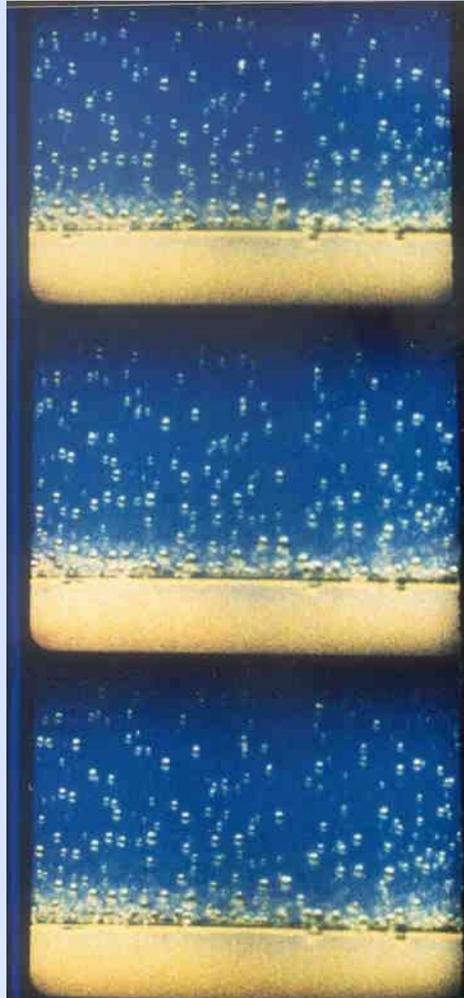


$T_p = 56,3^{\circ}\text{C}$   
 $q'' = 100\text{kW/m}^2$

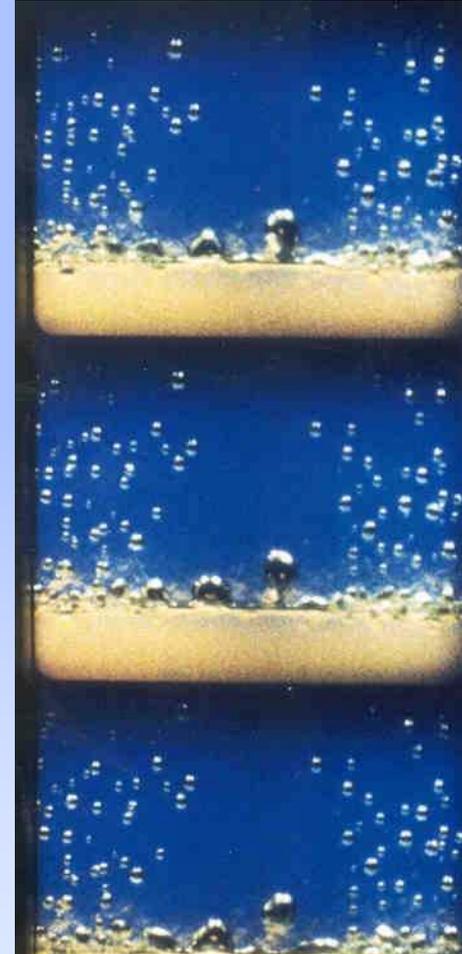
in E.M. Cardoso, 2007, LEPTEN/Boiling - UFSC

## Visualization (2)

Régime  
d'ébullition  
Nucléée



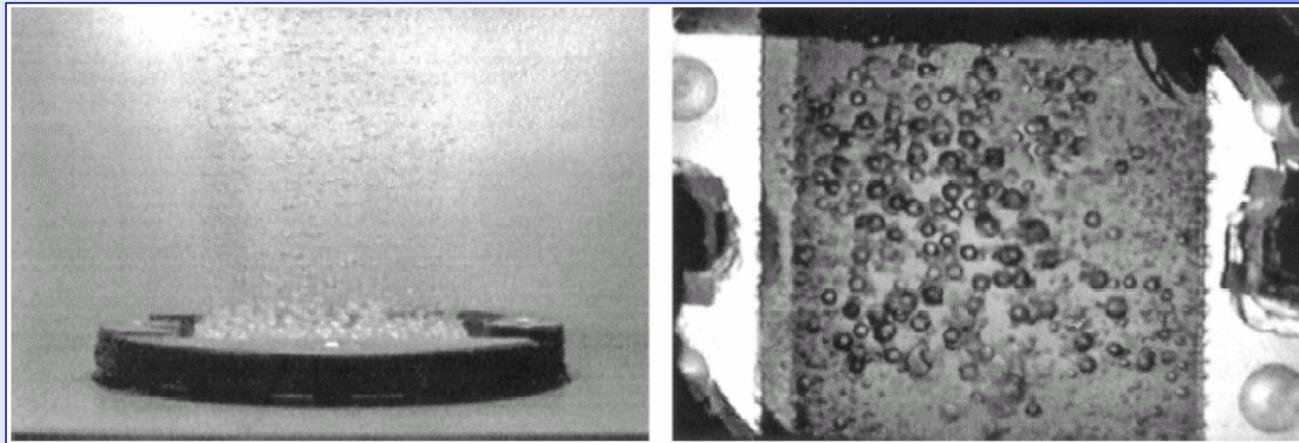
Régime de  
Transition



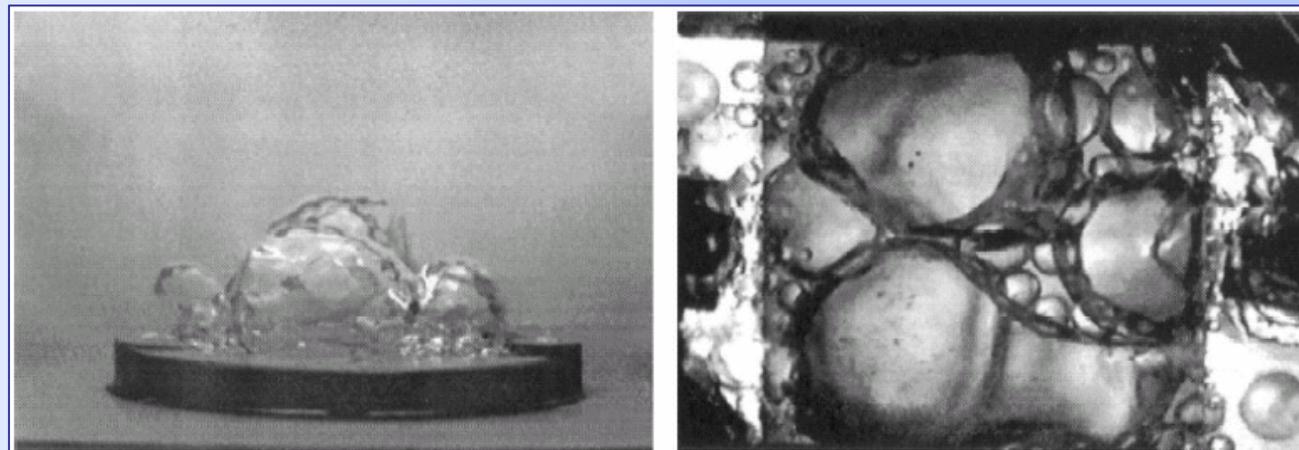
*Images extraites du film: "Les mécanismes de l'ébullition", SFS-France*

# Visualization (3)

Effet de la pesanteur



$p_{atm}$   
 $g=9,8 \text{ m/s}^2$

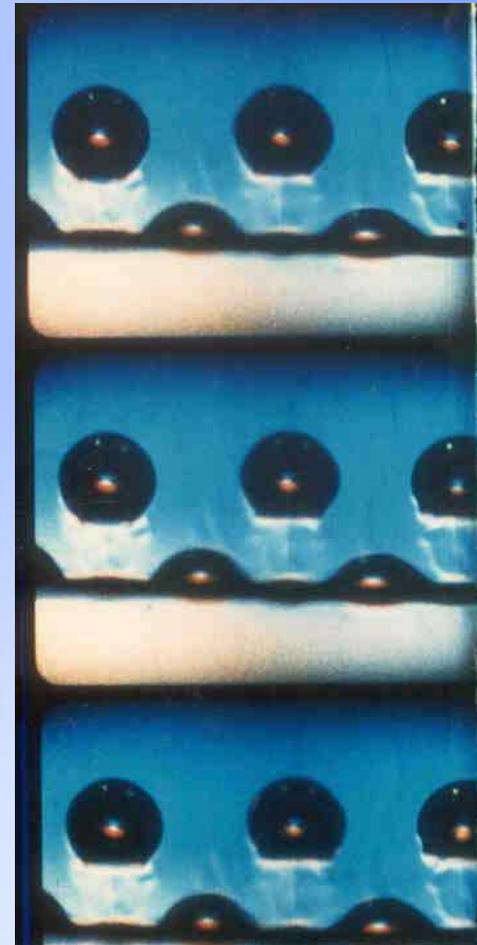
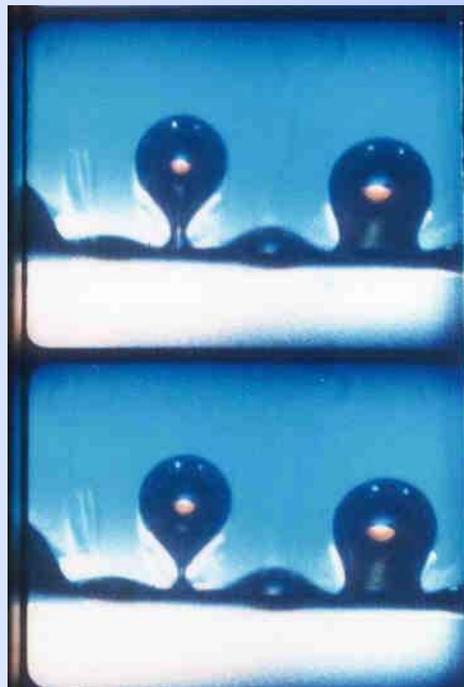


$p_{atm}$   
 $\mu g$

(in Snyder e Chung, 2001)

# Visualization (4)

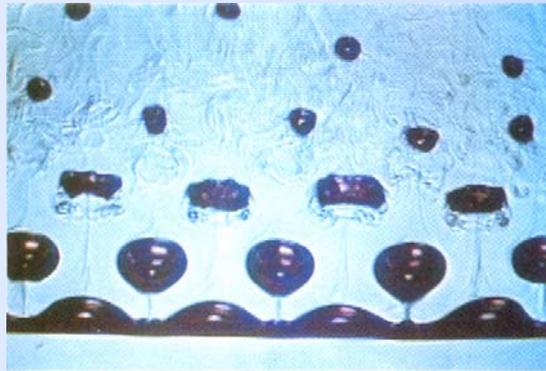
Régime  
d'ébullition  
en film



*Instabilités  
de Taylor*

*Images extraites du film: "Les mécanismes de l'ébullition", SFS-France*

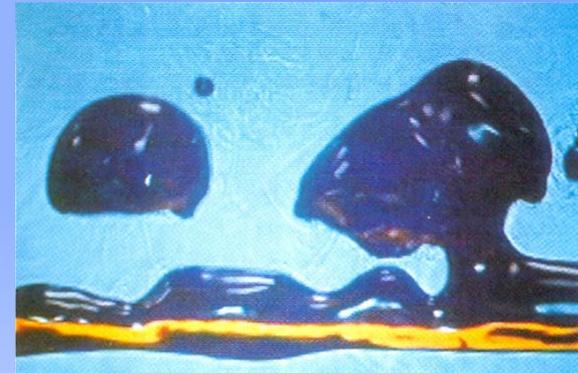
# Comportement organisé et caotique pendant l'ébullition en film du FC-72 sur un fil



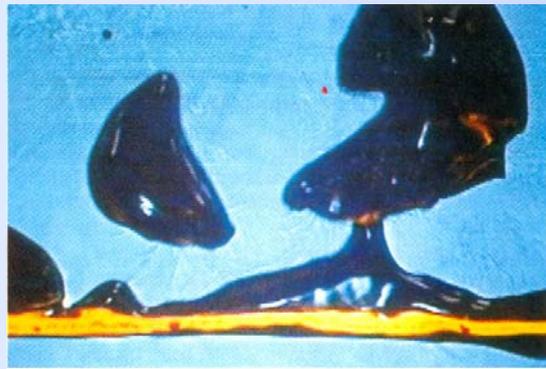
(a)  $q=37 \text{ W/cm}^2$



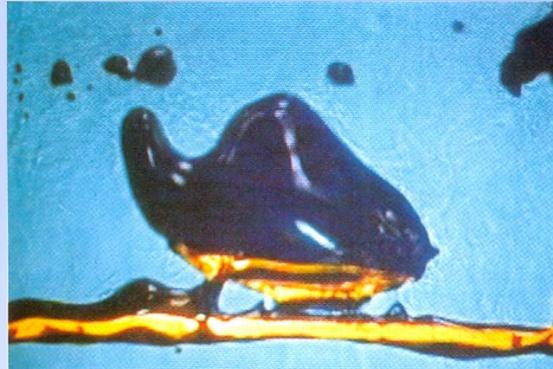
(b)  $q=61 \text{ W/cm}^2$



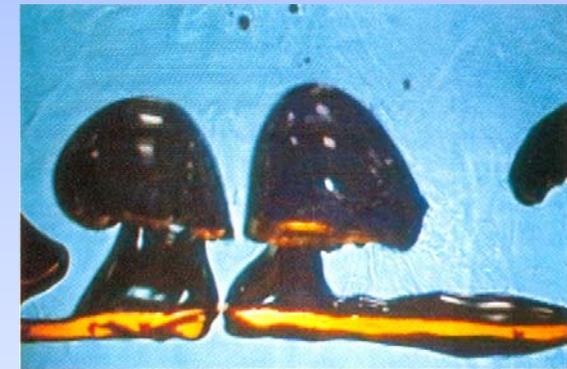
(c)  $q=90 \text{ W/cm}^2$



(d)  $q=99 \text{ W/cm}^2$



(e)  $q=107 \text{ W/cm}^2$  (t)



(t+ 0,067 s) (f)  $q=107 \text{ W/cm}^2$  | 5 mm

Fil de Nichrome ( $T_{\text{fusion}}=1400^\circ\text{C}$ ),  $d= 510 \mu\text{m}$ , immerse en FC-72, à 1 atm ( $T_{\text{sat}}=56^\circ\text{C}$ ), ( $T_{\text{fluide}}=25^\circ\text{C}$ ), Univ. du Texas, Arlington

Hong et al., *Journal of Heat Transfer*, May 1997, Vol. 119, p. 207.



ARCUS-Journées Rhône-Alpes-Brésil:  
CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008

## Visualization (6)

**A- Ebullition  
Nucléée**

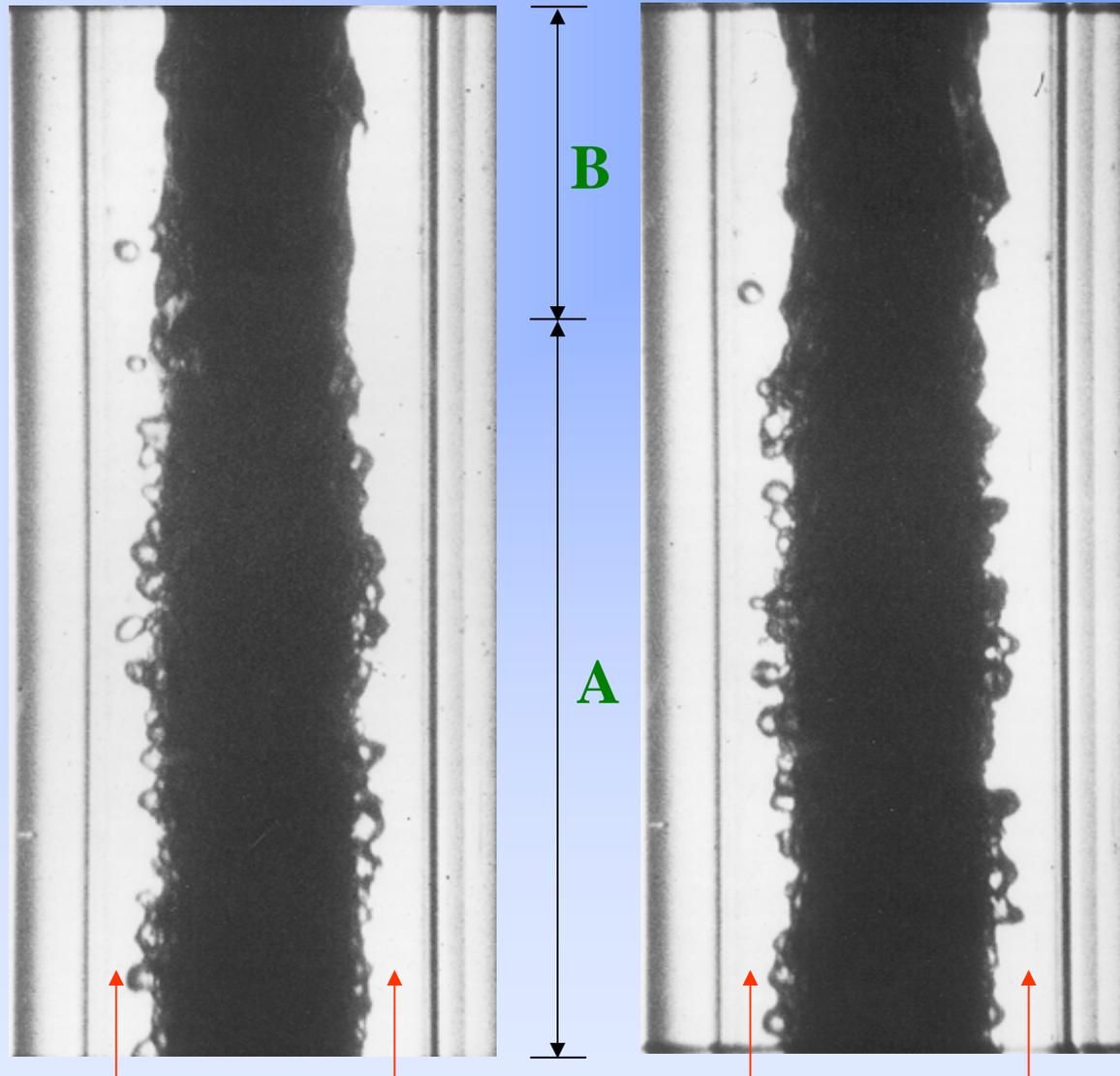
**B- Ebullition  
em Film**

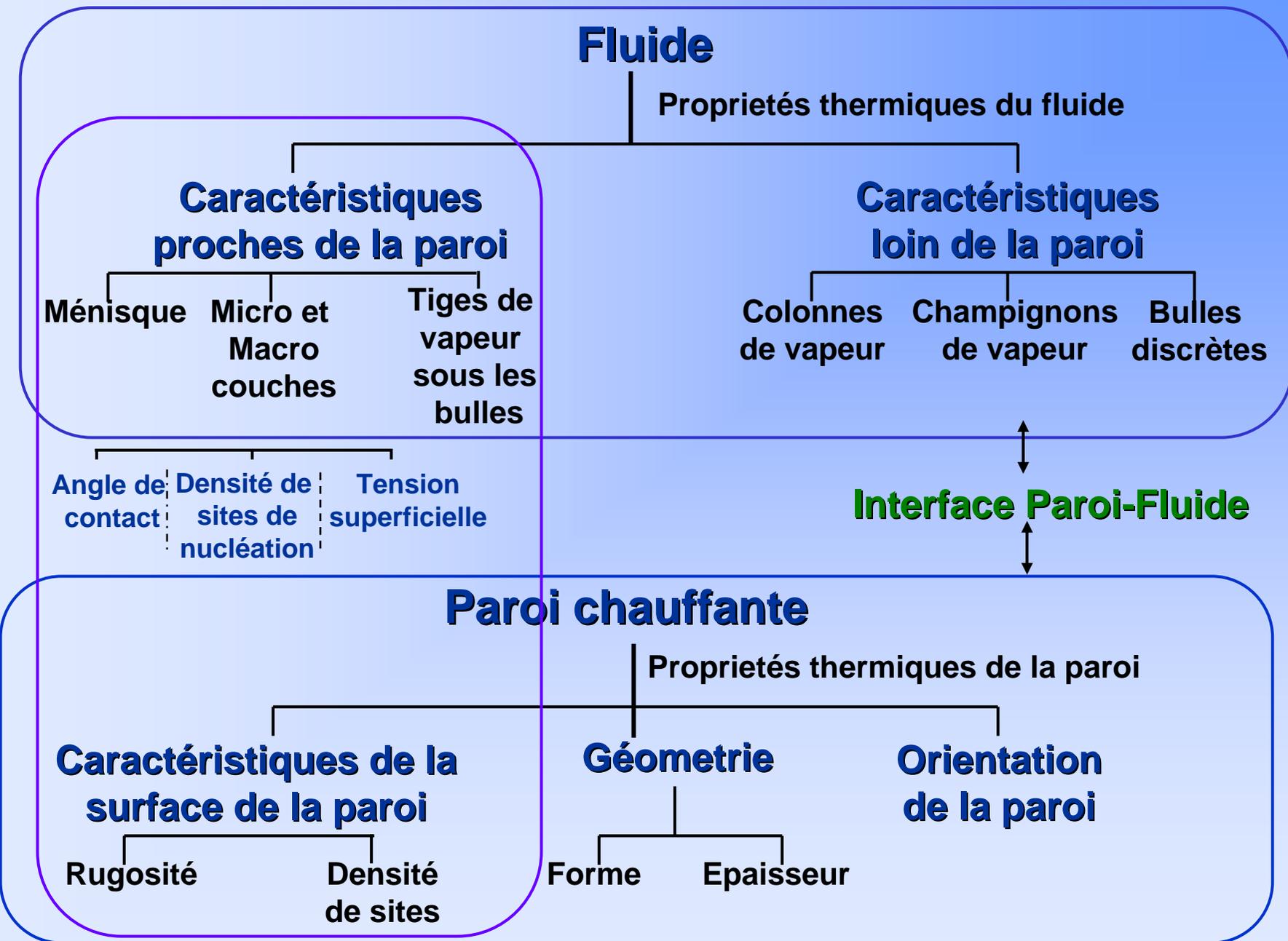
*Ebullition en  
convection forcée*

$p = 1,5 \text{ bar};$   
 $\Delta T_e = 24,7^\circ\text{C}$   
 $G = 218 \text{ kg/m}^2\text{s}$

$q'' = 121 \text{ kW/m}^2$   
(=41 %  $q''_{\text{crit}}$ )  
Caméra rapide:  
1000 images/s

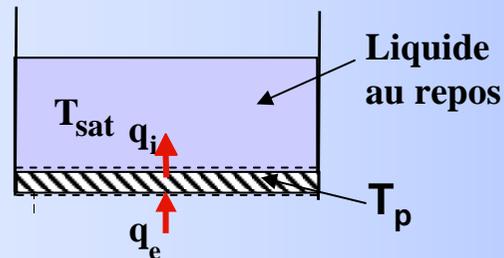
*Images extraites  
de Passos (1989, 1990)*





in, Calka et Judd, IJHMT, vol. 28, p. 2331-2342, 1985

# Condition de stabilité (1)



$$\frac{d(\delta\theta)}{dt} = \frac{S}{\rho V c} [(\delta q_e - \delta q_i) + (q_{e0} - q_{i0})]$$

$$\delta q_e = \frac{\partial q_e}{\partial \theta} \delta\theta \quad \delta q_i = \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \delta\theta$$

$$\frac{d(\delta\theta)}{\delta\theta} = \frac{S}{\rho V c} \left[ \frac{\partial q_e}{\partial \theta} - \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \right] dt$$

$$\delta\theta = \exp \left[ \frac{S}{\rho V c} \left( \frac{\partial q_e}{\partial \theta} - \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \right) \right] t$$

## Bilan thermique

$$\rho c V \frac{dT_p}{dt} = S(q_e - q_i)$$

$$\theta = \theta_0 + \delta\theta$$

$$q_e = q_{e0} + \delta q_e$$

$$q_i = q_{i0} + \delta q_i$$

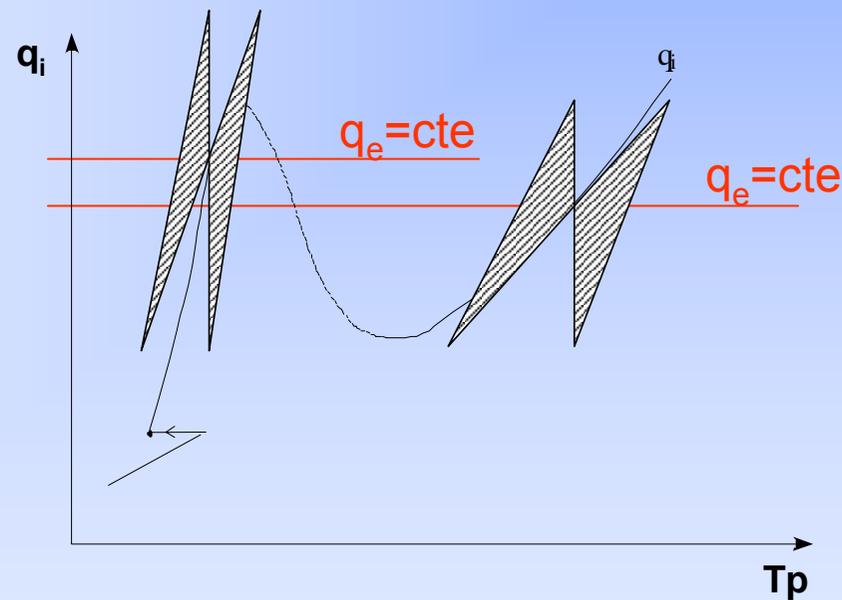
$$\boxed{\frac{\partial q_e}{\partial \theta} < \frac{\partial q_i}{\partial \theta}}$$

in K. Stephan (1965, 1992)

# Condition de stabilité (2)

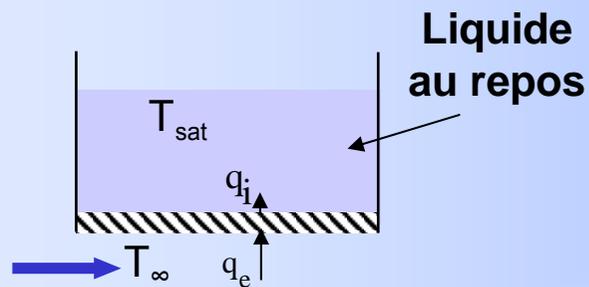
Flux de chaleur constant

$$\frac{\partial q_e}{\partial \theta} = 0 < \frac{\partial q_i}{\partial \theta}$$



# Condition de stabilité (3)

Avec la température de la paroi contrôlée



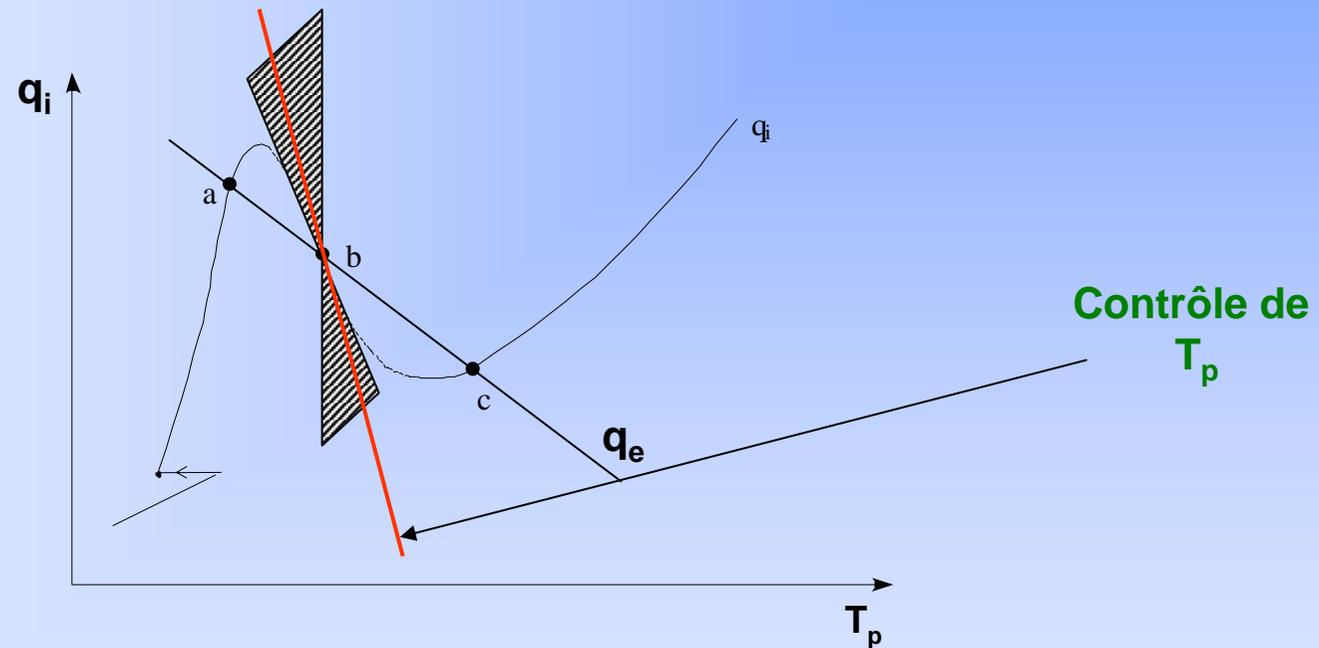
$$\frac{\partial q_e}{\partial \theta} = -h_e \left\langle \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \right\rangle$$

$$q_e = -h_e (T_p - T_\infty)$$

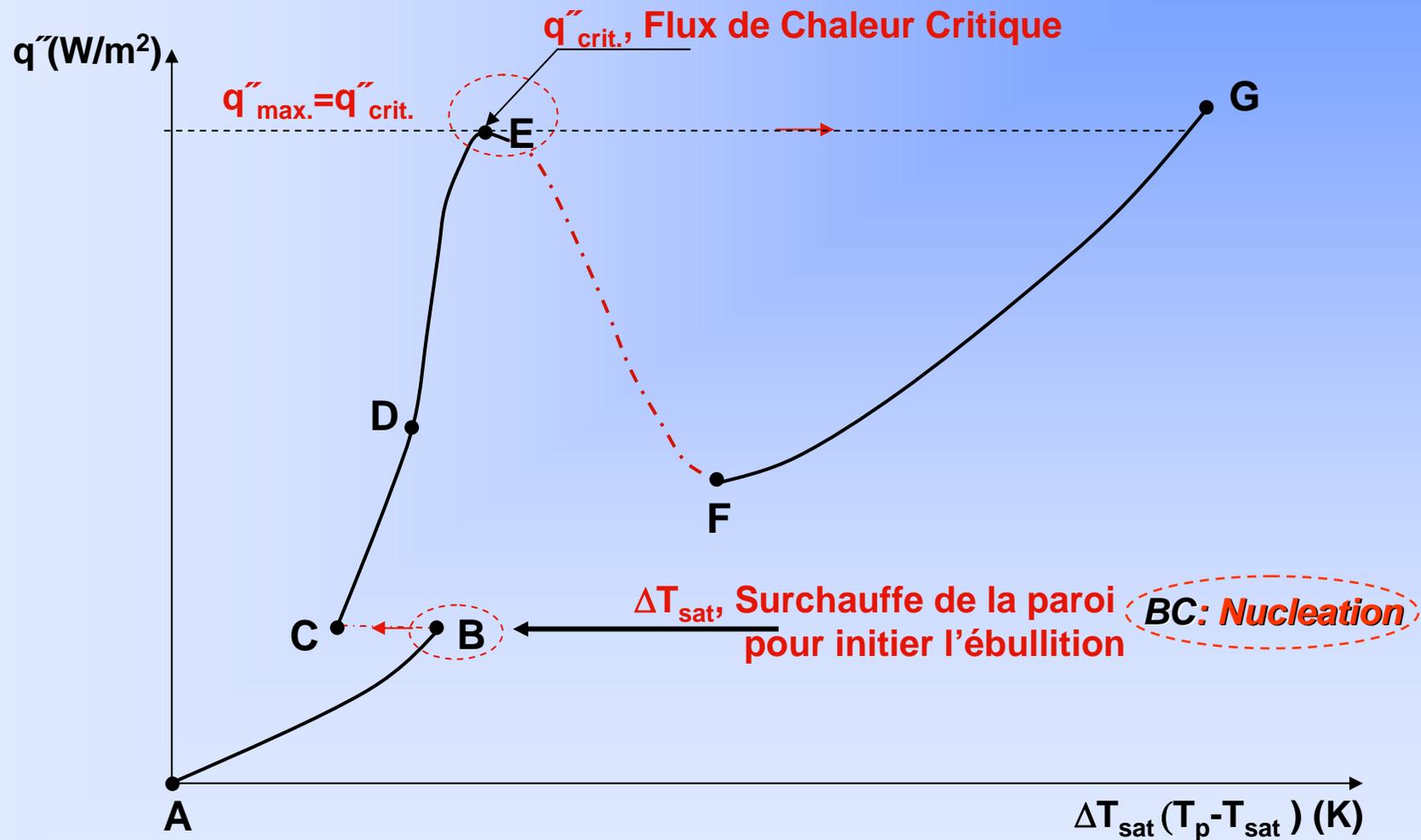
*In Stephan (1965, 1992)*

# Condition de stabilité (4)

Stable dans les points a ou c



# Deux points de projets à connaître



# Surchauffe du liquide

$$\Delta T_{surch} = T_l - T_{sat} \geq \frac{2\sigma T_{sat}}{\rho_v h_{lv} r}$$

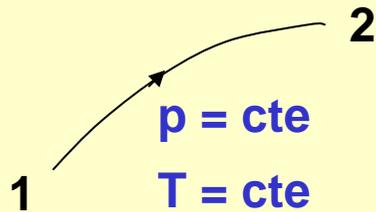
Pour déduire cette équation il faut regarder les équations fondamentales de la nucléation.

Dans les prochains quatre transparents seront présentées ces trois équations.

# Equation 1 de la nucléation

## Equation de Clausius-Clapeyron

Equations de Gibbs-Duhem  
pour chaque phase



$$d\phi_v = v_v dp - s_v dT$$

$$d\phi_l = v_l dp - s_l dT$$

$$\frac{dp}{dT} = \frac{s_v - s_l}{v_v - v_l}$$

De la 1<sup>ère</sup> Loi de la  
thermodynamique

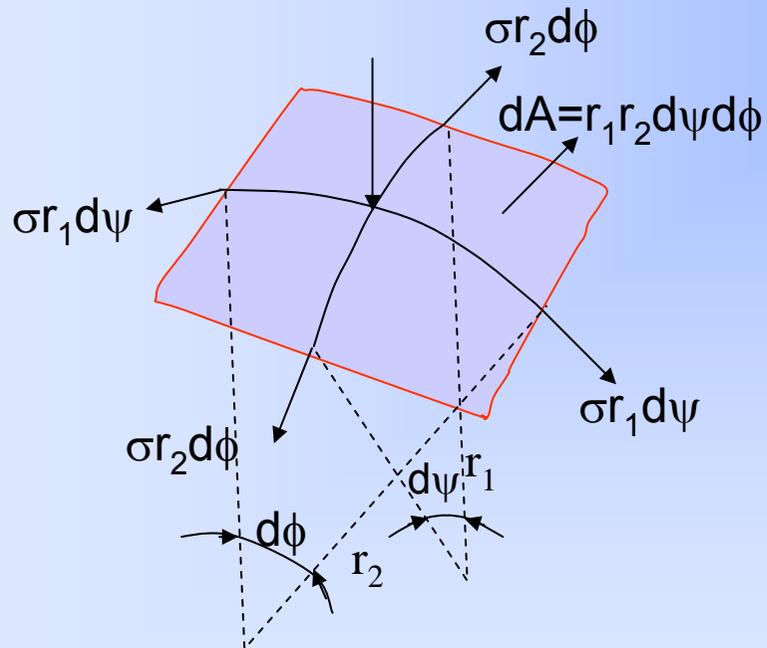
$$\delta q = dh - v dp = T ds$$

Equation de Clausius-Clapeyron

$$\frac{dp}{dT} = \frac{h_{lv}}{T_{\text{sat}} (v_v - v_l)}$$

# Equation 2 de la nucléation

## Equation de Young-Laplace



$$p_v - p_1 = \sigma \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$r_1 = r_2 = r$$

$$p_v - p_1 = \frac{2\sigma}{r}$$

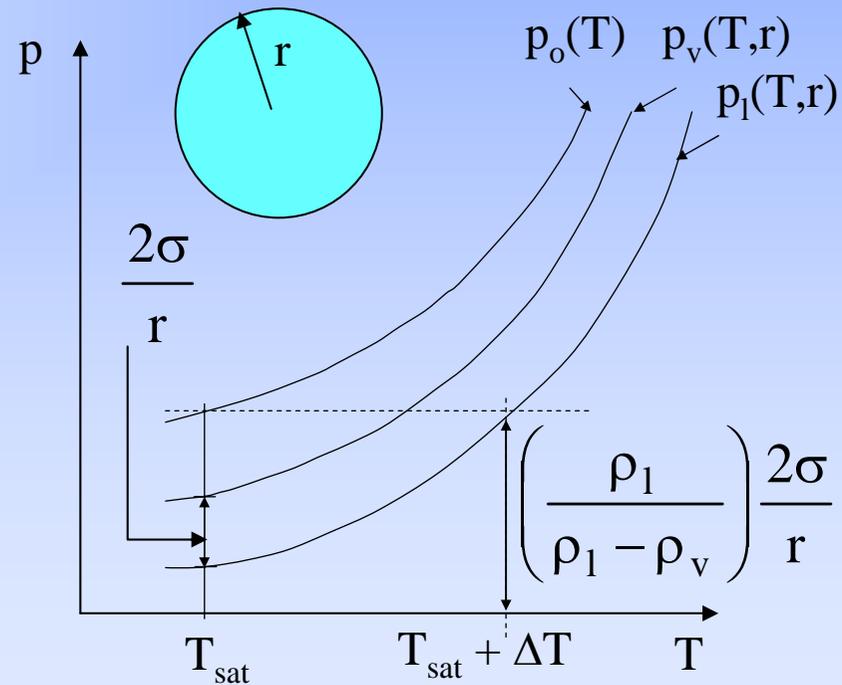
# Equation 3 de la nucléation

## Equations de Thomson

(comparaison de  $p_l(T,r)$  et  $p_v(T,r)$  avec la pression de vapeur dans une interface plane)

$$p_v = p_0 - \left( \frac{\rho_v}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{2\sigma}{r}$$

$$p_l = p_0 - \left( \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{2\sigma}{r}$$



# Surchauffe du liquide

$$p_1 = p_0 - \left( \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{2\sigma}{r}$$

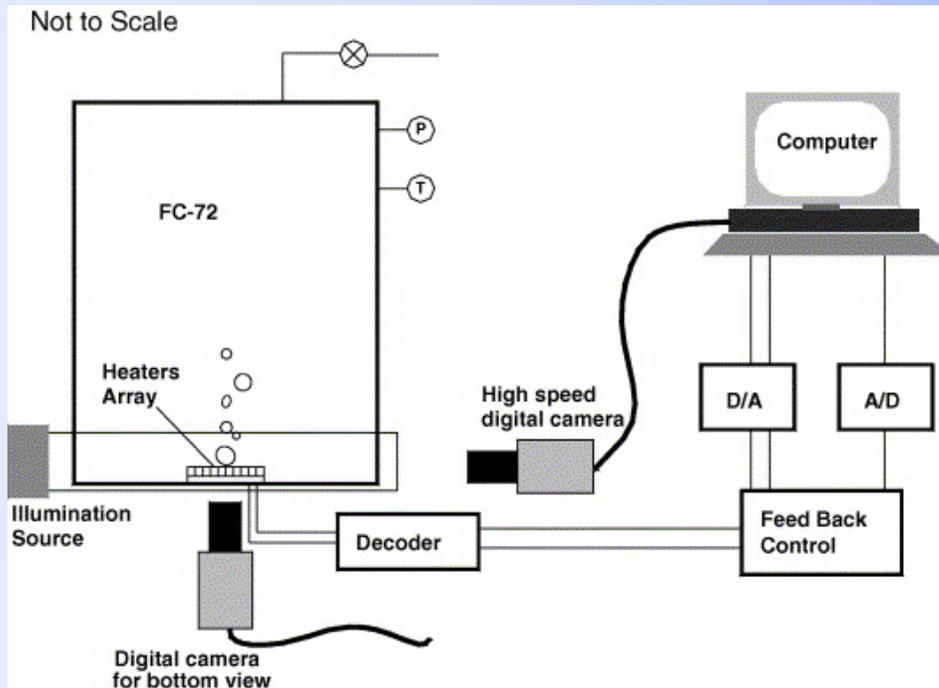
$$\frac{dp_1}{dT} = \frac{dp_0}{dT} - \frac{d}{dT} \left[ \left( \frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{2\sigma}{r} \right]$$

Après l'intégration entre  $T_{\text{sat}}$  et  $T_{\text{sat}} + \Delta T$

$$\Delta T_{\text{sup}} = T_1 - T_{\text{sat}} \geq \frac{2\sigma T_{\text{sat}}}{\rho_v h_{lv} r}$$

# Surchauffe d'une paroi très lisse

Dans ce cas, la nucléation hétérogène est similaire à la nucléation homogène.



FC-72 à 25°C  
 $T_{\text{sat}}(p_{\text{atm}}) = 56^\circ\text{C}$

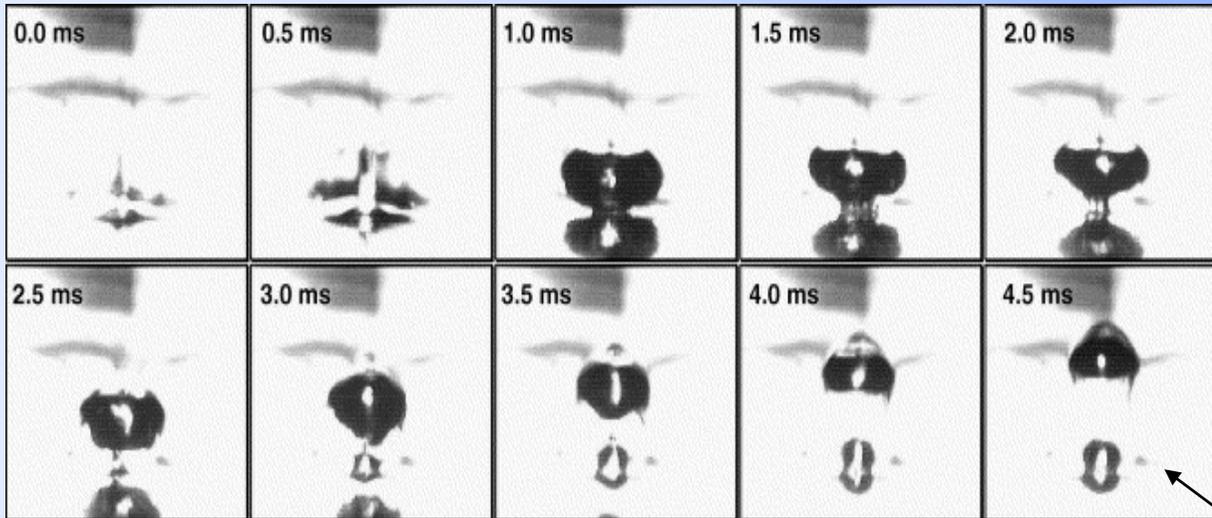
Chen et al., IJHMT, vol. 46, 2006

Température augmentée jusqu'à **135,7°C**  
 sans formation des bulles de vapeur.

À **136°C (80°C de surchauffe)** il y a  
 l'apparition des bulles de vapeur:  
 c'est le début de l'ébullition.

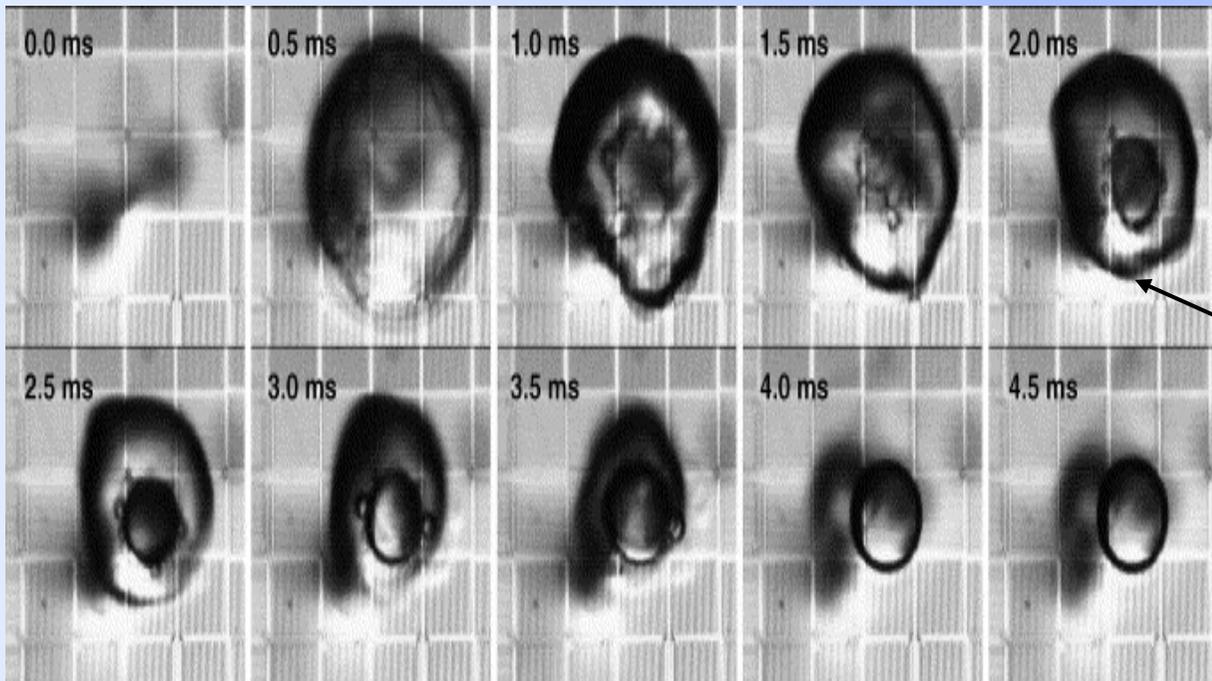
$$J = 1,44 \cdot 10^{40} \left( \frac{\rho_l^2 \sigma}{M^3} \right)^{0,5} \exp \left( \frac{-1,213 \cdot 10^{24} \sigma^3}{T [\eta P_{\text{sat}}(T_l) - P_l]} \right)$$

$$\eta = \exp \left( \frac{P_l - P_{\text{sat}}(T_l)}{\rho_l R T_l} \right)$$



# Surchauffe d'une paroi très lisse

La nucléation  
hétérogène est similiaire  
à la nucléation  
homogène



Vue latérale  
des bulles

Vue des bulles  
par dessous

Chen et al., IJHMT, vol. 46, 2006

ARCUS-Journées Rhône-Alpes-Brésil:  
CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008

# La limite du surchauffe du FC-72 sur une paroi très lisse

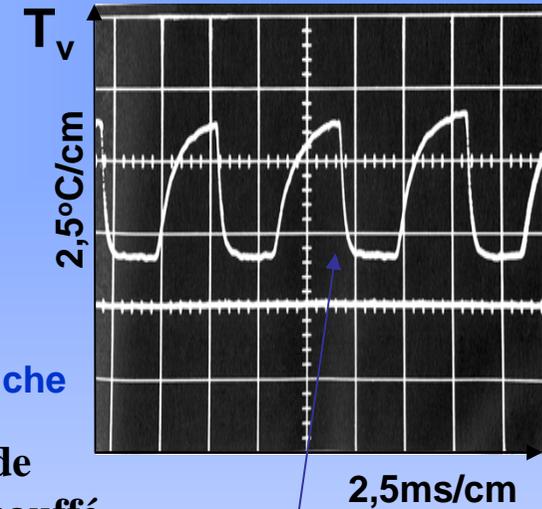
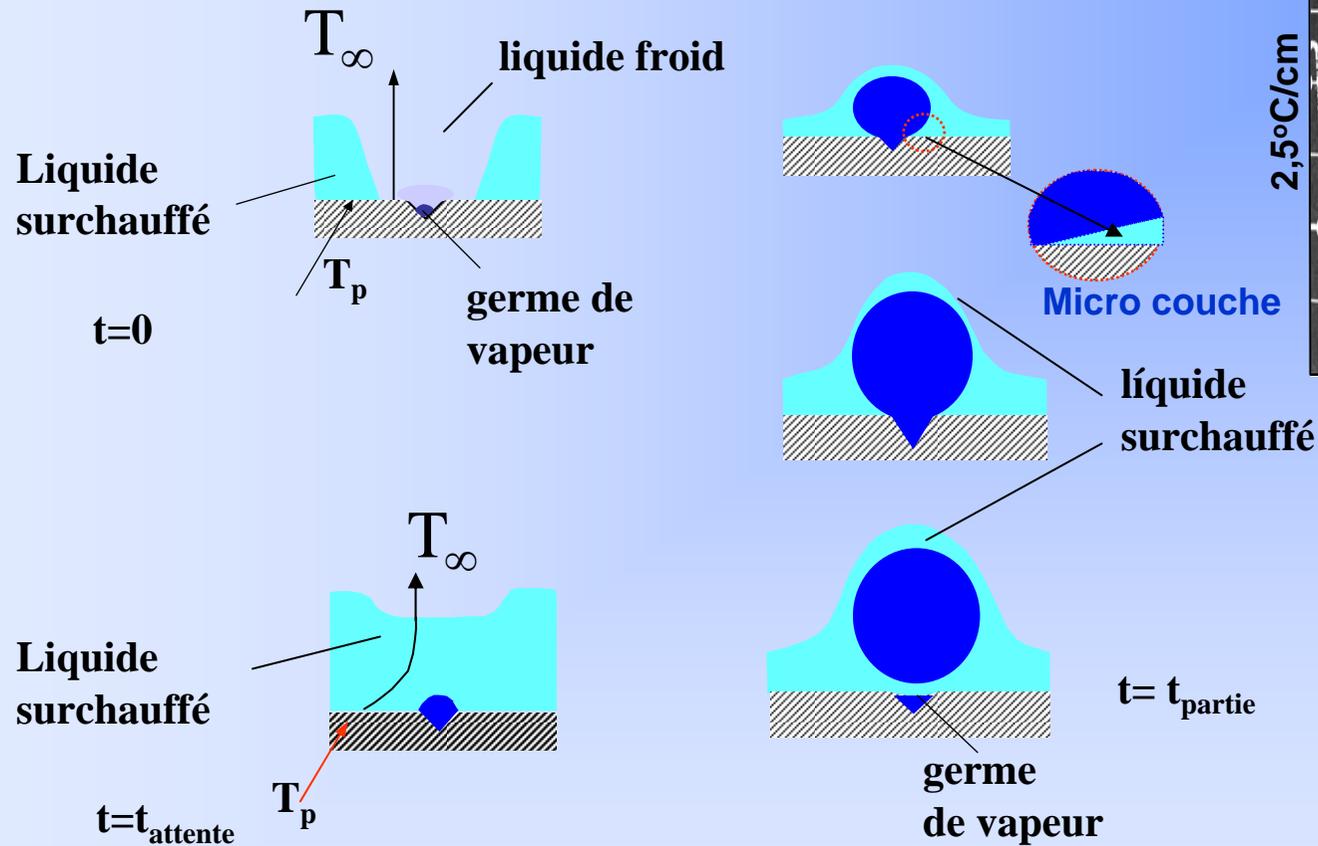
Calculation of threshold nucleation rates of FC-72 at 1 atm

$T_1$ (K)	$P_{sat}$ (kPa)	$\rho_l$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ (N/m)	$J$ (m <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> )
403.2	729.1	1320.9	0.0026	$5.26 \times 10^{-24}$
404.2	745.0	1311.7	0.0025	$1.24 \times 10^{-14}$
405.2	761.1	1302.8	0.0025	$3.97 \times 10^{-8}$
406.2	777.5	1293.9	0.0024	$2.26 \times 10^{-2}$
407.2	794.1	1284.9	0.0023	$2.78 \times 10^3$
408.2	811.0	1276	0.0023	$8.71 \times 10^7$
409.2	828.2	1267.1	0.0022	$0.81 \times 10^{12}$
409.3	829.9	1266.2	0.0022	$1.90 \times 10^{12}$
410.2	845.7	1258.1	0.0021	$4.40 \times 10^{12}$
411.2	863.4	1249.2	0.0021	$2.55 \times 10^{15}$
412.2	881.3	1240.3	0.0020	$3.07 \times 10^{18}$
413.2	899.6	1232.8	0.0020	$1.57 \times 10^{21}$

Chen et al., IJHMT, vol. 46, 2006

ARCUS-Journées Rhônes-Alpes-Brésil:  
CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008

# Cycle de bulles



Température à l'intérieur d'une bulle de vapeur

$$t_{\text{attente}} + t_{\text{croissance}} = t_{\text{partie}}$$

# Le flux de chaleur critique

## Modèle de Zuber

- Limite d'opération pour le régime d'ébullition nucléée
- Nomenclature:
  - Flux de chaleur critique (“**CFC - Critical Heat Flux**”)  
(liquide sous-refroidit ou à faible titre de vapeur)
  - “Burnout” (*terme plus ancien*); Crise d'ébullition
  - Séchage de la paroi (“**dryout**”) (titre de vapeur élevé)

# Le modèle de Zuber pour le flux de chaleur critique (1)

$$q_{m\acute{a}x,Z} = 0,131\rho_v^{0,5} h_{lv} [\sigma g (\rho_l - \rho_v)]^{\frac{1}{4}}$$

## Conditions du problème

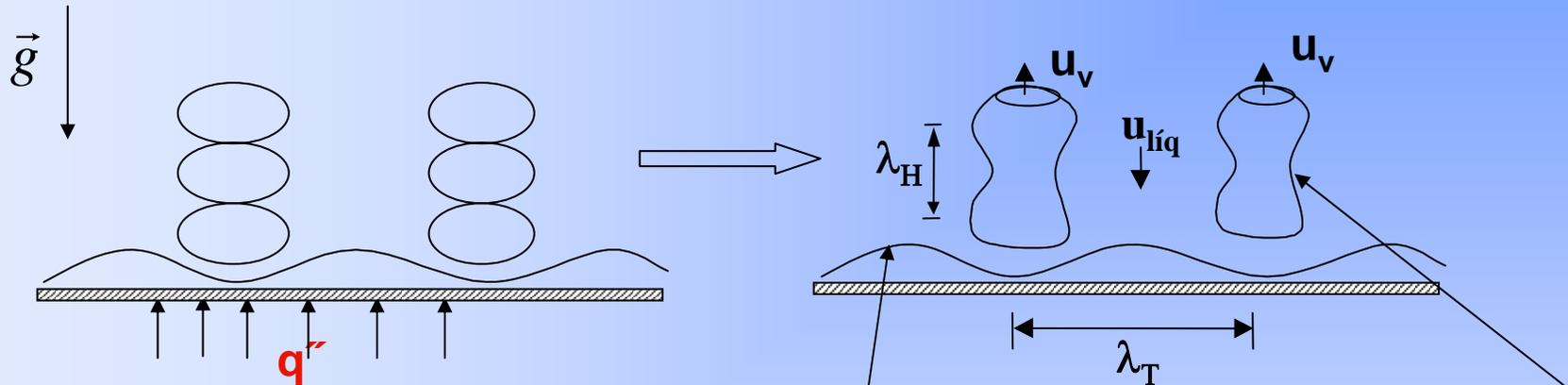
- ébullition libre
- sur une plaque chauffante plane horizontale infinie
- surface chauffée de la plaque placée vers le haut
- liquide à la température de saturation,  $T_{liq} = T_{sat}(p_{liq})$

# Le modèle de Zuber (2)

## *Postulat*

Les instabilités hydrodynamiques de **Taylor** e de **Helmholtz** sont à l'origine du phénomène de crise d'ébullition (**flux de chaleur critique**) dans l'ébullition libre sur une plaque plane.

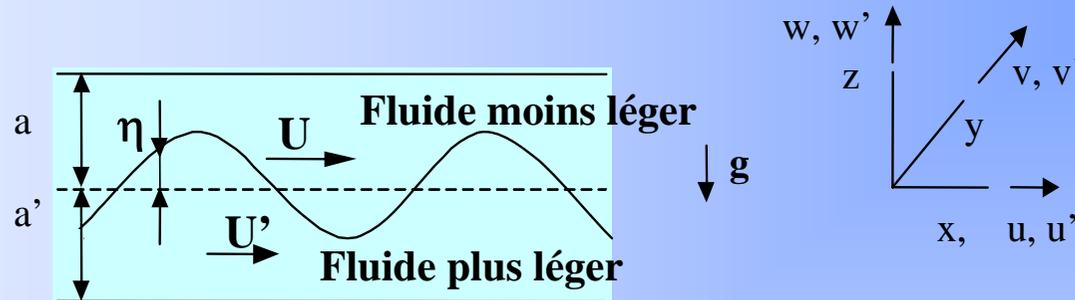
# Le modèle de Zuber (3)



Colonnes de vapeur formées par les successions des bulles qui partent de la paroi, proche du flux de chaleur critique.

***l'idée clé***  
Interaction entre les instabilités de  
**Taylor et de Helmholtz**

# L'instabilité de Taylor (1)



$$\eta = \eta(x, y, t)$$

$$\mathbf{V} = (U + u) \mathbf{i} + v \mathbf{j} + w \mathbf{k}$$

$$\mathbf{V}' = (U' + u') \mathbf{i} + v' \mathbf{j} + w' \mathbf{k}$$

$$\rho (\omega + U m_1)^2 \cot h(a L_o) + \rho' (\omega + U' m_1)^2 \cot h(a' L_o) = \sigma L_o^3 - (\rho - \rho') L_o g$$

*Fréquence d'oscillation de l'interface*

$$m_1 = \frac{2\pi}{\lambda_1} \quad , \quad m_2 = \frac{2\pi}{\lambda_2} \quad \longrightarrow \quad L_o^2 = m_1^2 + m_2^2$$

# L'instabilité de Taylor (2)

$$\mathbf{U} = \mathbf{U}' = \mathbf{0}$$

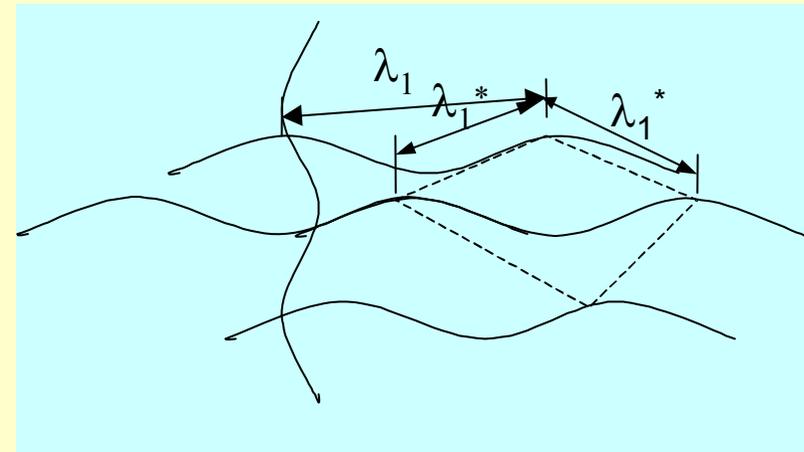
$$a \rightarrow \infty$$

$$a' \rightarrow \infty$$

$$\omega^2 = \frac{\sigma L_o^3 - (\rho - \rho')gL_o}{(\rho + \rho')}$$

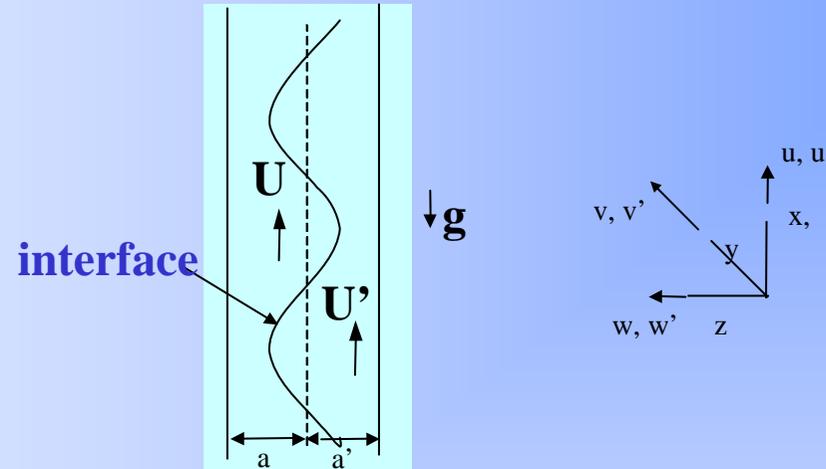
$$\lambda_1^* = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2}} = 2\pi \left[ \frac{\sigma}{(\rho - \rho')g} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\lambda_2^* = 2\pi \left[ \frac{3\sigma}{(\rho - \rho')g} \right]^{\frac{1}{2}}$$



$$\lambda_1^* \leq \lambda_T \leq \lambda_2^*$$

# L'instabilité de Helmholtz



$$\omega = -m_1 \left[ \left( \frac{\rho U + \rho' U'}{\rho + \rho'} \right) \pm \sqrt{\frac{\sigma L_o^3}{m_1^2 (\rho + \rho')} - \frac{\rho \rho' (U - U')^2}{(\rho + \rho')^2}} \right]$$

$$m_1 = L_o = m_H$$

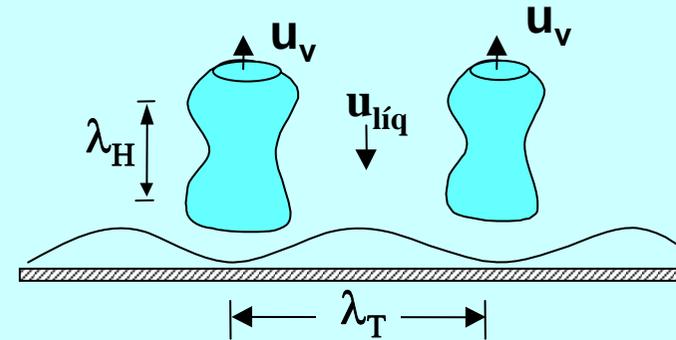
$$\rho = \rho_{\text{liq}} ; \quad \rho' = \rho_v$$

$$U' = u_v ; \quad U = -u_{\text{liq}}$$

$$\frac{\sigma L_o^3}{m_1^2 (\rho + \rho')} \geq \frac{\rho \rho' (U - U')^2}{(\rho + \rho')^2}$$

# Le modèle de Zuber (4)

$$\lambda_H = 2\pi R = 2\pi \frac{\lambda_T}{4} = \frac{\pi \lambda_T}{2}$$



$$\rho_v u_v = \rho_{líq} u_{líq}$$

*De l'instabilité de Helmholtz*

$$u_v = \left( \frac{\sigma m_H}{\rho_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho_{líq}}{\rho_{líq} + \rho_v} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\rho_v (\pi R^2) u_v = \rho_v \left( \frac{4}{3} \pi R^3 \right) 2f$$

$$4R = \lambda_T$$

$$u_v = \frac{8}{3} Rf = \frac{2}{3} \lambda_T f$$

## Le modèle de Zuber (5)

$$q_{i_{\text{crit}}} = h_{lv} G_v$$

$$G = \frac{(\text{Nombres.de.Bulles.par.cellules.par.période})(\text{Nombre.de.cellules})(\text{Masse.d'une.bulle})}{\text{Aire.de.la.surface}}$$

$$G_v = \frac{2}{\tau} \left( \frac{S}{\lambda_T^2} \right) \frac{1}{S} \left( \rho_v \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \right) = \frac{\pi}{24} \rho_v \frac{\lambda_T}{\tau} = \frac{\pi}{24} \rho_v \lambda_T f$$

$$q_{i_{\text{crit}}} = h_{lv} \frac{\pi}{24} \rho_v \lambda_T f = \frac{\pi}{16} \rho_v h_{lv} u_v$$

# Le modèle de Zuber (6)

$$q_{i_{\text{crit}}} = \frac{\pi}{16} \rho_v h_{lv} \left( \frac{2\pi\sigma}{\lambda_H \rho_v} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{\rho_{\text{liq}}}{\rho_{\text{liq}} + \rho_v} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$0,119 \cdot \rho_v h_{lv} (A.B) \leq q_{i_{\text{crit}}} \leq 0,157 \cdot \rho_v h_{lv} (A.B)$$

$$A = \left[ \frac{\sigma g (\rho_{\text{liq}} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad B = \left[ \frac{\rho_{\text{liq}}}{\rho_{\text{liq}} + \rho_v} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$q_{i_{\text{crit}}} = 0,131 \cdot h_{lv} \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_{\text{liq}} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{\frac{1}{4}} \left( \frac{\rho_{\text{liq}}}{\rho_{\text{liq}} + \rho_v} \right)^{\frac{1}{2}}$$

(Zuber e Tribus, 1958; Zuber, 1959)

**Conditions**

**Eau**

**Alcool étilique**

**$p \leq 205\text{bar}$**

**Incertitude**

**$\pm 14\%$**

# La corrélation de Kutateladze pour le flux de chaleur critique (1)

## Analyse dimensionnelle

$$-\rho_v (\mathbf{V}_v \cdot \nabla) \mathbf{V}_v + \rho_{\text{liq}} (\mathbf{V}_{\text{liq}} \cdot \nabla) \mathbf{V}_{\text{liq}} = \nabla(p_v - p_{\text{liq}}) + (\rho_{\text{liq}} - \rho_v) \mathbf{g}$$

$$p_v - p_{\text{liq}} = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$$u_v' = u_v / u_{v\text{crit}}, \quad x' = x/l, \quad u_{\text{liq}}' = u_{\text{liq}} / u_{\text{crit}}, \quad \Delta p' = (p_v - p_{\text{liq}}) / (\sigma/l)$$

$$-u_v' \frac{\partial u_v'}{\partial x'} + \dots + \left[ \frac{\rho_{\text{liq}} u_{\text{crit}}^2}{\rho_v u_{v\text{crit}}^2} \right] u_{\text{liq}}' \frac{\partial u_{\text{liq}}'}{\partial x'} + \dots = \left[ \frac{\sigma}{l \rho_v u_{\text{crit}}^2} \right] \frac{\partial (\Delta p')}{\partial x'} + \left[ \frac{(\rho_{\text{liq}} - \rho_v)}{\rho_v} \right] \left[ \frac{g l}{u_{\text{crit}}^2} \right]$$

[Nombre de WEBER]<sup>-1</sup>

Nombre de FROUDE

## La corrélation de Kutateladze (2)

$$o \left[ \frac{\sigma}{\ell \rho_v u_{\text{crít}}^2} \right] = o \left[ \frac{(\rho_{\text{líq}} - \rho_v) g \ell}{\rho_v u_{\text{crít}}^2} \right] = o(1)$$

$$\ell = \frac{\sigma}{\rho_v u_{\text{crít}}^2} \quad \frac{\sigma g (\rho_{\text{líq}} - \rho_v)}{\rho_v^2 u_{\text{crít}}^4} = o(1) \quad \longrightarrow \quad u_{\text{crít}} = K \left[ \frac{\sigma g (\rho_{\text{líq}} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$q_{i_{\text{crít}}} = \rho_v u_{\text{crít}} h_{\text{lv}}$$

$$q_{i_{\text{crít}}} = K \rho_v h_{\text{lv}} \left[ \frac{\sigma g (\rho_{\text{líq}} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$K = 0,16$$

(Kutateladze, 1963)

# Valeurs du flux de chaleur critique

Fluide [p(bar); $T_{\text{sat}}$ (°C)]	$q''$ (W/cm <sup>2</sup> )
FC-72 (1 bar; 56,6°C)	15,3
HFC-R-134a (1,30 bar; -20°C)	27,0
HFC-R-134a (2,94 bar; 0°C)	34,3
HCFC-R-22 (1 bar; °C)	26,4
HCFC-R-22 (2,2 bar; -22,5°C)	34,6
Eau (1 bar; 100°C)	110,8
Eau (2,47 bar; 127°C)	157,6
Eau (61,2 bar; 277°C)	395,1

# Effet du sous-refroidissement sur le flux de chaleur critique

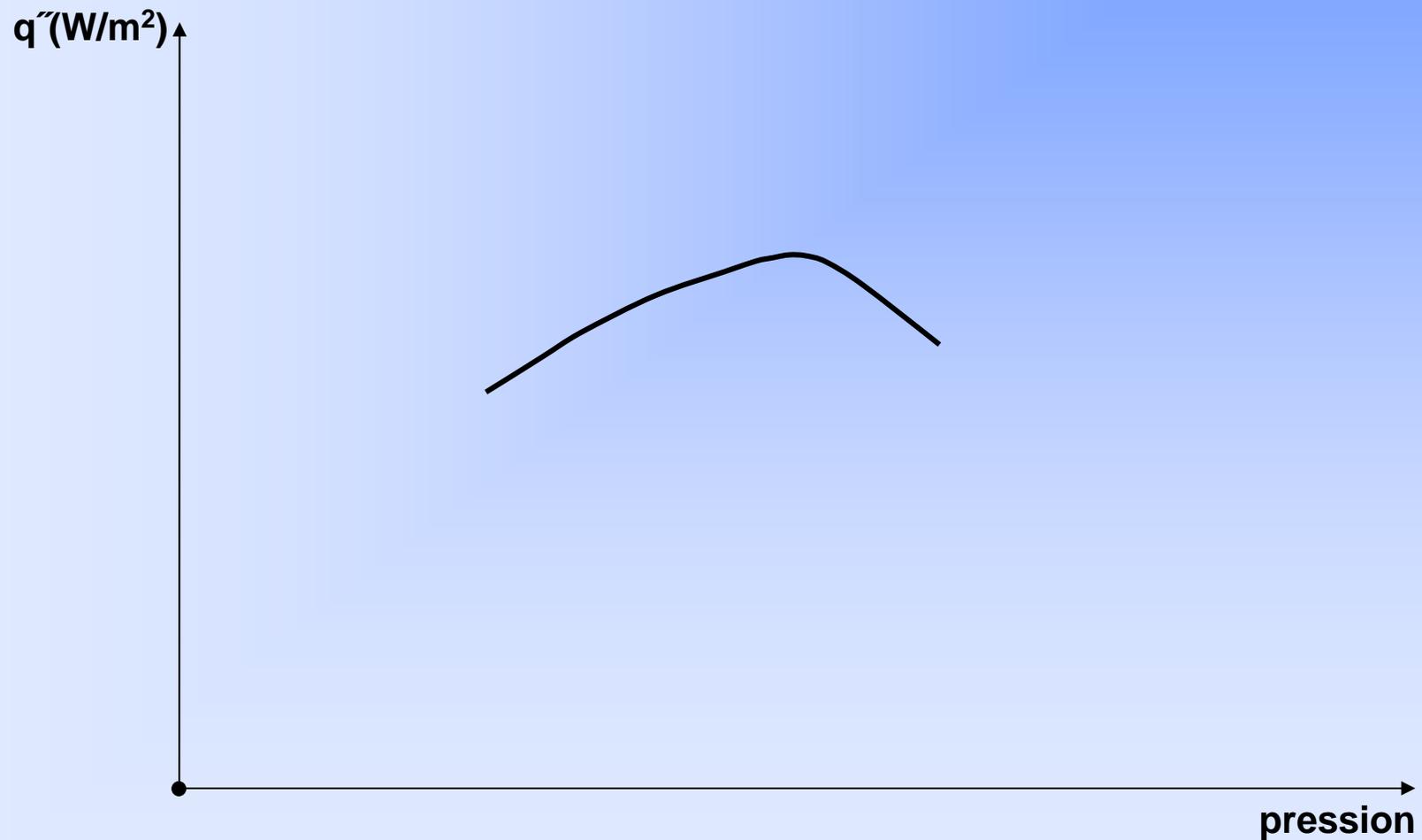
## Corrélation de Zuber et al. (1961)

$$q''_{crit} = 0,16 \cdot h_{lv} \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_{liq} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{\frac{1}{4}} (1 + B)$$

$$B = \left\{ 1 + \frac{(5,32 / \rho_v h_{lv}) [g (\rho_l - \rho_v) / \sigma]^{1/4} (k_l c_p \rho_l)^{1/2} (T_{sat} - T_l)}{[g \sigma (\rho_l - \rho_v) \rho_v^2]^{1/8}} \right\}$$

Quand  $T_{sat} = T_l$ ;  $B = 1$ .

# Effet de la pression sur le flux de chaleur critique



# Effet du sous-refroidissement sur le flux de chaleur critique

## Corrélation de Ivey et Morris (1962)

$$q''_{crit} = 0,16 \cdot \rho_v h_{lv} \left( \frac{\sigma g (\rho_{liq} - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{\frac{1}{4}} (1 + B)$$

$$B = 0,1 \cdot \left( \frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{0,75} Ja \quad Ja = \frac{c_{pl} (T_{sat} - T_l)}{h_{lv}}$$

**Ja: Nombre de Jakob**

# Analyse de l`influence des différents paramètres

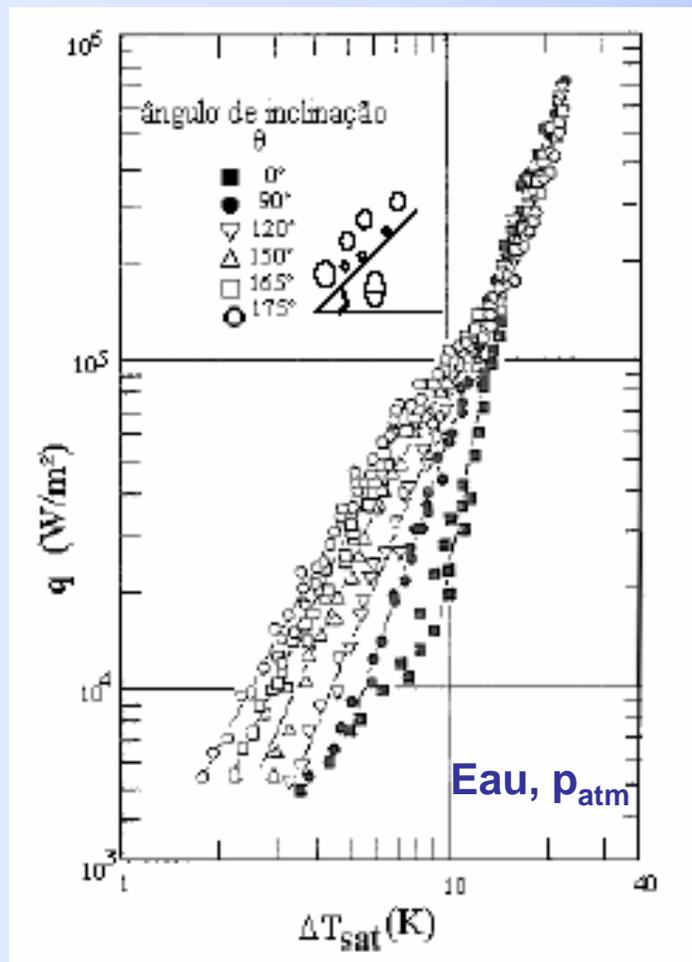


**LEPTEN** LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS  
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA



*ARCUS-Journées Rhône-Alpes-Brésil:*  
**CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008**

# Effet de l'orientation de la surface par rapport au vecteur $g$



Aux flux de chaleur faibles et modérés, une augmentation de l'angle d'inclinaison  $\theta$  cause l'intensification de l'ébullition.

Pour les forts flux de chaleur (ébullition développée) les mécanismes liés aux mouvements des bulles sont moins importants.

Transfert de chaleur dominé par la vaporisation.

*in, Nishikawa et al., "Effet of surface configuration on nucleate boiling heat transfer", IJHMT, vol. 27(9), pp. 1559-1571, 1984.*

# Influence de l'état de surface sur l'ébullition nucléée

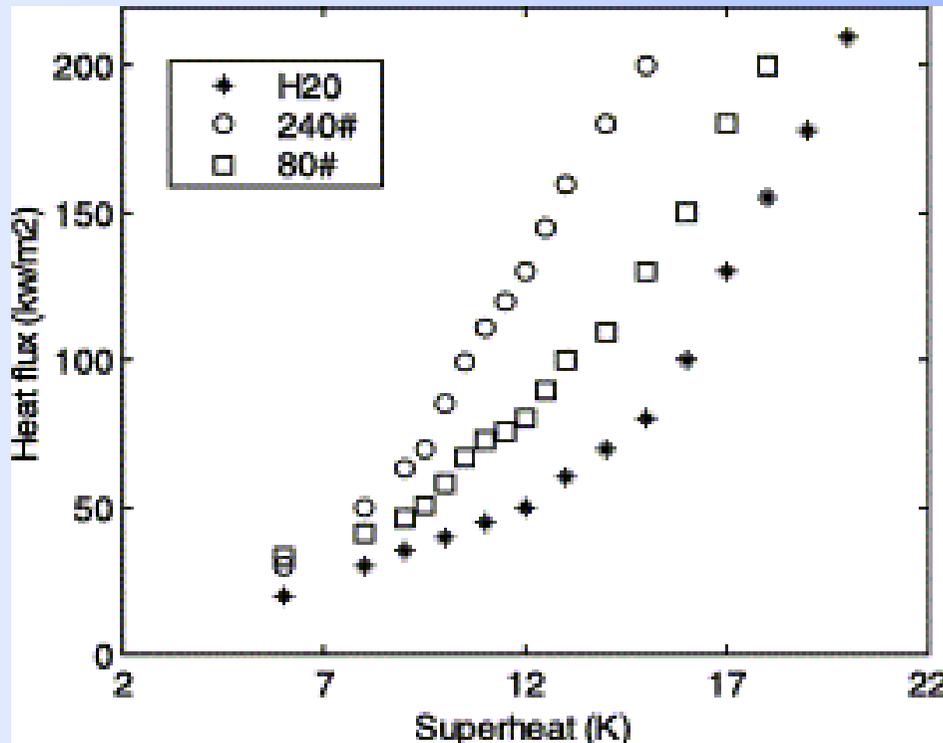
(prochains trois transparents)

# Effet des modes de préparation des surfaces

Luke e Gorenflo (2000)  $\Rightarrow$  Les caractéristiques des transferts thermiques en ébullition nucléée peuvent être différentes selon les procédures de préparation des surfaces, même quand les surfaces présentent les mêmes rugosités.

# Effet de la rugosité

Une augmentation de la rugosité déplace la courbe d'ébullition vers les faibles surchauffes.

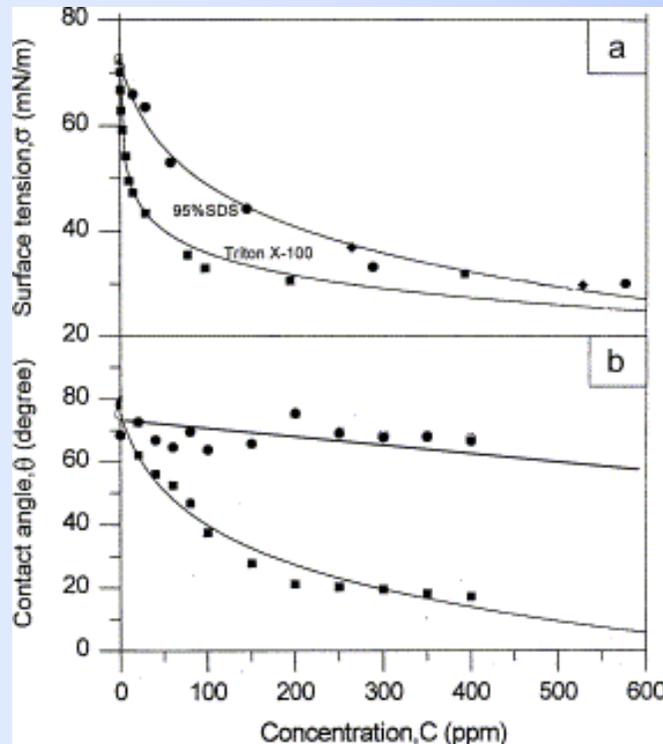


Effet de la rugosité sur le coefficient de transfert de chaleur

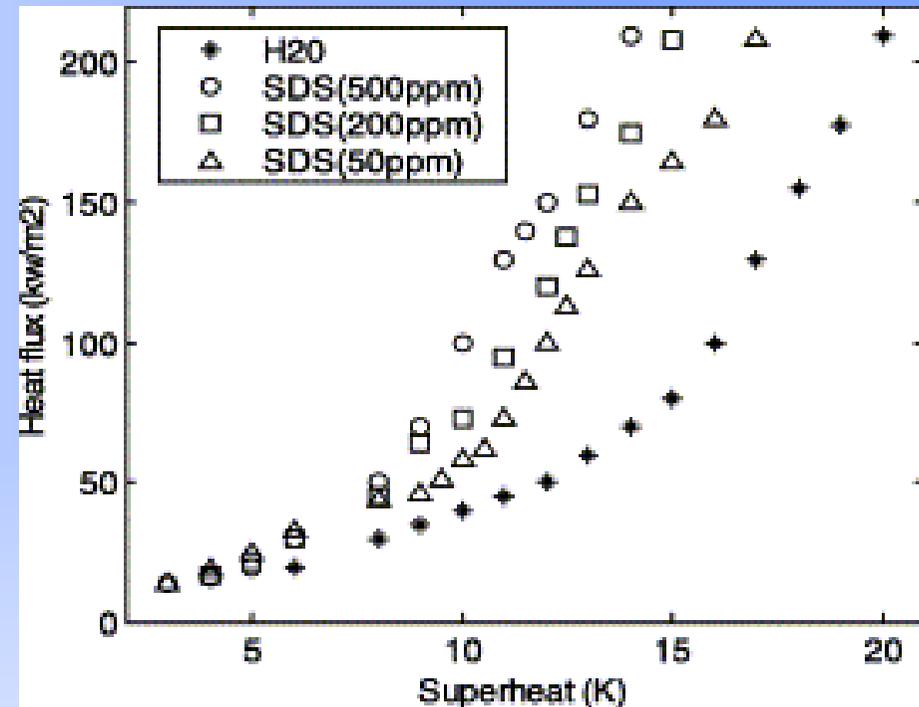
Fluide: Eau

in, Wen et Wang, *IJHMT*, vol. 45(8), 1739-1747

# Effet de mouillabilite



Variation de la tension superficielle et de l'angle de contact avec la concentration de surfactants



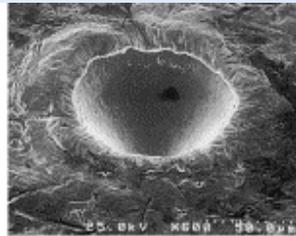
Effet de la concentration de SDS sur le coefficient de transfert de chaleur

Fluide: Eau

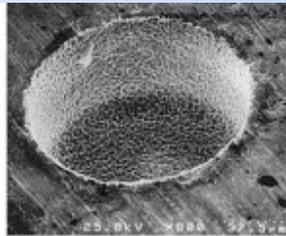
Surfactantes testés: SDS, Triton X-100 et Octadecylamine

in, Wen et Wang, *IJHMT*, vol. 45(8), 1739-1747

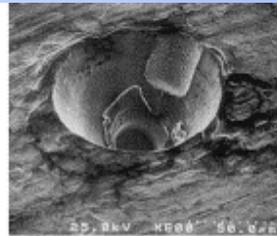
# Influence du type des cavités sur l'ébullition nucléée



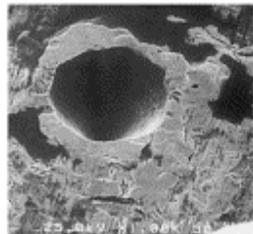
(a) Conical,  $D=100 \mu m$



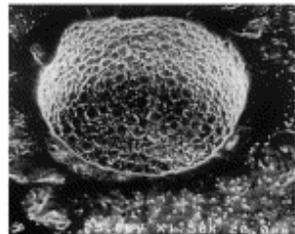
(b) Cylindrical,  $D=100 \mu m$



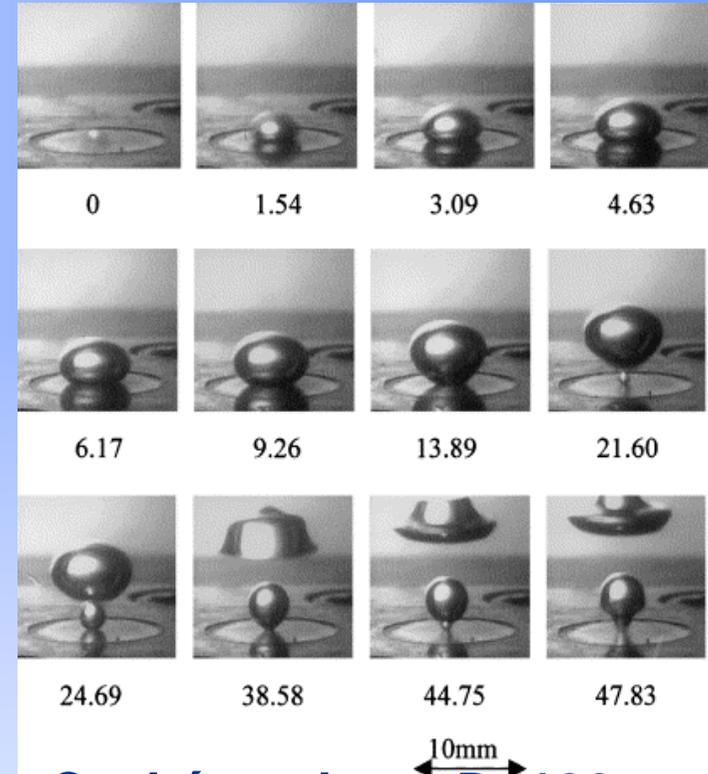
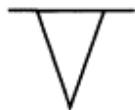
(c) Reentrant,  $D=100 \mu m$



(d) Conical,  $D=50 \mu m$



(e) Cylindrical,  $D=50 \mu m$



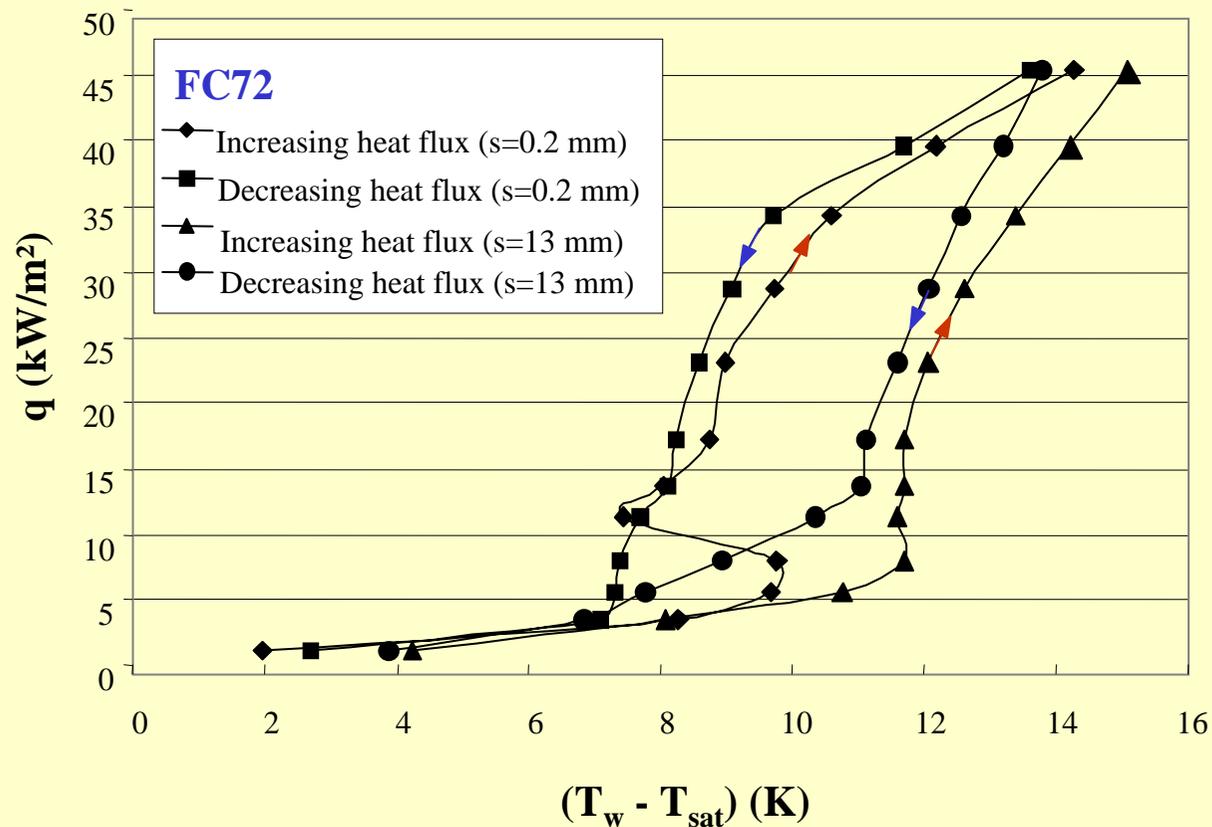
Cavité conique,  $D=100 \mu m$

**Cavité conique: fluctuations de températures et intermittance de l'ébullition, surchauffe élevée afin de maintenir l'ébullition;**

**Cavités cylindrique et reentrée: processus d'ébullition continu et stable, faible surchauffe.**

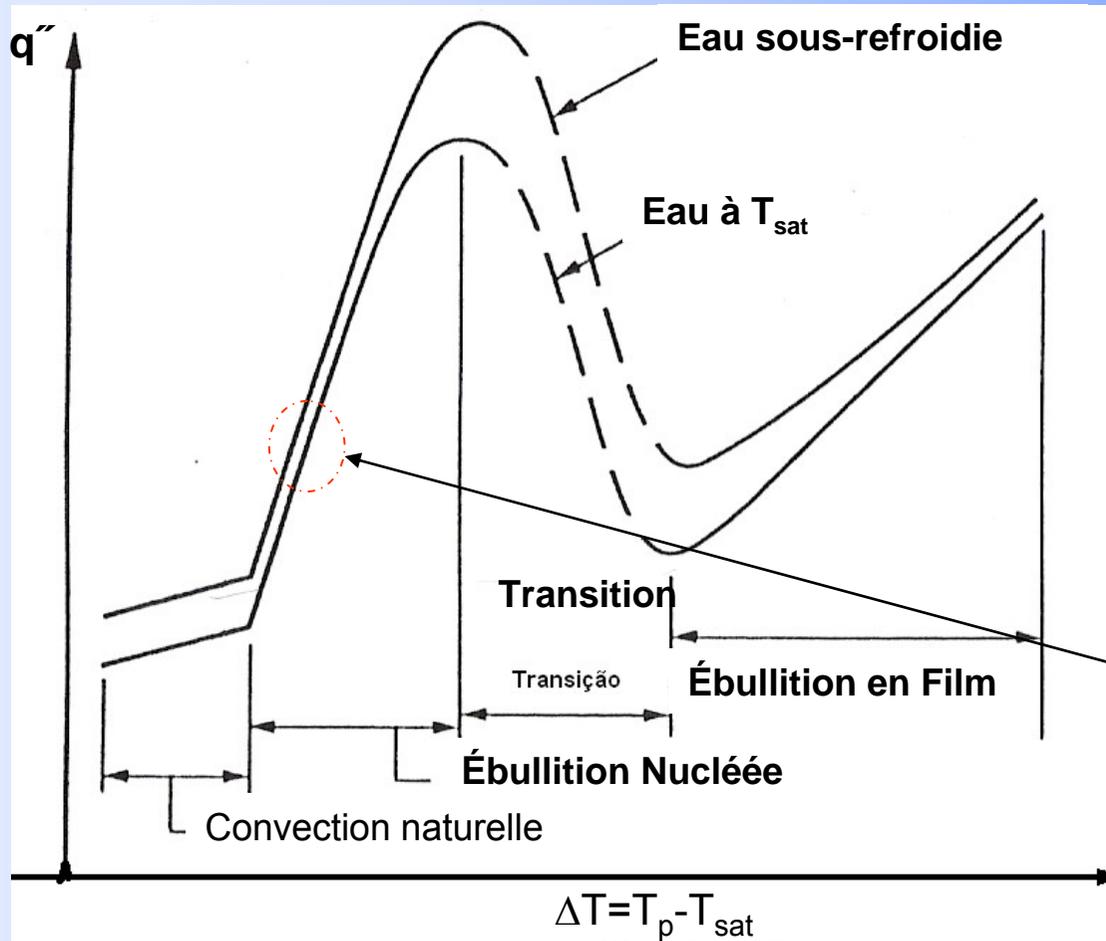
# Influence du mode de chauffage sur l'ébullition nucléée

Flux de chaleur **croissant** et **decroissant**



in, Passos et al., Applied Thermal Engineering, 2005

# Effet du sous-refroidissement du liquide



Dans le régime d'ébullition nucléée

$$q''_{max.} \uparrow$$

et

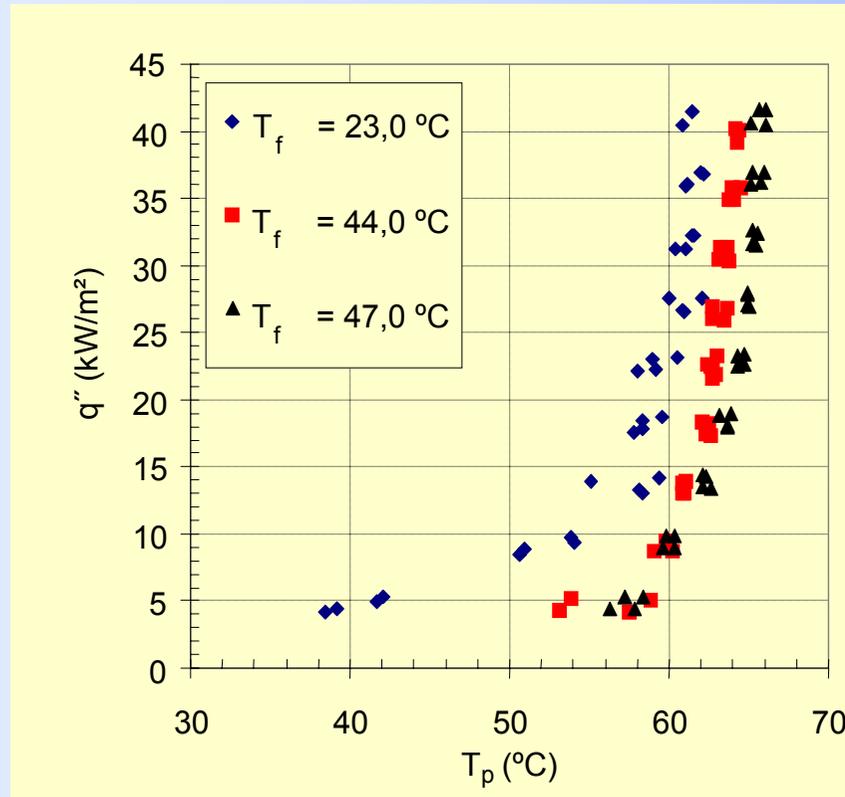
$$\Delta T \downarrow$$



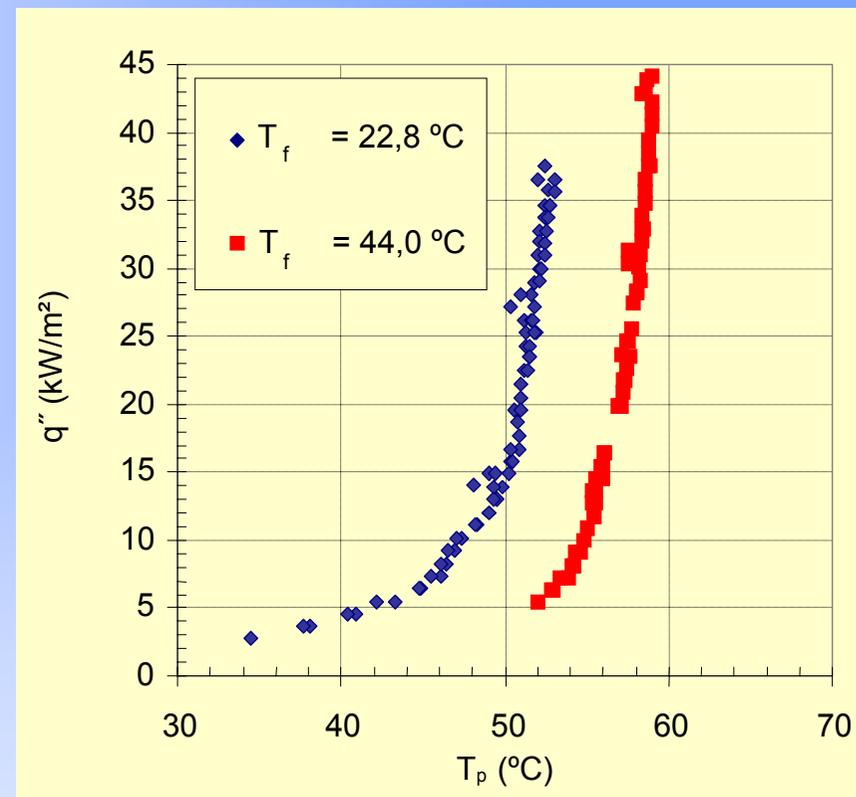
Ebullition sur un fil de platine «Technique Schlieren», in Jabardo (2008)

# Influence du sous-refroidissement du liquide

CFC R-113 ( $p_{\text{atm}}$ ,  $T_{\text{sat}} = 47,6^\circ\text{C}$ )



Tube vertical lisse

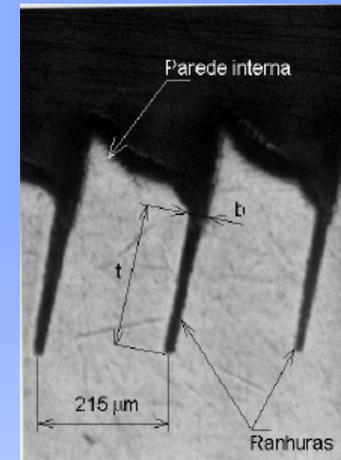
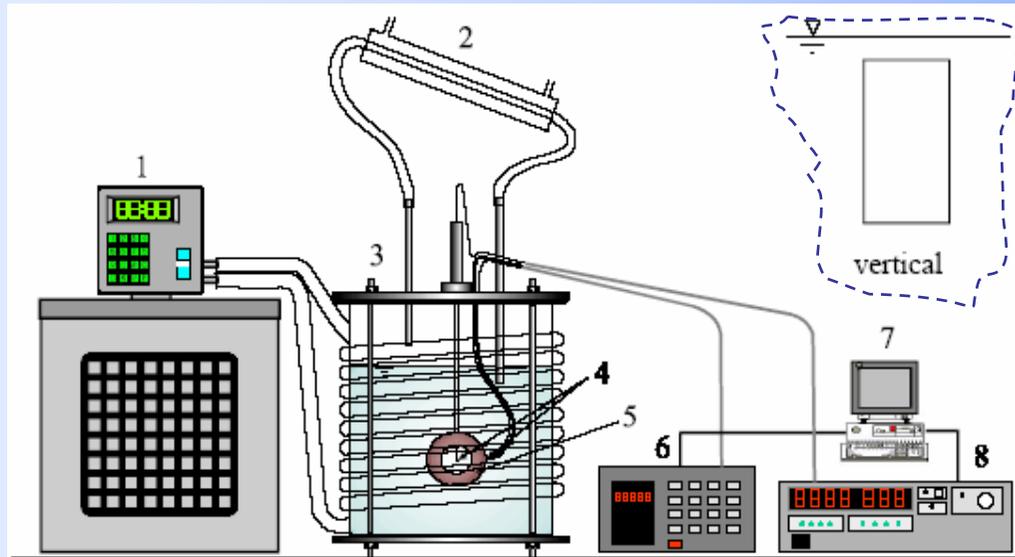


Tube vertical rainuré

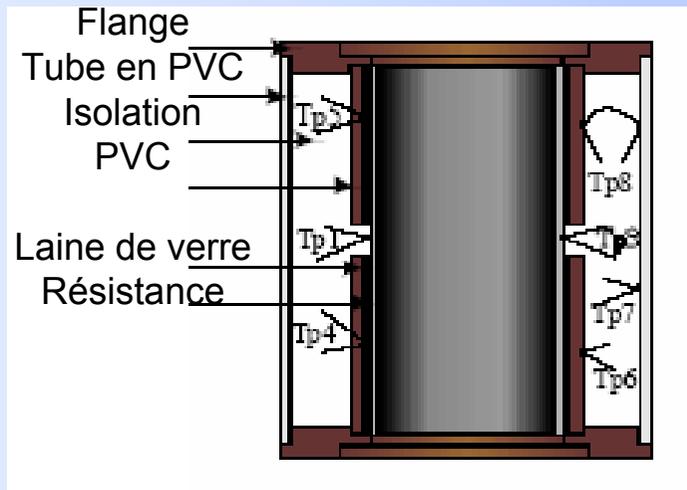
**L'ébullition nucléée est peu influencée par le sous-refroidissement du liquide.**

*in Passos et Reinaldo, Exp Ther Fluid Science, Vol. 22, pp. 35-44 (2001)*

# Banc d'essai pour les résultats précédents



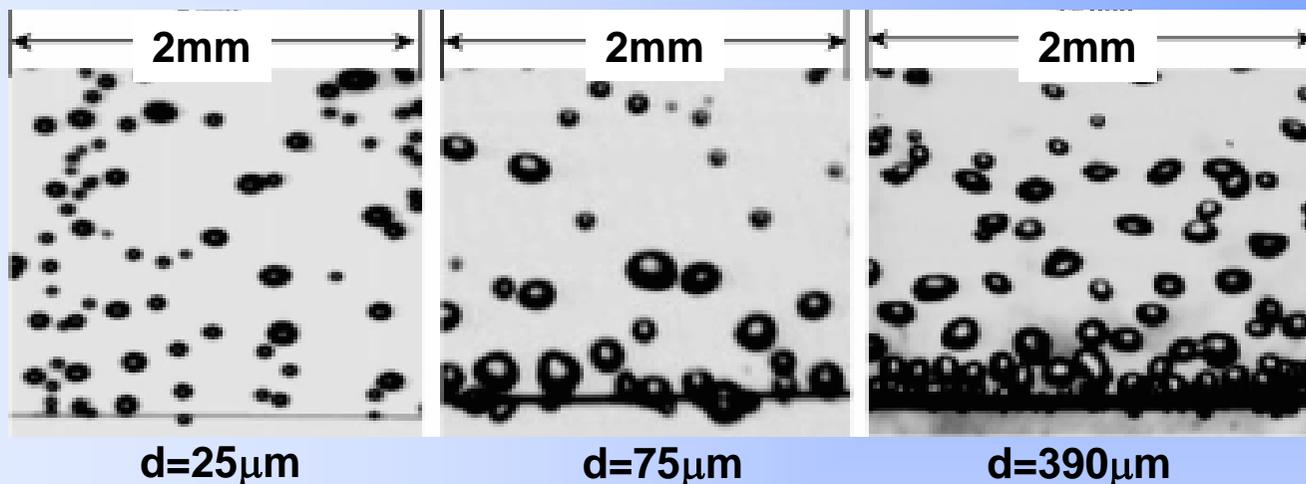
**Paroi interne rainurée  
du tube testé**



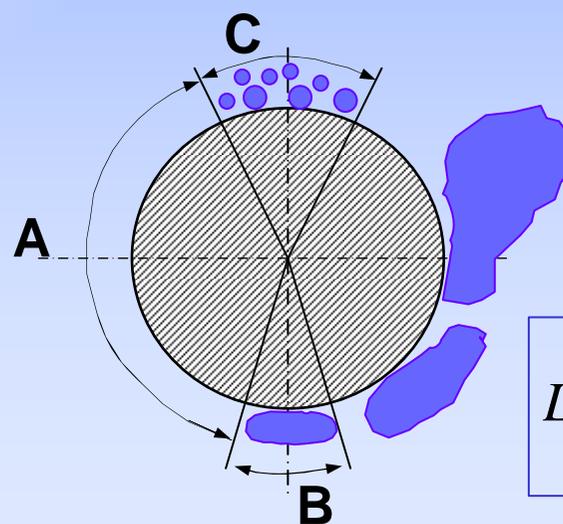
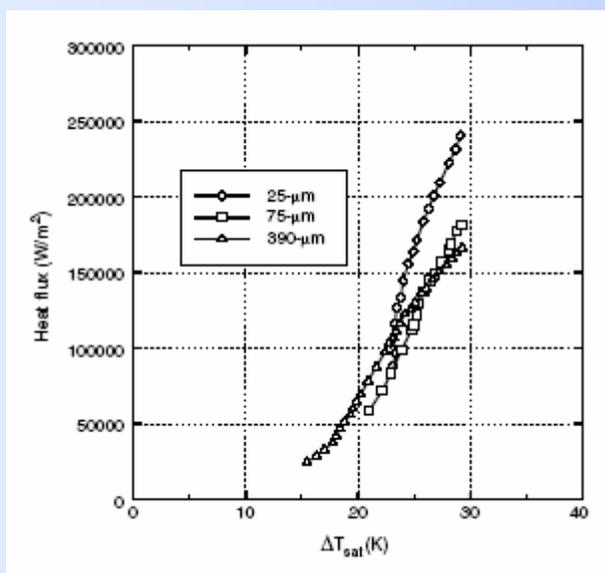
**Ébullition nucléée à  
l'intérieur des tubes verticaux**

*in. R. F. Reinaldo, Dissertation de Master of Science-PPGEM-UFSC, 1999.*

# Influence du diamètre du fil chauffant



Fluide:  
FC72



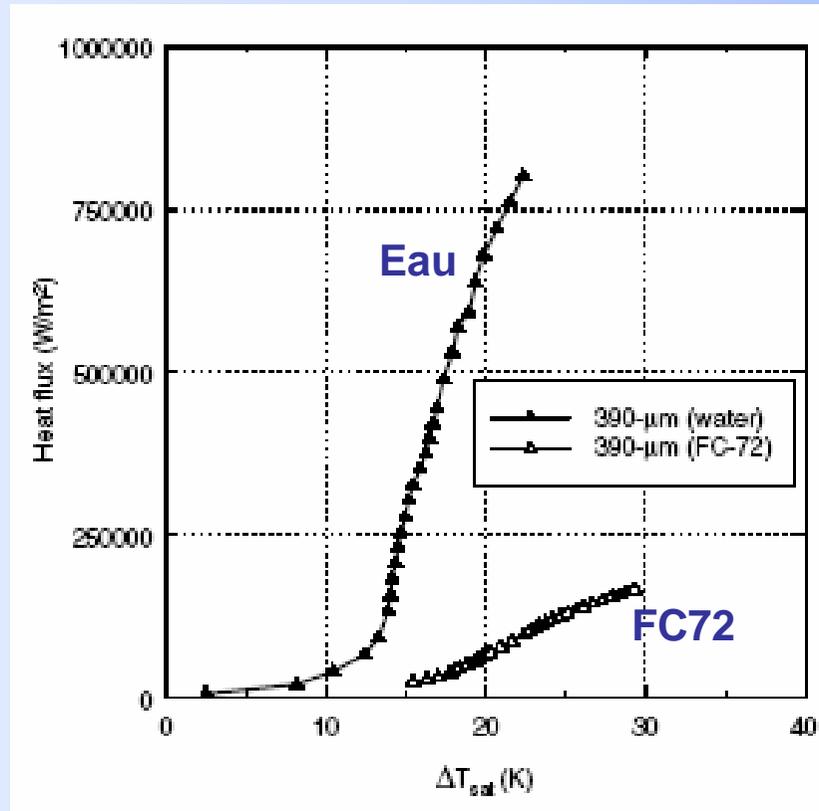
Pour tubes  
de grands  
diamètres  
 $R \gg L_c$

Longueur capillaire

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}}$$

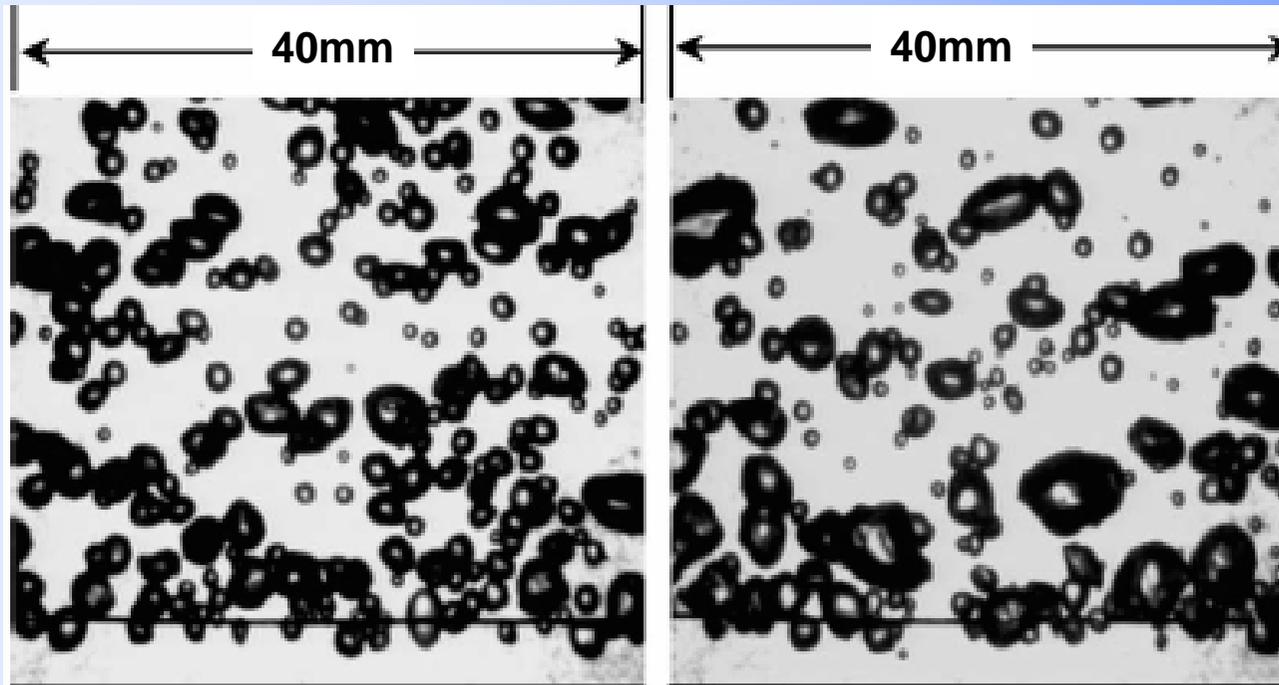
in, Kim et al., *IJHMT*, vol. 49, pp. 122-131, 2006

# Influence des fluides dans l'ébullition libre sur un fil chauffant de platine



in, Kim et al., *IJHMT*, vol. 49, pp. 122-131, 2006

# Influence du flux de chaleur dans l'ébullition libre sur un fil chauffant de platine



$q''=39 \text{ W/cm}^2$

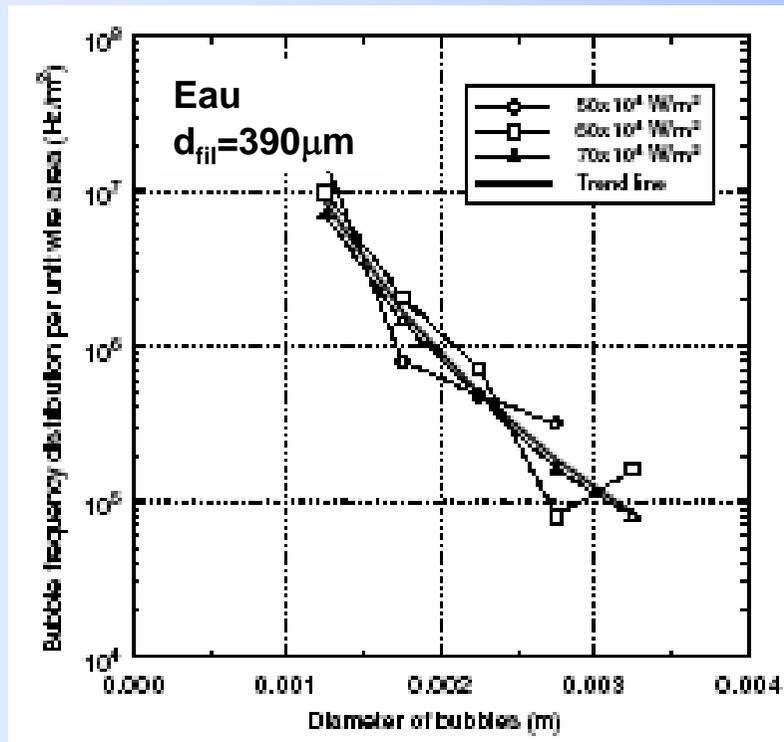
$q''=60 \text{ W/cm}^2$

Eau

$d_{\text{fio}}=390\text{mm}$

in, Kim et al., *IJHMT*, vol. 49, pp. 122-131, 2006

# Fréquence des bulles en fonction du diamètre D des bulles



$$f \cdot D^{4,85} = 7,2 \times 10^{-8}$$

Fréquence des bulles par unité d'aire de la surface du fil en fonction des diamètres des bulles

in, Kim et al., *IJHMT*, vol. 49, pp. 122-131, 2006

# Fréquence des bulles en fonction du diamètre D des bulles

**Problème encore ouvert**  
(voir Carey, 1992, p. 209.)

$$f.D = 0,078$$

Jakob et Fritz (1931), v. Carey, 1992

$$f.D = 1,18 \left( \frac{t_{\text{croissance}}}{t_{\text{croissance}} + t_{\text{att}}} \right) \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{0,25}$$

Peebles et Garber(1953),  
v. Carey, 1992

(=0,15 à 1,4) in Cole (1967),  
v. Carey, 1992.

$$f.D = 0,59 \left[ \frac{\sigma g (\rho_l - \rho_v)}{\rho_l^2} \right]^{0,25}$$

Zuber (1963), v. Carey, 1992

Technique utilisée: filmage en caméra rapide du processus d'ébullition.

# Corrélations pour l'ébullition nucléée libre

Surfaces "lisses" ou rugueuses

# Corrélation de Stephan-Abdelsalam

Definition du coefficient de transfert de chaleur par ébullition

$$h = \frac{\text{flux.de.chaleur}}{\text{surchauffe.de.la.paro}} = \frac{q''}{(T_p - T_{sat})}$$

Correlation de Stephan et Abdelsalam (1980)

$$h_{SA} = 207 \frac{k_1}{d_b} \left( \frac{q d_b}{k_1 T_{sat}} \right)^{0,745} \left( \frac{\rho_v}{\rho_l} \right)^{0,581} Pr_l^{0,533} R_p^{0,133}$$

$$d_b = 0,0149 \theta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{1/2}$$

# Corrélation de Cooper

## Corrélation de Cooper (1984)

$$h_{Cooper} = 55 p_r^b (-\log p_r)^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.67}$$

$$b = 0,12 - 0,2 \log (Rp)$$

**Obs.: Nos résultats à l'UFSC montrent que l'effet de la rugosité indiqué dans cette corrélation ne peut pas être généralisé.**

**Donc, b=0,12.**

# Corrélation de Rohsenow (1)

## Corrélation de Rohsenow (1962)

$$h = \mu_1 h_{lv} \left[ \frac{\sigma}{g(\rho_1 - \rho_v)} \right]^{-1/2} \left( \frac{c_{pl}}{C_{sf} h_{lv} Pr_1^s} \right)^3 \Delta T_p^2$$

$\Delta T_p = T_p - T_{sat}$       Pour l'eau,  $s=1$ ; Autre fluides  $s=1,7$

$C_{sf}$  depend du couplage fluide/surface ( $C_{sf}=0,013$ )

Transport convective

$$Nu_b = \frac{hL_b}{k_1} = A Re_b^n Pr_1^m$$

$$Re_b = \frac{\rho_v U_b L_b}{\mu_1}$$

# Corrélation de Rhosenow (2)

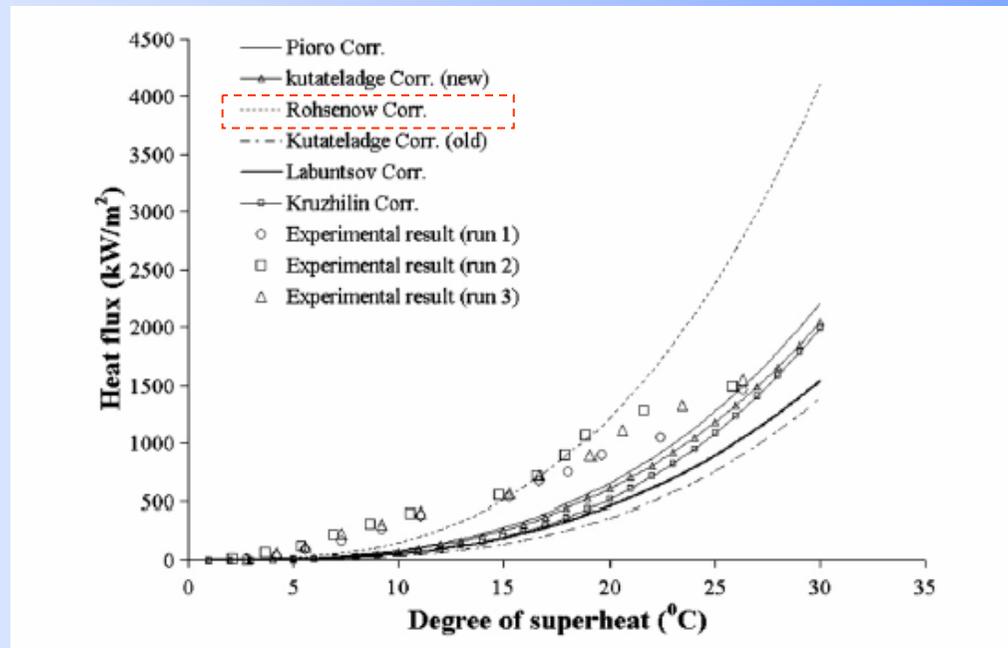
Transport convective

$$Nu_b = \frac{hL_b}{k_l} = A Re_b^n Pr_l^m$$

$$Re_b = \frac{\rho_v U_b L_b}{\mu_l}$$

$$U_b = \frac{q}{\rho_v h_{lv}} \quad L_b = d_b = C\theta \left[ \frac{2\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

# Corrélation de Rohsenow (3)



Constante empirique dans la corrélation de Rohsenow

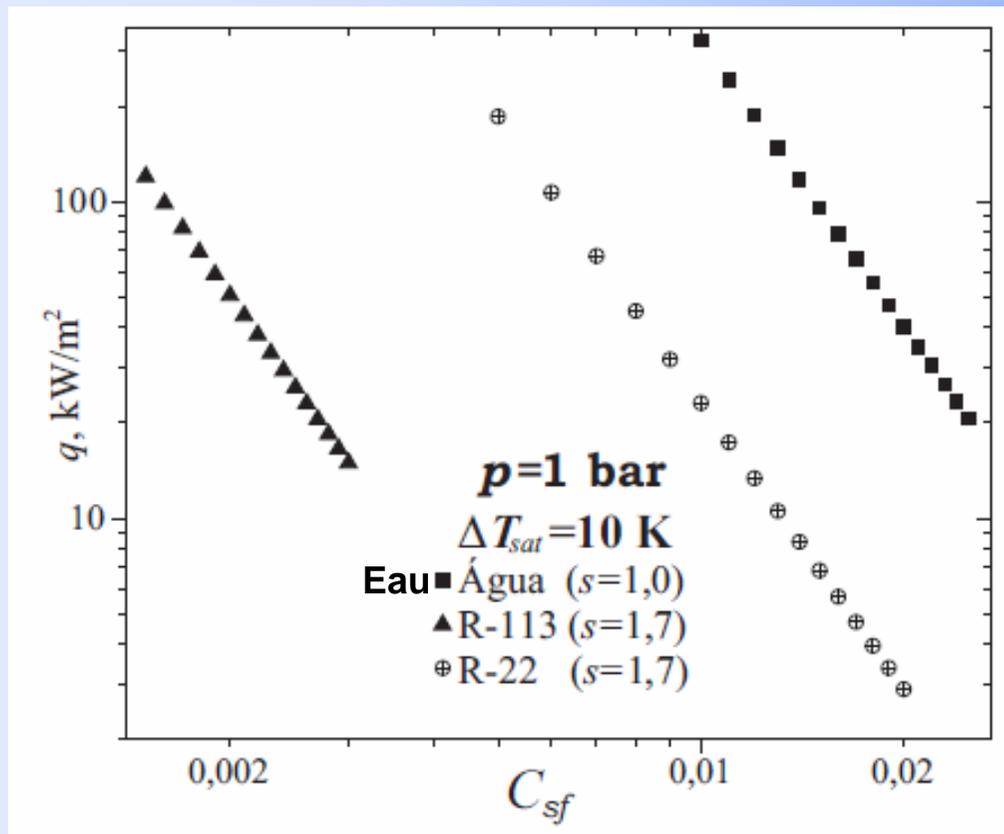
$C_{sf}=0,016$  (cuivre + eau)

$C_{sf}=0,013$ , dans la corrélation originale de Rohsenow

(voire Carey, 1992, p. 237 et 238)

in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces”,  
Experimentl Thermal and Fluid Science, vol. 31 (8), p. 967-977, 2007.

# Corrélation de Rohsenow (4)



Effet de  $C_{sf}$

Sur le calcul du flux de chaleur

in, S. P. Rocha, thèse/POSMEC- UFSC, 2007

# Corrélation de Forster-Zuber

## Corrélation de Forster et Zuber (1955)

$$h_{FZ} = 0,00122 \left( \frac{k_l^{0.79} c_{pl}^{0.45} \rho_l^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_l^{0.29} h_{lv}^{0.24} \rho_v^{0.24}} \right) [T_p - T_{sat}(p_1)]^{0.24} \Delta p_{sat}^{0.75}$$

# Formule générale des corrélations

$$h = C q^n$$

Valeurs des coefficients C et de l'exposant n

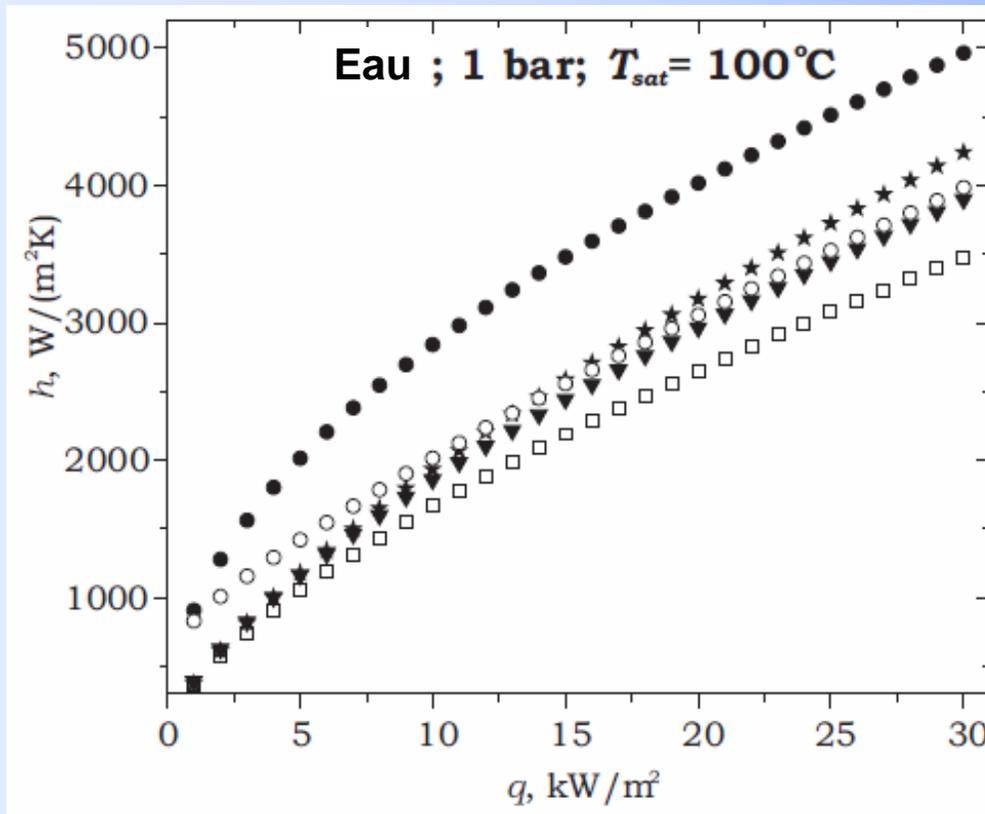
Corrélation	C	n
Borishansky	1,21	0,700
Cooper	2,66*	0,670
Forster e Zuber	9,90	0,520
Rohsenow 1 (s = 1)	3,00	0,670
Rohsenow 2 (s = 1,7)	0,75	0,670
Stephan e Abdelsalam	1,16*	0,745

C, calculé par le R-113, à pression atmosphérique et  $T_{sat}$ .

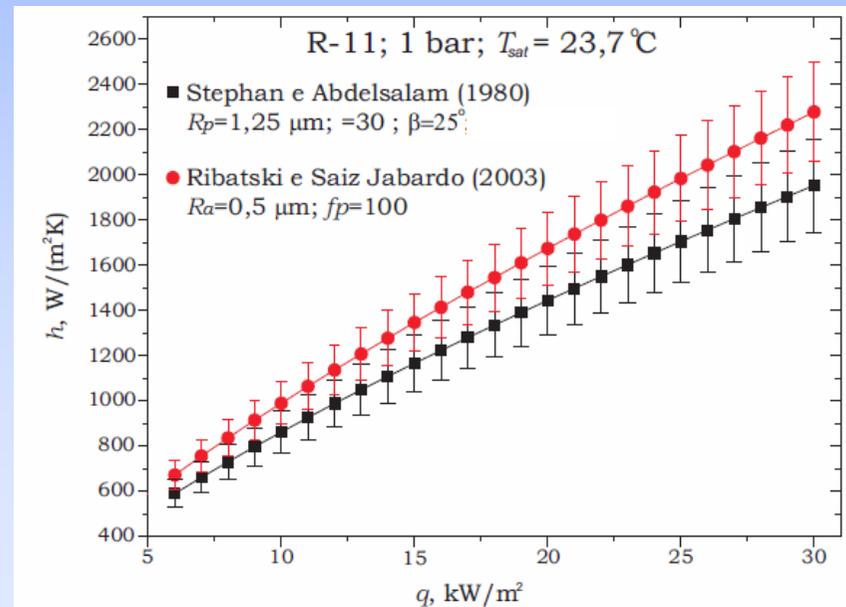
(\*)  $R_p = 2,2 \mu\text{m}$

*Tendance générale des résultats:  $n=0,6$  à  $0,8$ , Stephan (1992)*

# Comparaison des corrélations

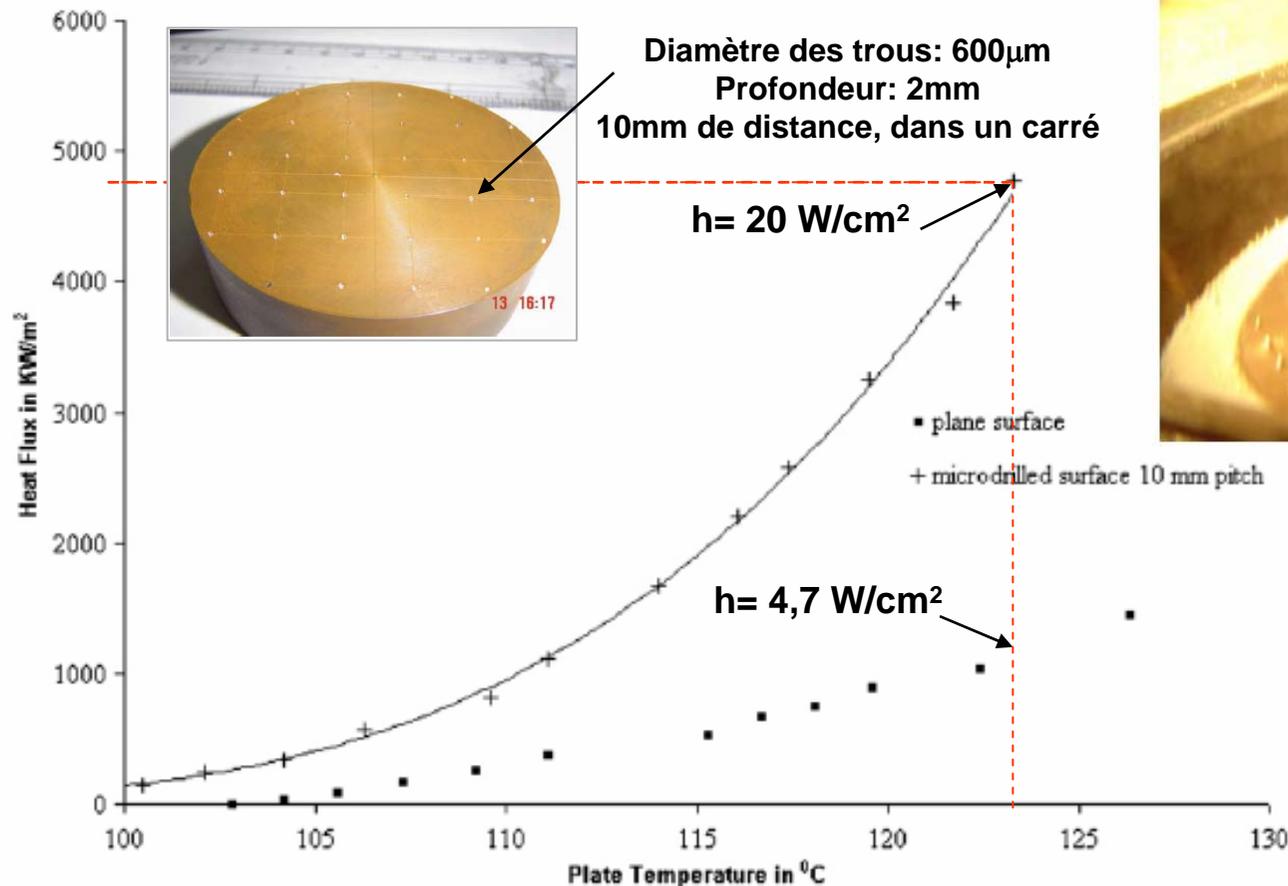


- Forster e Zuber (1955)
- ★ Mikic e Rohsenow (1969)
- Benjamin e Balakrishnan (1996)  
 $Ra = 1 \mu\text{m}$
- ▼ Stephan e Abdelsalam (1980)  
 $Rp = 2,5 \mu\text{m}$
- Rohsenow (1952)  
 $C_{sf} = 0,013; s = 1,7$



# Technique et mécanismes physiques d'intensification

# Effet de l'augmentation de la densité de sites de nucléation



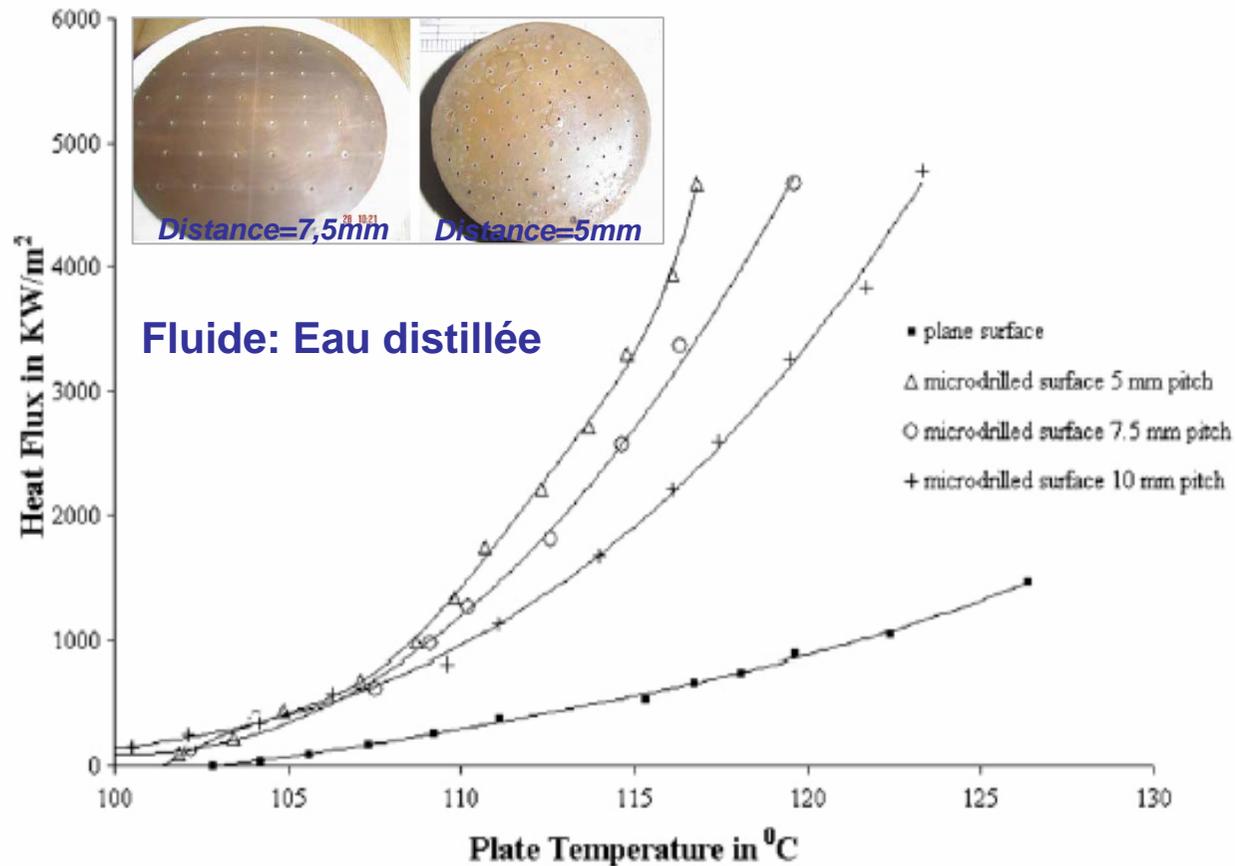
Surface structurée,  
avec une distribution  
discrète des sites  
de nucléation

$$q''_{\text{critZ}} = 110 \text{ W/cm}^2$$

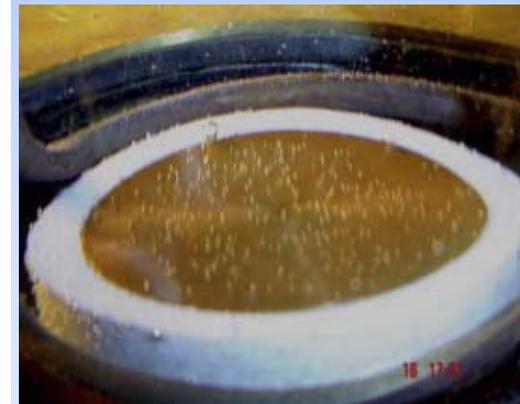
in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces",

Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 31 (8), p. 967-977, 2007.

# Effet de l'augmentation de la densité de sites de nucléation



Surface lisse, Faible surchauffe



Surface lisse, Fort surchauffe

in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces", ( $R_p=0,097-0,134\mu\text{m}$ )

# Effet de l'augmentation de la densité de sites de nucléation

## Explication du Mécanisme

Il y a une distance optimale entre les sites de nucléation.

Le transfert de chaleur augmente avec la diminution des distances entre les sites mais cet avantage diminue rapidement.

L'aire de base de chaque site diminue avec l'augmentation de nombre des sites de nucléation.

Le volume de liquide influencé par une bulle particulière diminue Aussi avec l'augmentation du nombre des sites.

*in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces”,  
Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 31 (8), p. 967-977, 2007.*



# Effet de l'augmentation de la densité de sites de nucléation

Corrélation de Yamagata et al. (1955)

$$q'' = a(\Delta T)^b \quad \Delta T = T_p - T_{sat}$$

Région de bulles isolées, faible surchauffe de la paroi

Corrélation de Yamagata modifiée

$$q'' = a(\Delta T)^b \left( \frac{N}{A} \right)^c$$

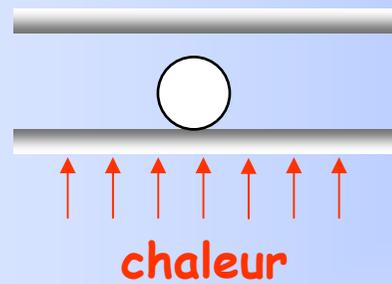
$$\left( \frac{N}{A} \right)$$

**Densité de sites:**  
Nombres des sites  
de nucléation par  
unité de l'aire de  
surface

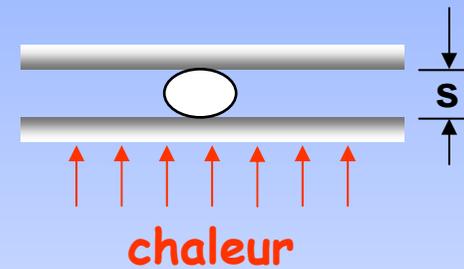
$$a = 7,5655; b = 2,0307; c = 0,52341$$

in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces",  
*Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 31 (8), p. 967-977, 2007.

# Effet du confinement

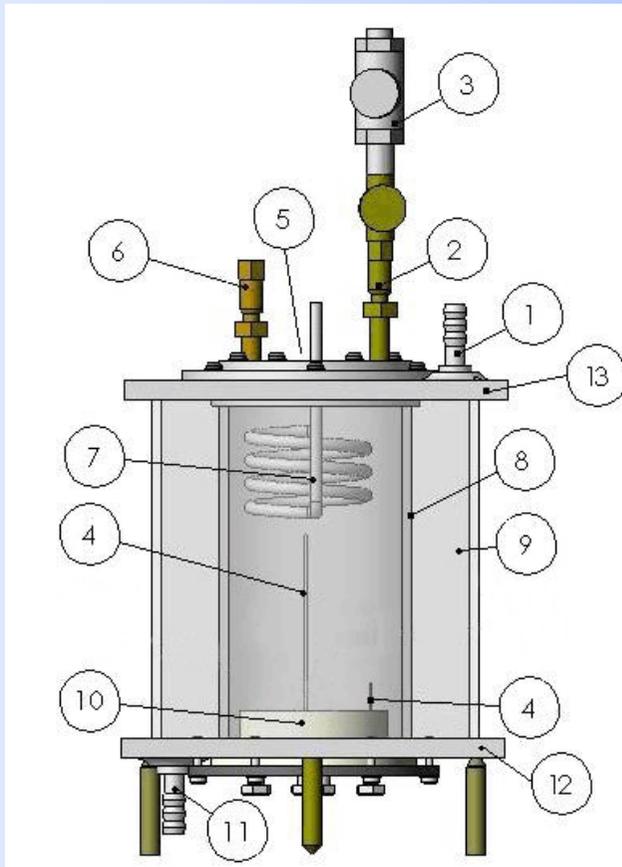


Non confinée



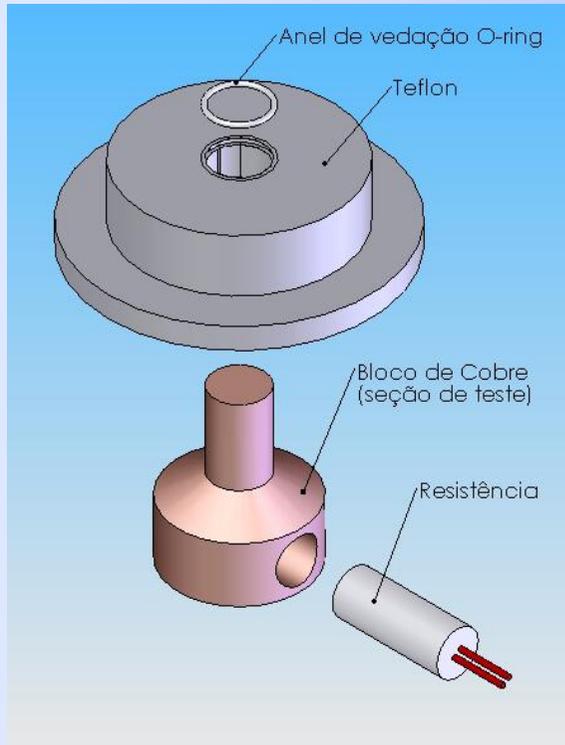
Confinée

# Boucle à étudier l'ébullition confinée

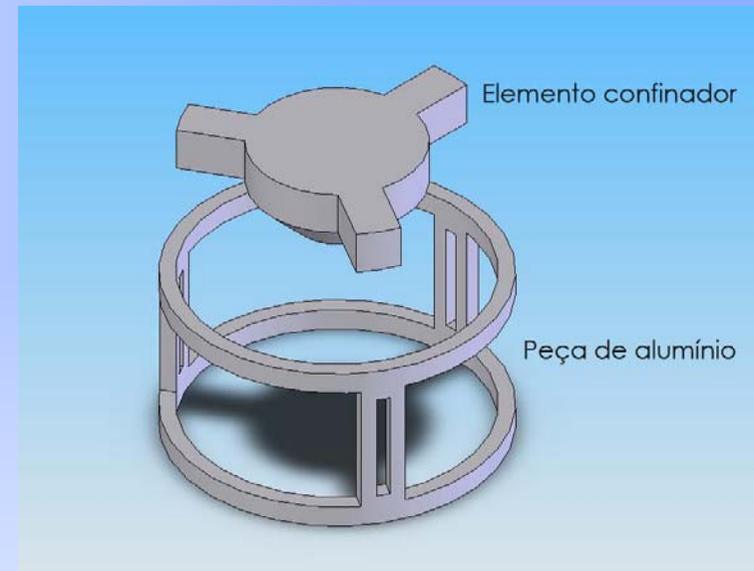


LEPTEN/Boiling - UFSC

# Section d'essai



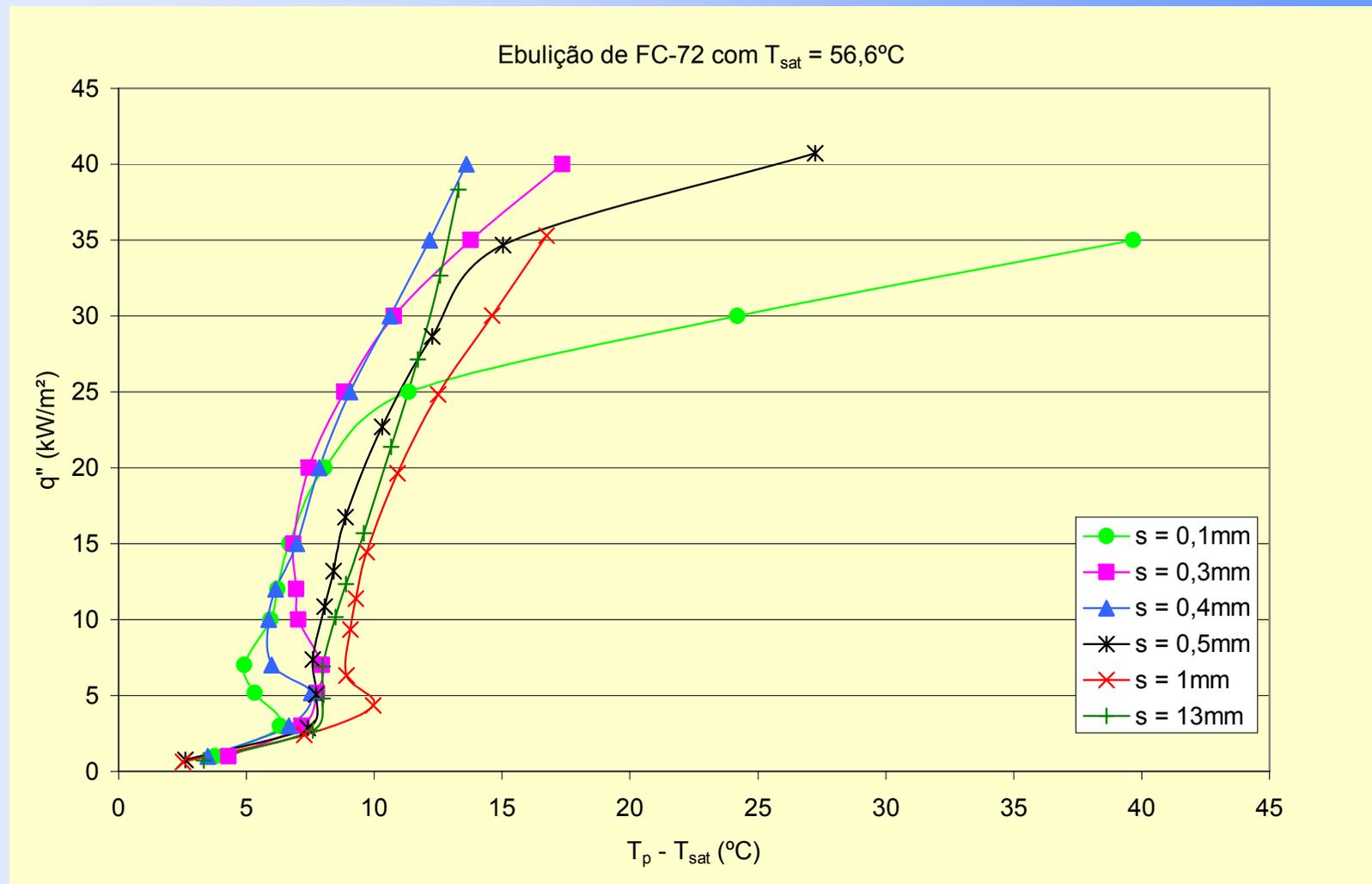
Section d'essai.



Système de confinement

LEPTEN/Boiling - UFSC

# Résultats expérimentaux



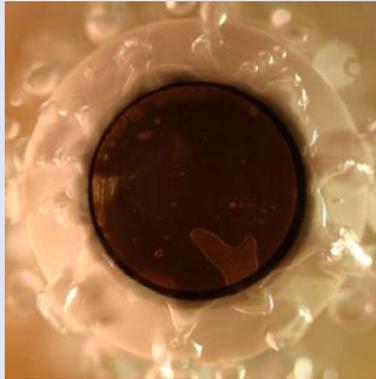
FC-72, en fonction de  $s$ , surface chauffante vers le bas  
(Cardoso, 2005).

# Explication du mécanisme probable

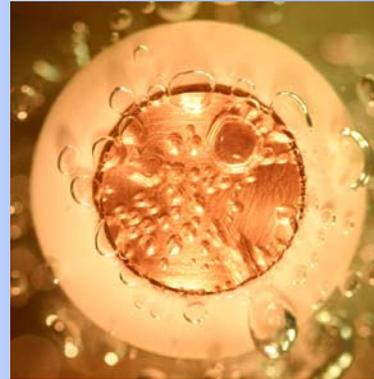
L'intensification de l'ébullition dans un espace confiné est due à l'évaporation d'une couche mince de liquide interposée entre la bulle et la paroi.

L'aire de cette couche augmente à cause de la déformation de la bulle de vapeur dans un espace dont au moins une des dimensions est petite para rapport à la longueur capillaire.

# Effet du confinement



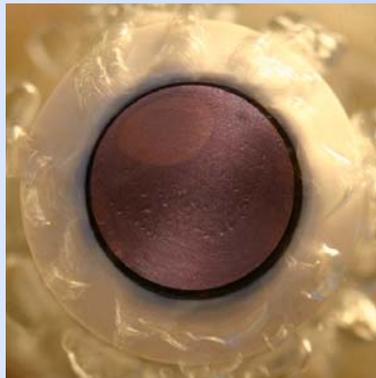
$s = 0,1\text{mm}$   
 $T_p = 65,6^\circ\text{C}$



$s = 13\text{mm}$   
 $T_p = 66,2^\circ\text{C}$

FC-72

$20\text{kW/m}^2$



$s = 0,1\text{mm}$   
 $T_p = 88,6^\circ\text{C}$



$s = 13\text{mm}$   
 $T_p = 68,4^\circ\text{C}$

$30\text{kW/m}^2$

*in, Cardoso, 2005*

# Ebullition confinée

n-Pentane,  $p_{\text{atm}}$ ,  $q=180\text{kW/m}^2$



LEPTEN-Boiling – UFSC.

# Ebullition confinée

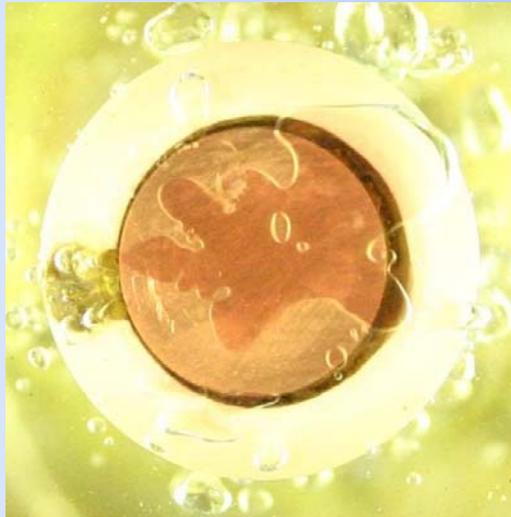
n-Pentane,  $p_{\text{atm}}$ ,  $q=45\text{kW/m}^2$



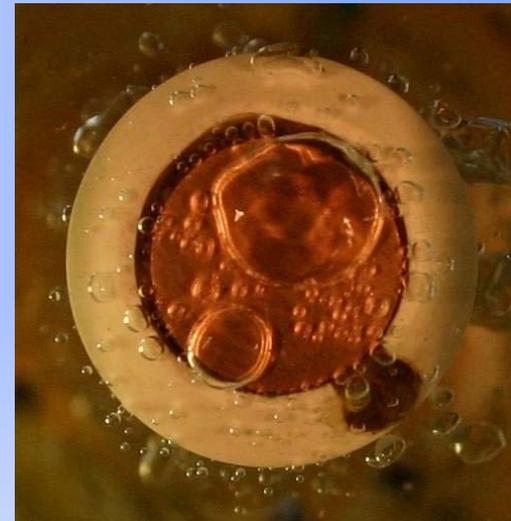
LEPTEN-Boiling – UFSC.

# Effet du confinement

$$q=20 \text{ kW/m}^2$$



$$s=0,2 \text{ mm}$$
$$T_w=63,2^\circ\text{C}$$



$$s=13 \text{ mm}$$
$$T_w=65,8^\circ\text{C}$$

**Sous confinement, avec flux de chaleur faibles et modérés,  
il y a l'intensification de transfert de chaleur par ébullition.**

*in, Passos et al., ETFS, 2005*

# Annnonce de la Conférence BOILING-2009

[www.boiling2009.com.br](http://www.boiling2009.com.br)

## 7ème Conférence Internationale sur les Transferts de Chaleur par Ebullition

Florianópolis- Santa Catarina  
Brésil

3-7 Mai - 2009



**LEPTEN** LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS  
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA



*ARCUS-Journées Rhônes-Alpes-Brésil:*  
**CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008**