

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



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.

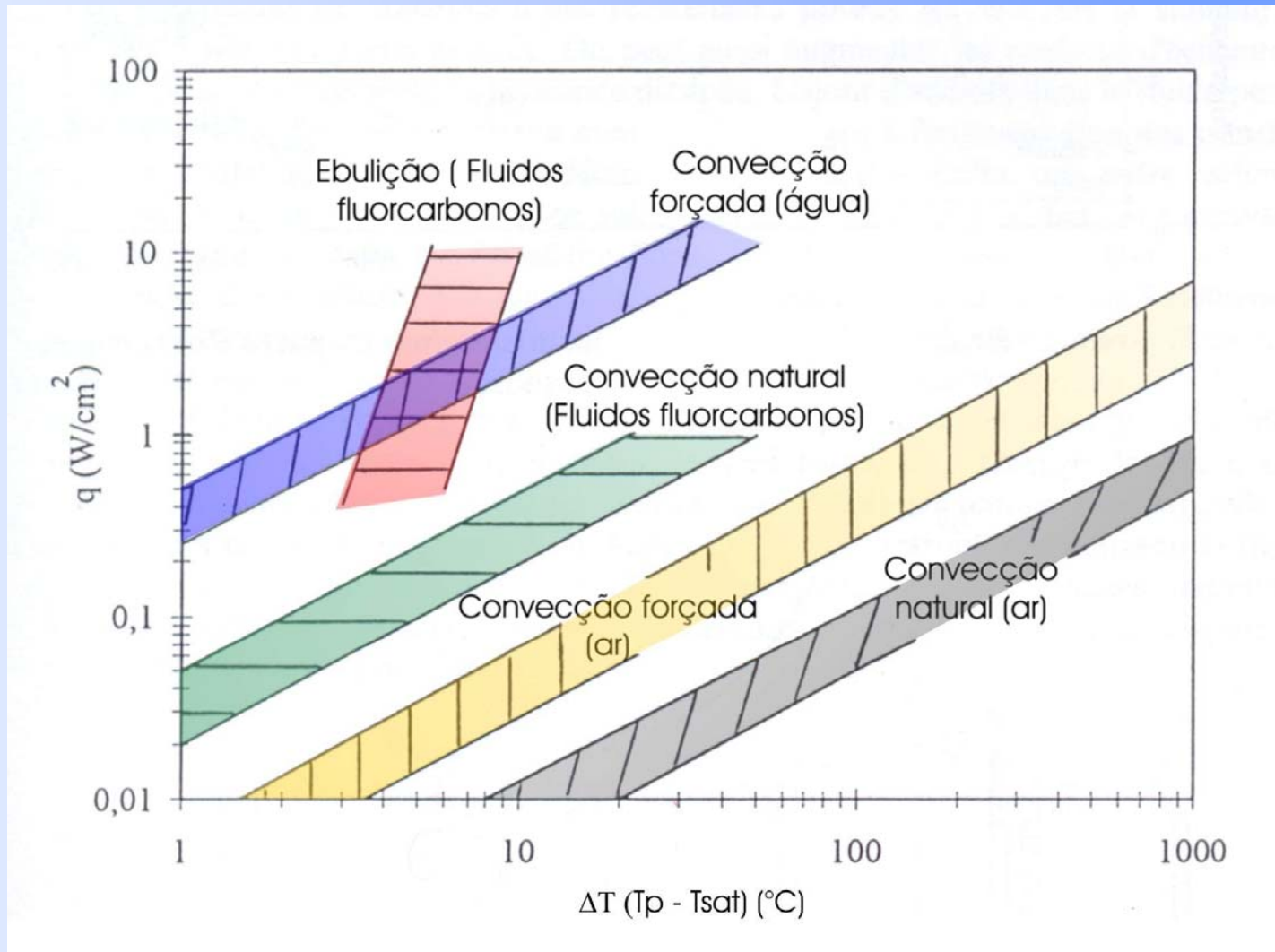
NUKIYAMA (Japon - 1934)

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 compactes
- Contrôle thermique
- Sûreté des réacteurs nucléaires

Motivations



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

Courbe d'ébullition



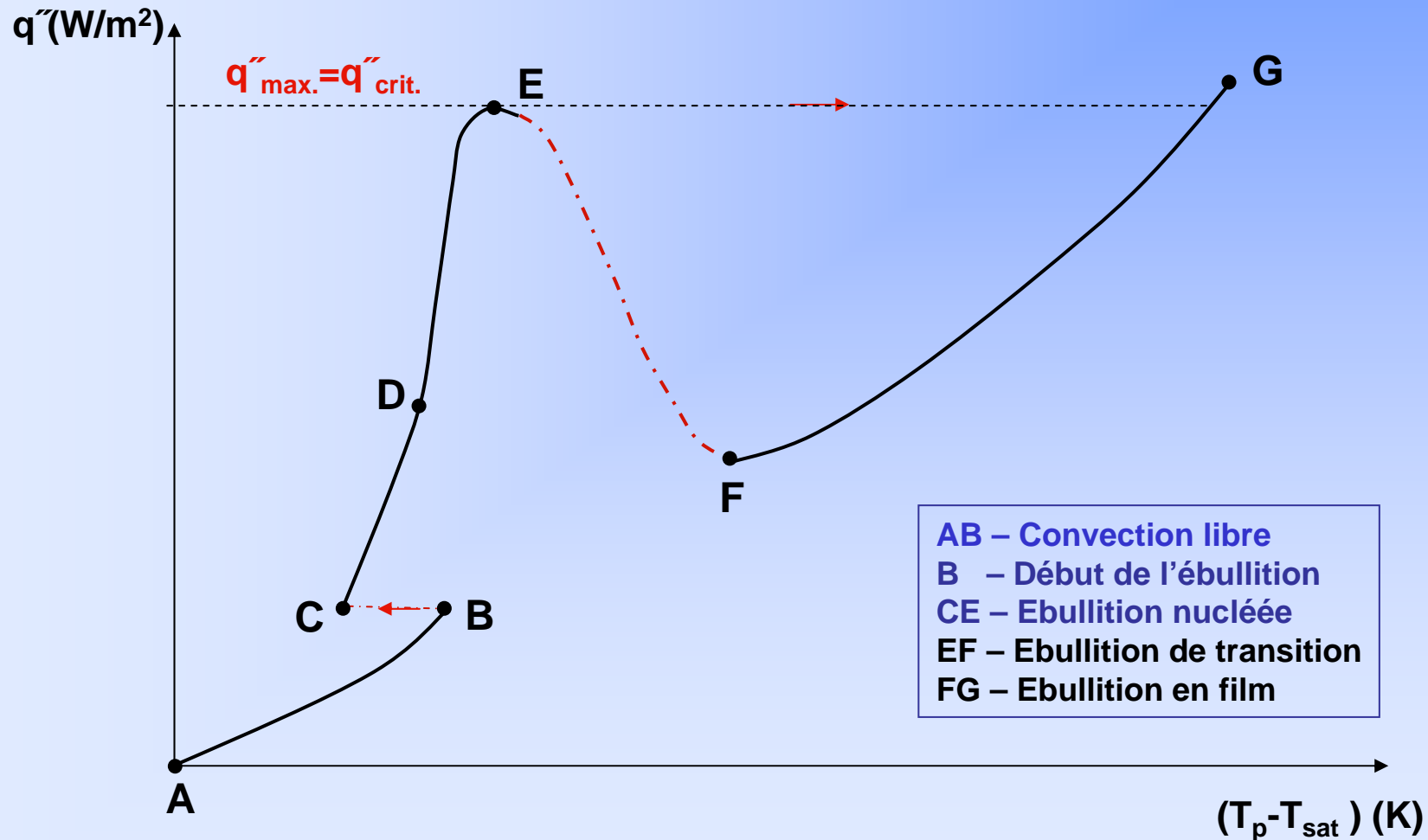
LEPTEN LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA



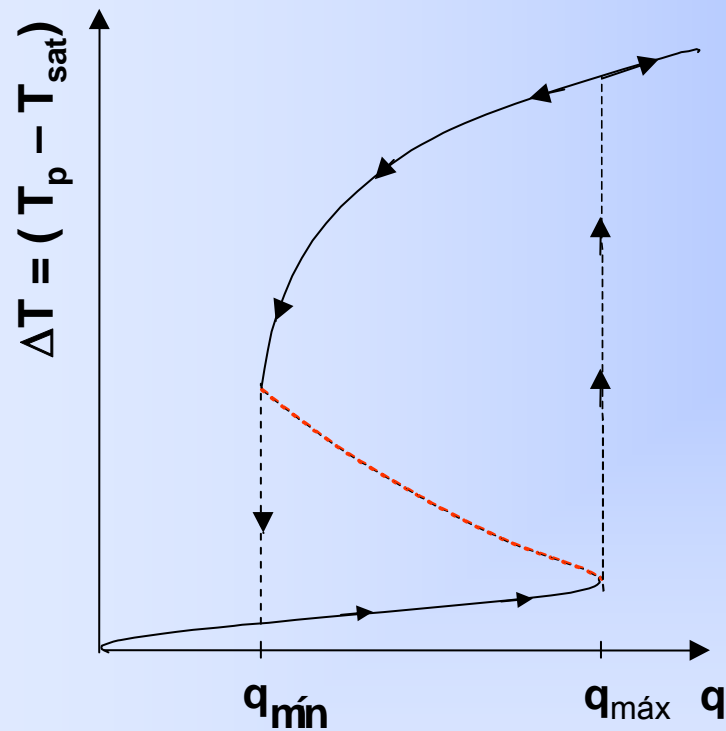
ARCUS-Journées Rhône-Alpes-Brésil:
CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008

La courbe d'ébullition (courbe de Nukiyama)

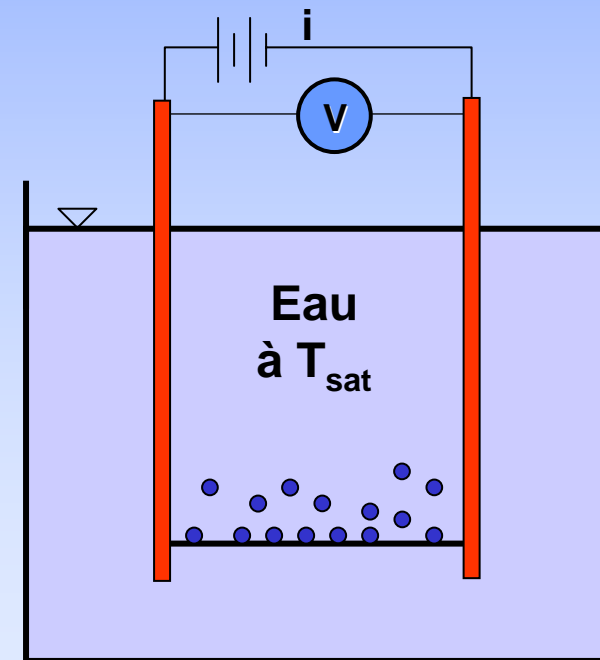
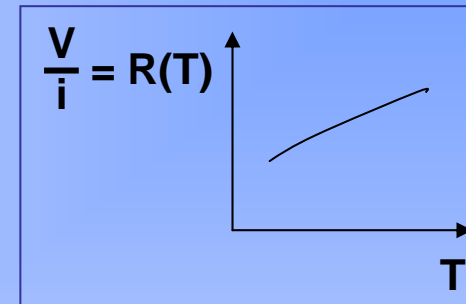
(à flux de chaleur imposé)



L'Expériment de Nukiyama (1934)

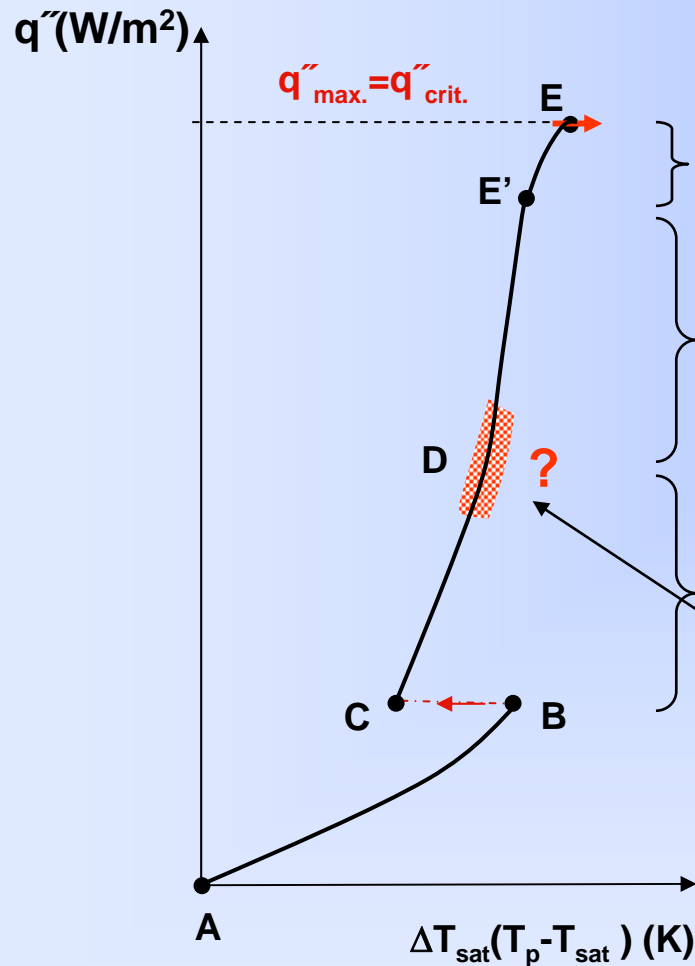


Ébullition libre
("Pool boiling")

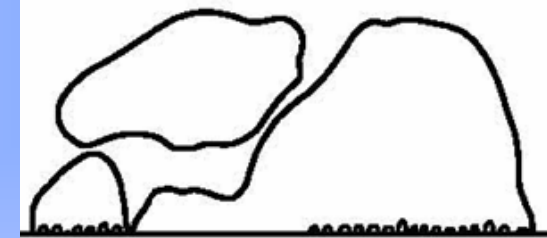


Régime d'ébullition nucléée

Différents types de configurations L-V



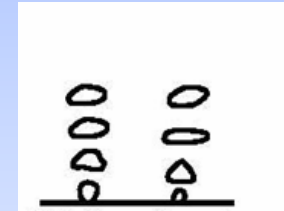
Bulles "coalescées"
(proche du flux critique)



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

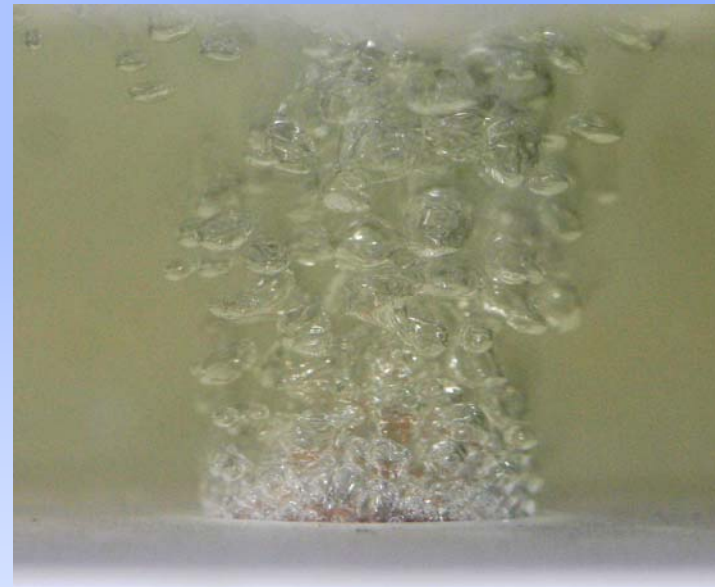
(θ : angle de contact, en degrés)

Visualization (1)

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



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



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

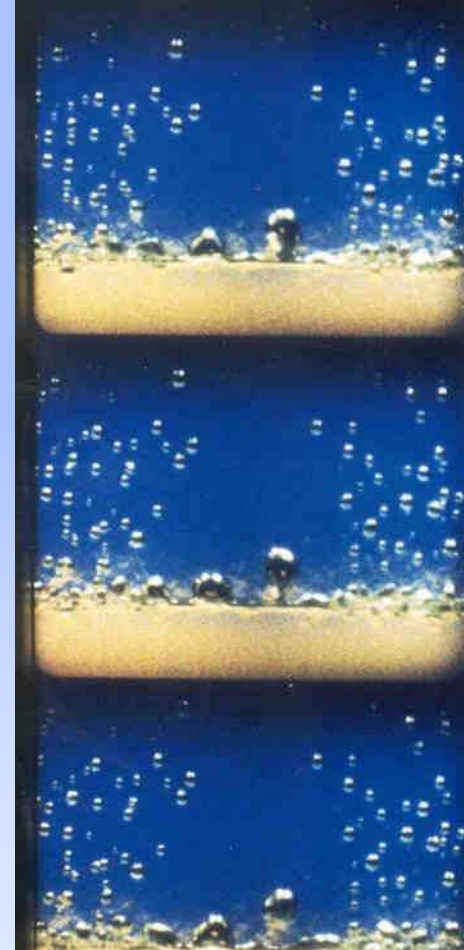
in E.M. Cardoso, 2007, LEPTEN/Boiling - UFSC

Visualization (2)

Régime
d'ébullition
Nucléée



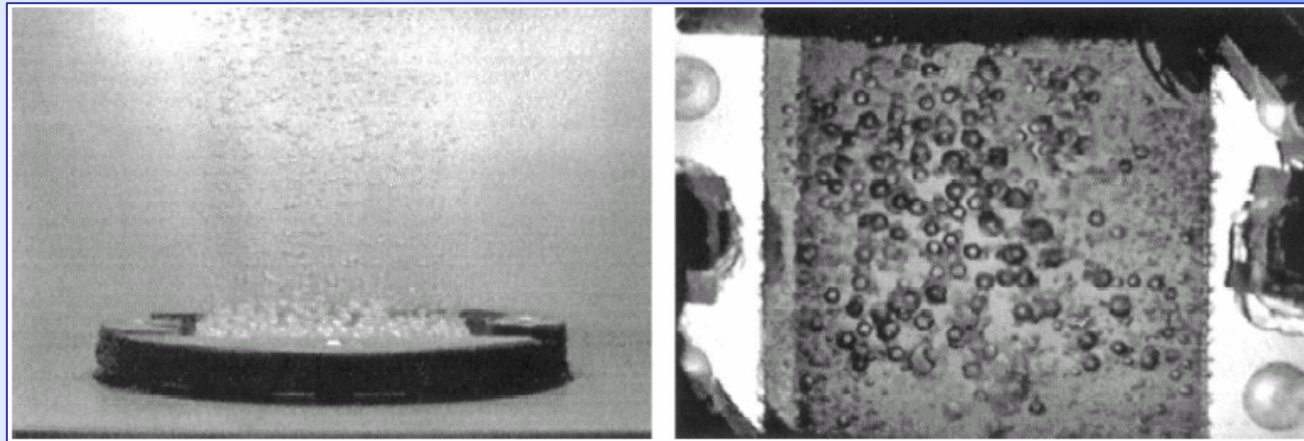
Régime de
Transition



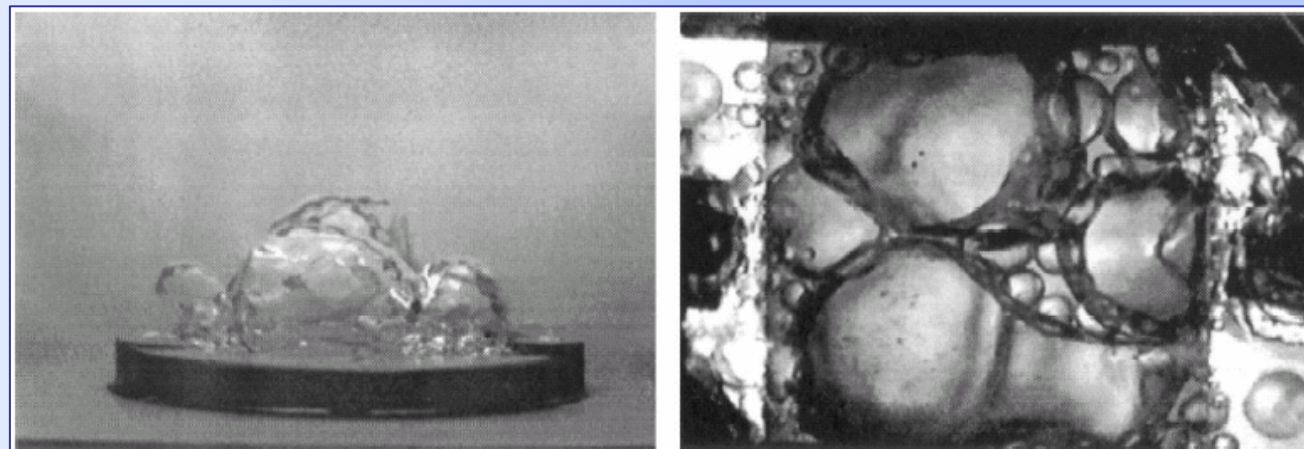
Images extraites du film: "Les mécanismes de l'ébullition", SFS-France

Visualization (3)

Effet de la pesanteur



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

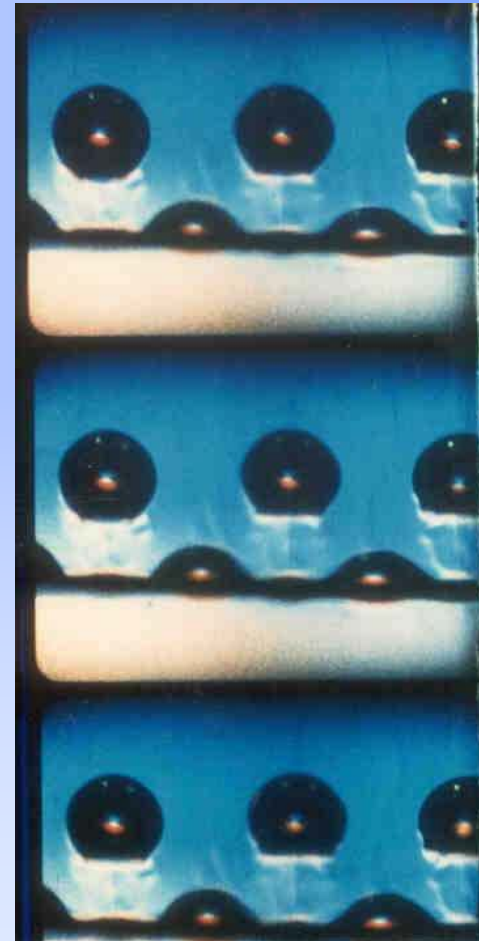
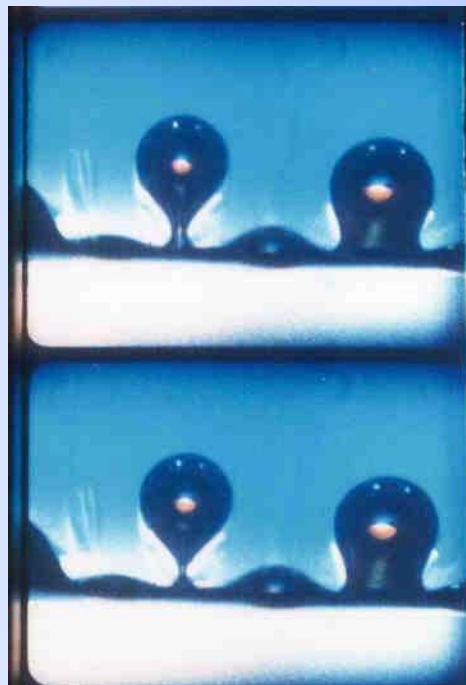


p_{atm}
 μg

(in Snyder e Chung, 2001)

Visualization (4)

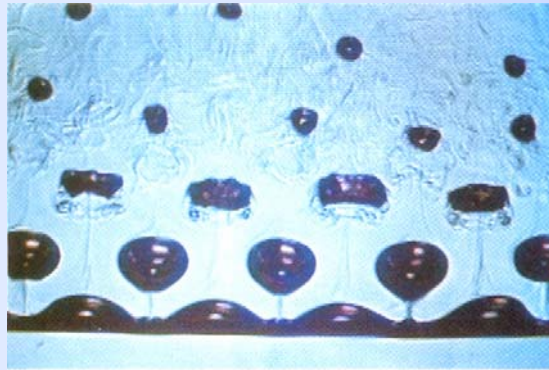
Régime
d'ébullition
en film



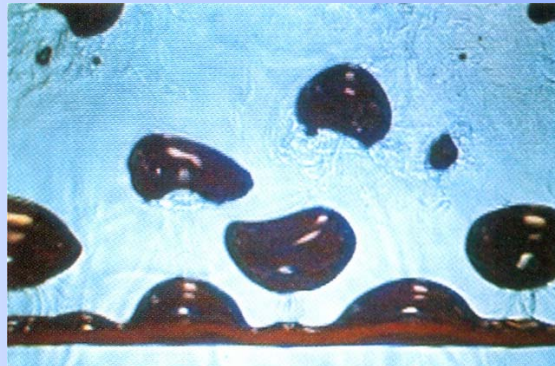
*Instabilités
de Taylor*

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

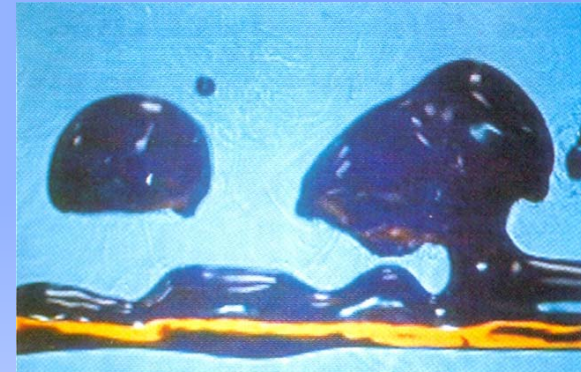
Comportement organisé et caotique pendant l'ébullition en film du FC-72 sur un fil



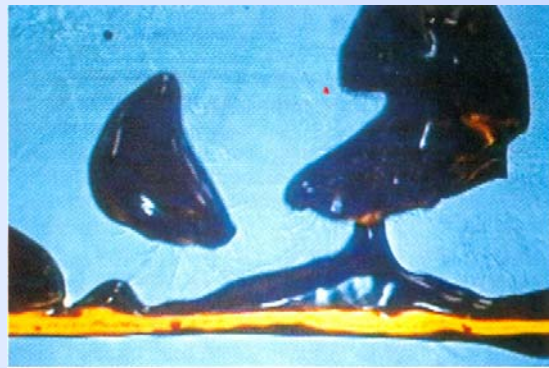
(a) $q=37 \text{ W/cm}^2$



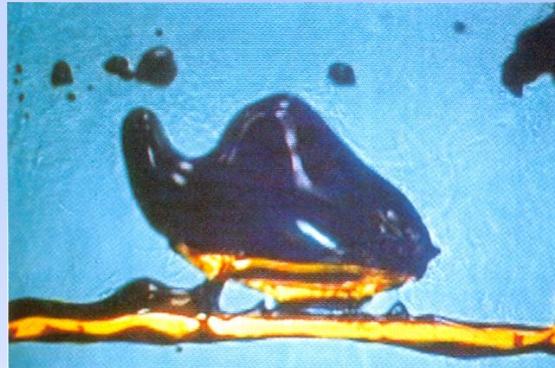
(b) $q=61 \text{ W/cm}^2$



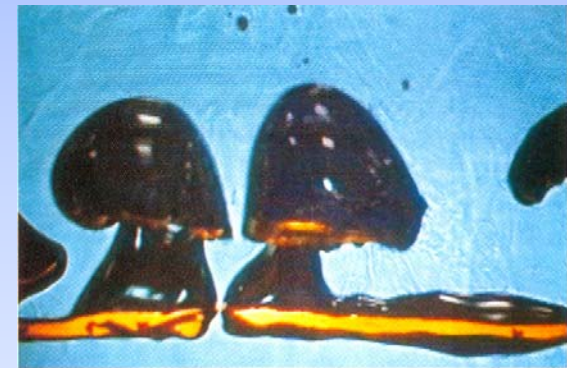
(c) $q=90 \text{ W/cm}^2$



(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**

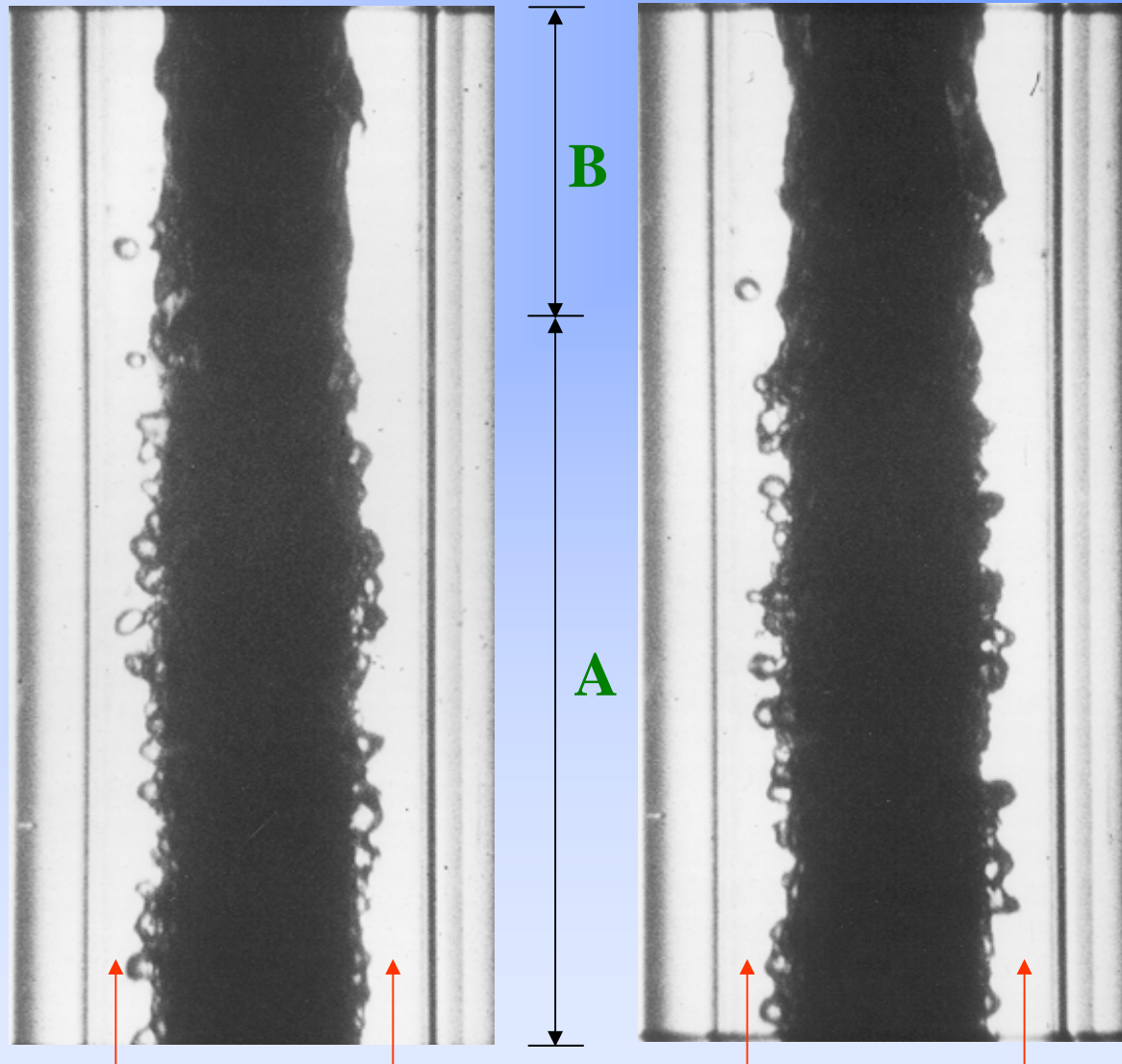
**B- Ebullition
em Film**

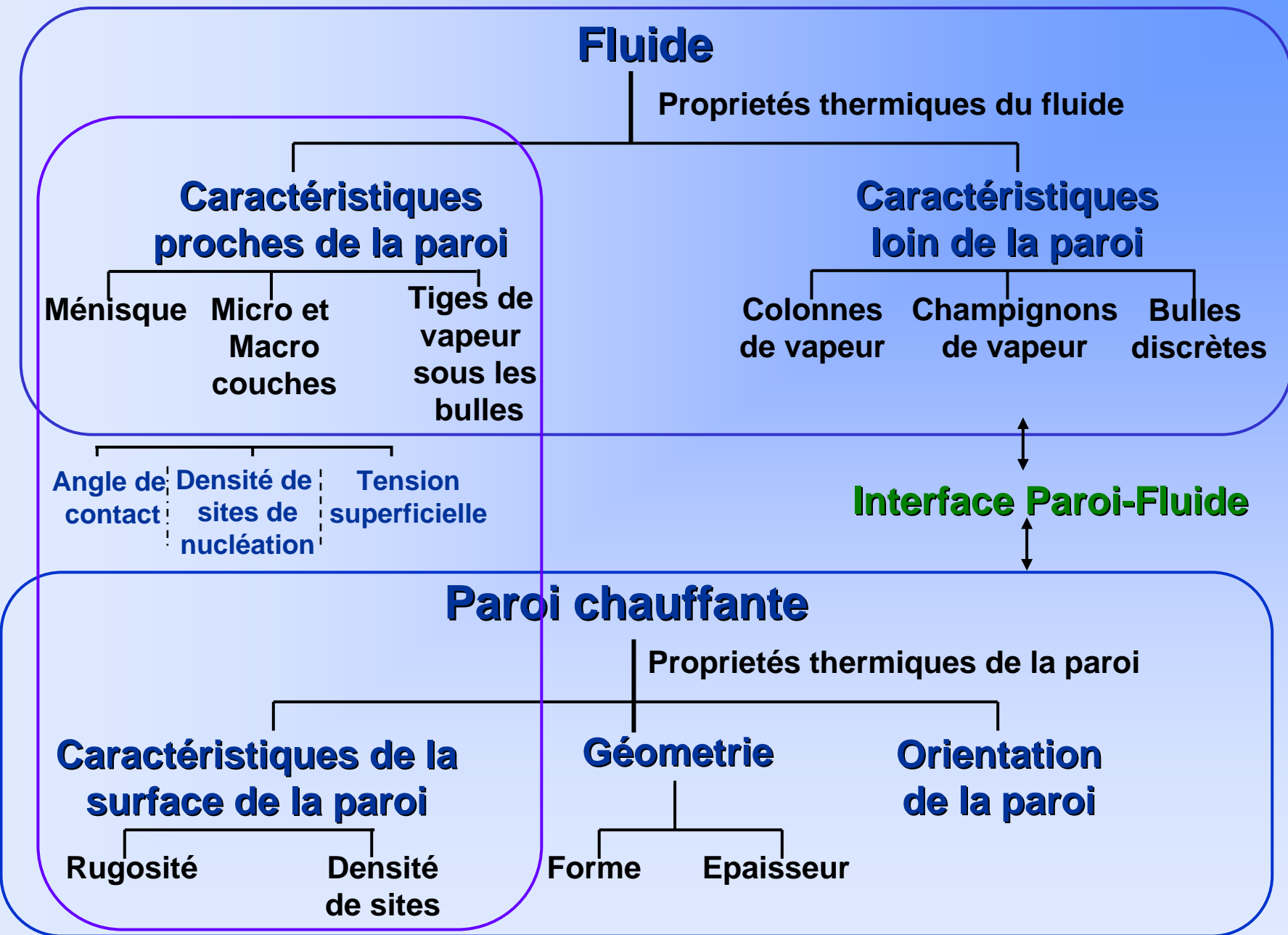
*Ebullition en
convection forcée*

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

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

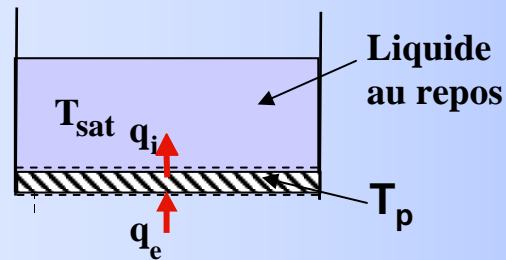
*Images extraites
de Passos (1989, 1990)*





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

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

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

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

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

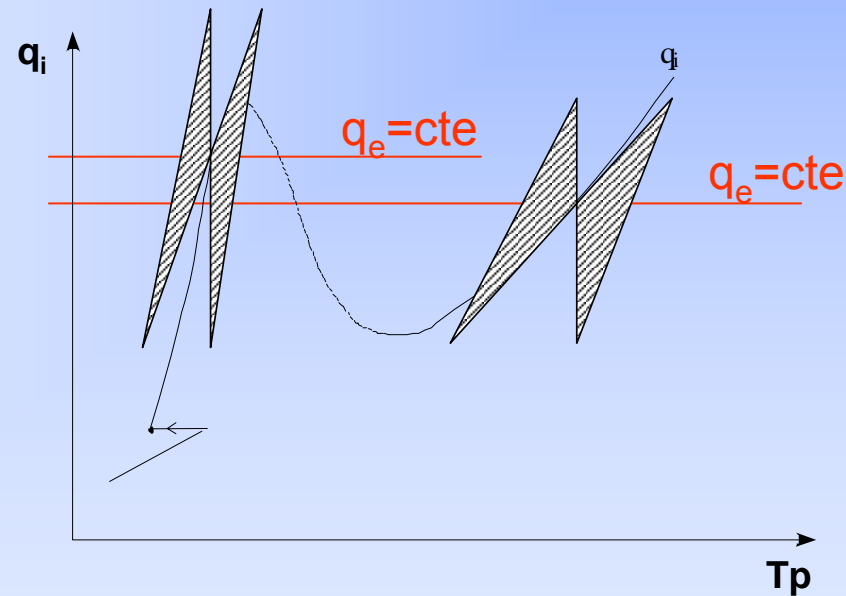
$$\boxed{\frac{\partial q_e}{\partial \theta} < \frac{\partial q_i}{\partial \theta}}$$

in K. Stephan (1965, 1992)

Condition de stabilité (2)

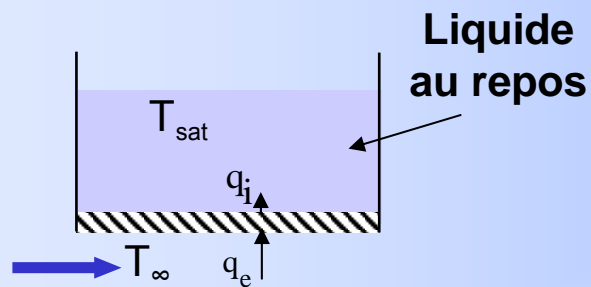
Flux de chaleur constant

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



Condition de stabilité (3)

Avec la température de la paroi contrôlée



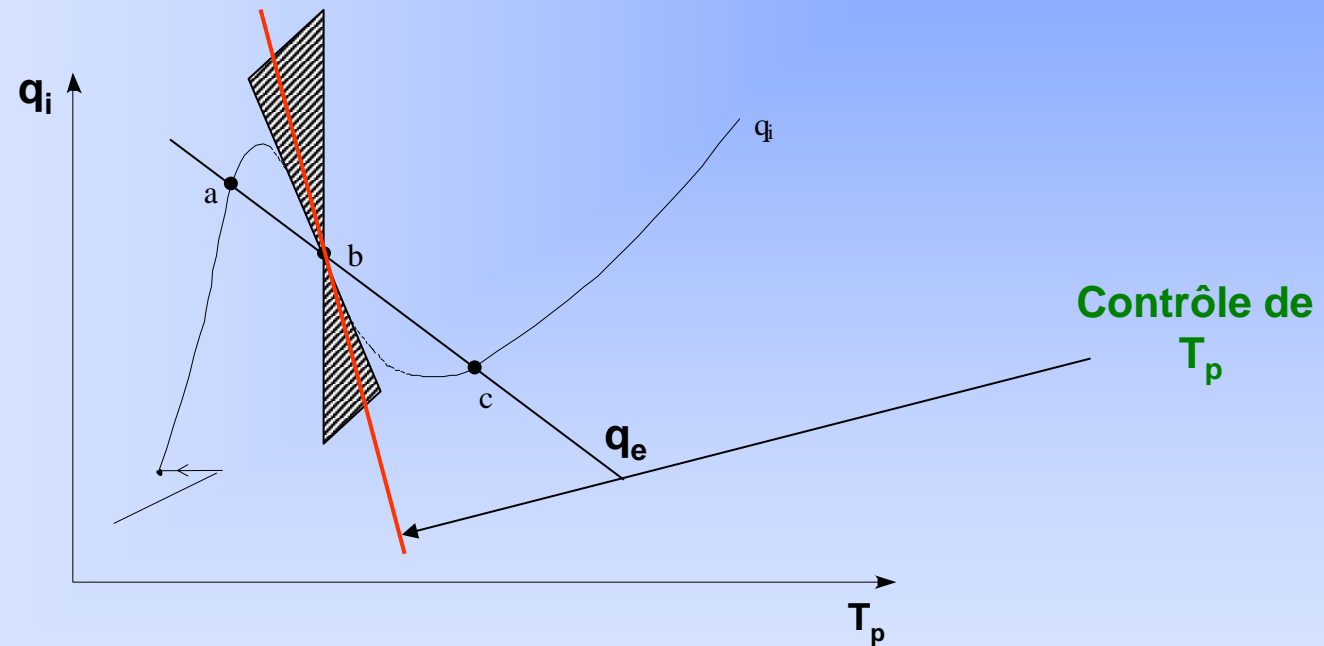
$$\frac{\partial q_e}{\partial \theta} = -h_e \left\langle \frac{\partial q_i}{\partial \theta} \right\rangle$$

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

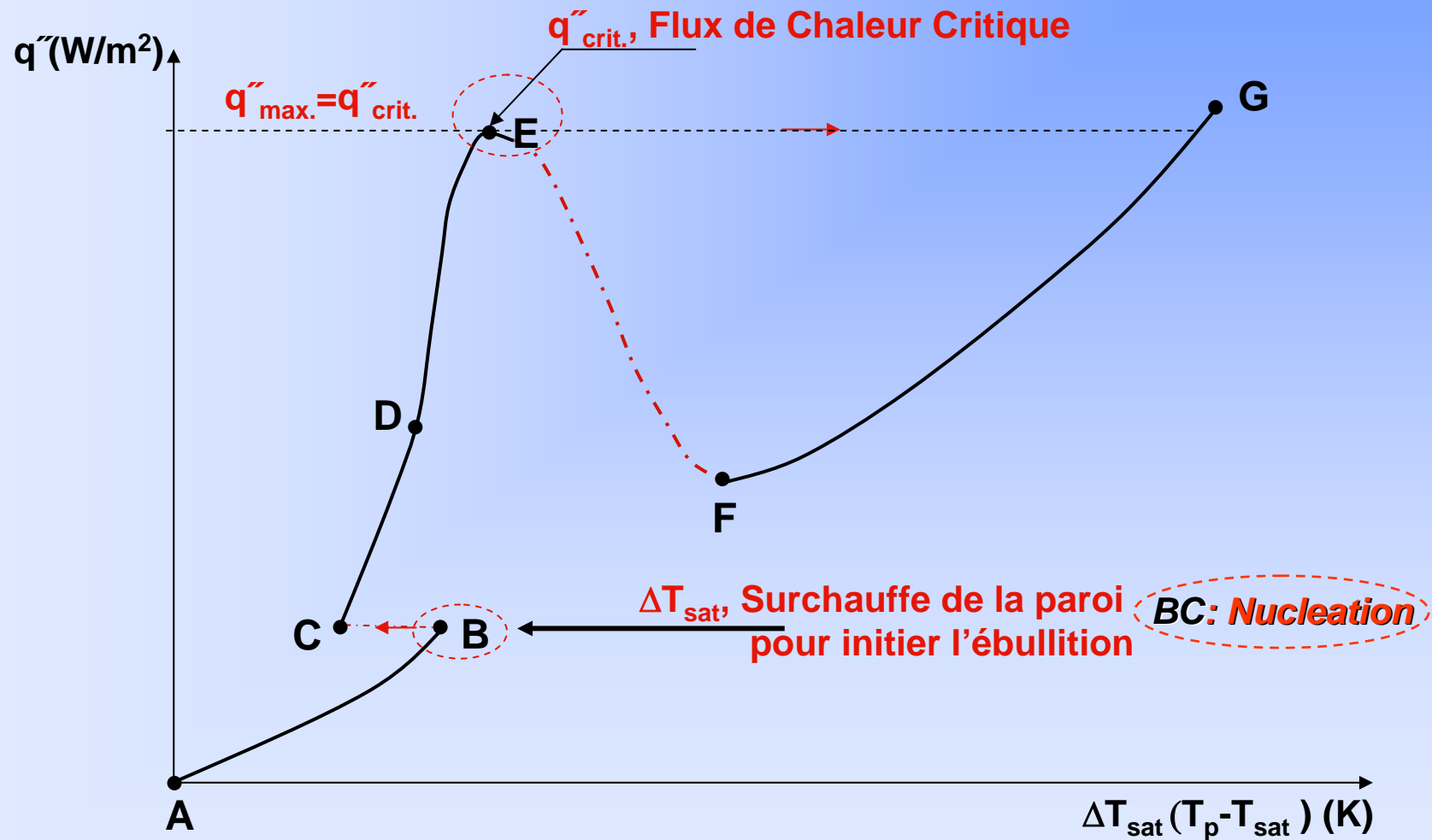
In Stephan (1965, 1992)

Condition de stabilité (4)

Stable dans les points a ou c



Deux points de projets à connaître



Surchauffe du liquide

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

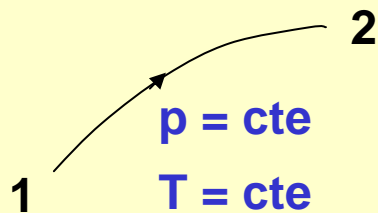
Pour déduire cette équation il faut regarder les équations fondamentales de la nucléation.

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 fase



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

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

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

De la 1^{ère} Loi de la
thermodynamique

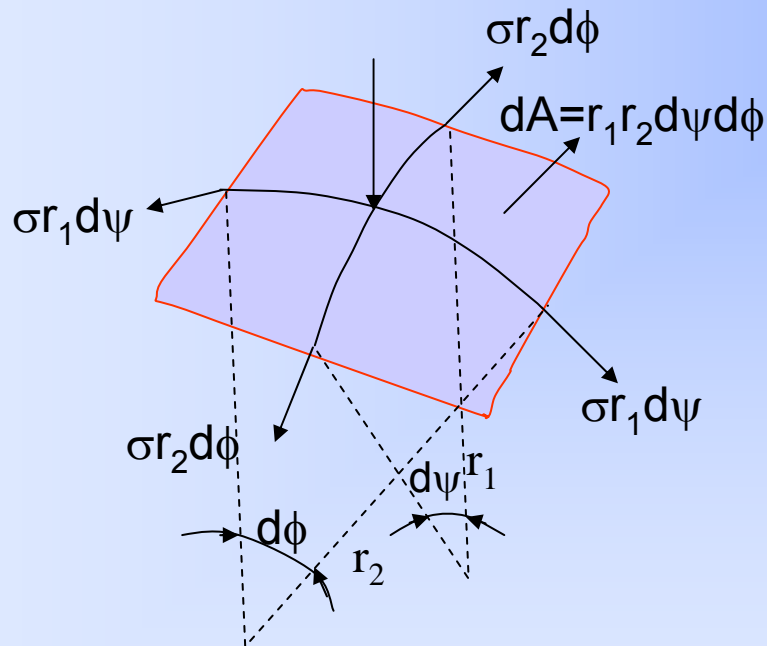
$$\delta q = dh - v dp = T ds$$

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



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

$$r_1 = r_2 = r$$

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

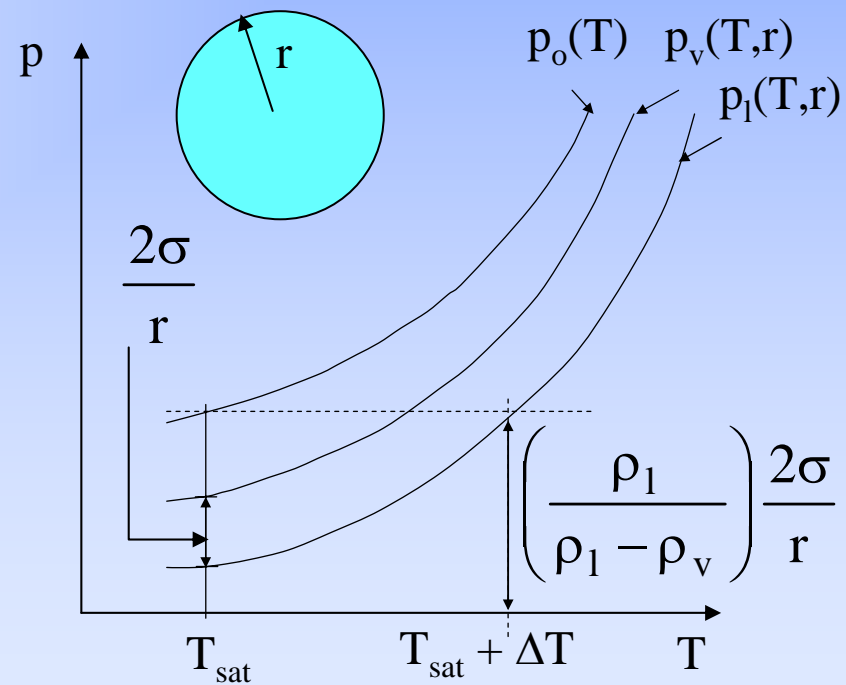
Equation 3 de la nucléation

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

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

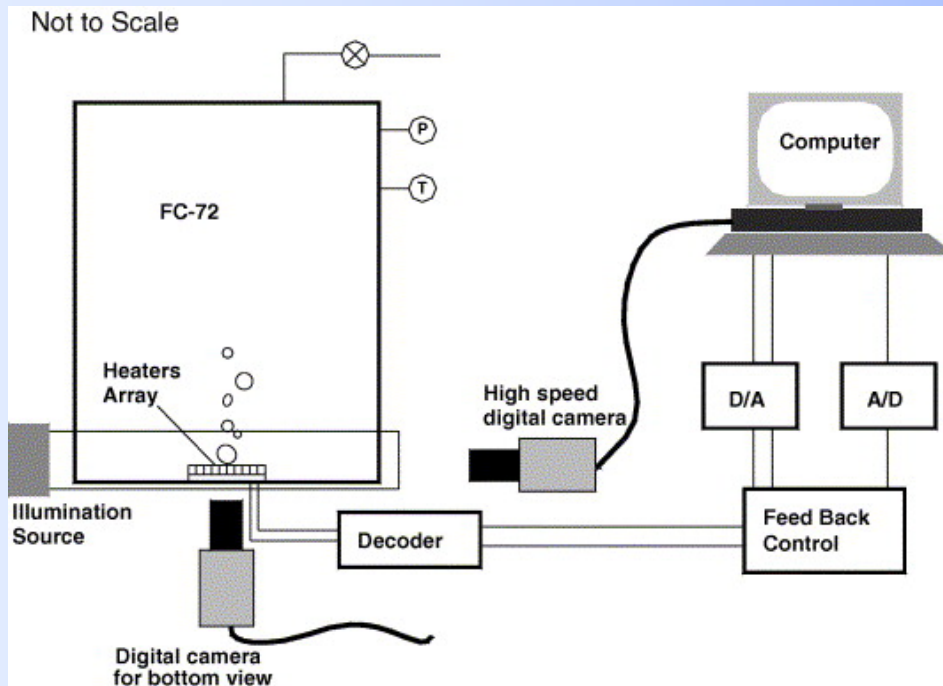
$$\frac{dp_1}{dT} = \frac{dp_0}{dT} - \frac{d}{dT} \left[\left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_v} \right) \frac{2\sigma}{r} \right]$$

Après l'intégration entre T_{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
 $T_{\text{sat}}(p_{\text{atm}}) = 56^\circ\text{C}$

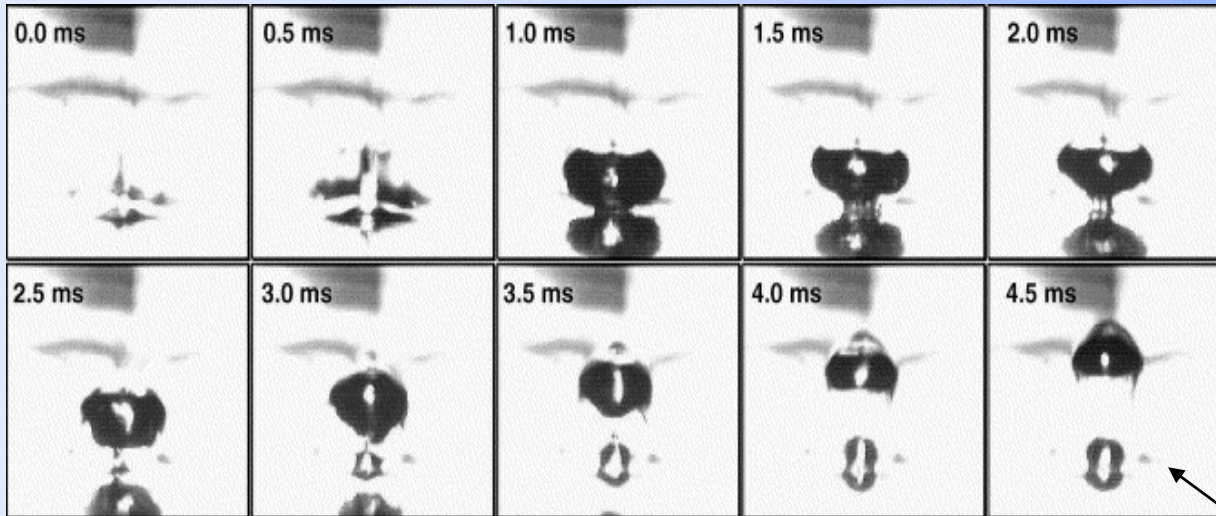
Chen et al., IJHMT, vol. 46, 2006

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.

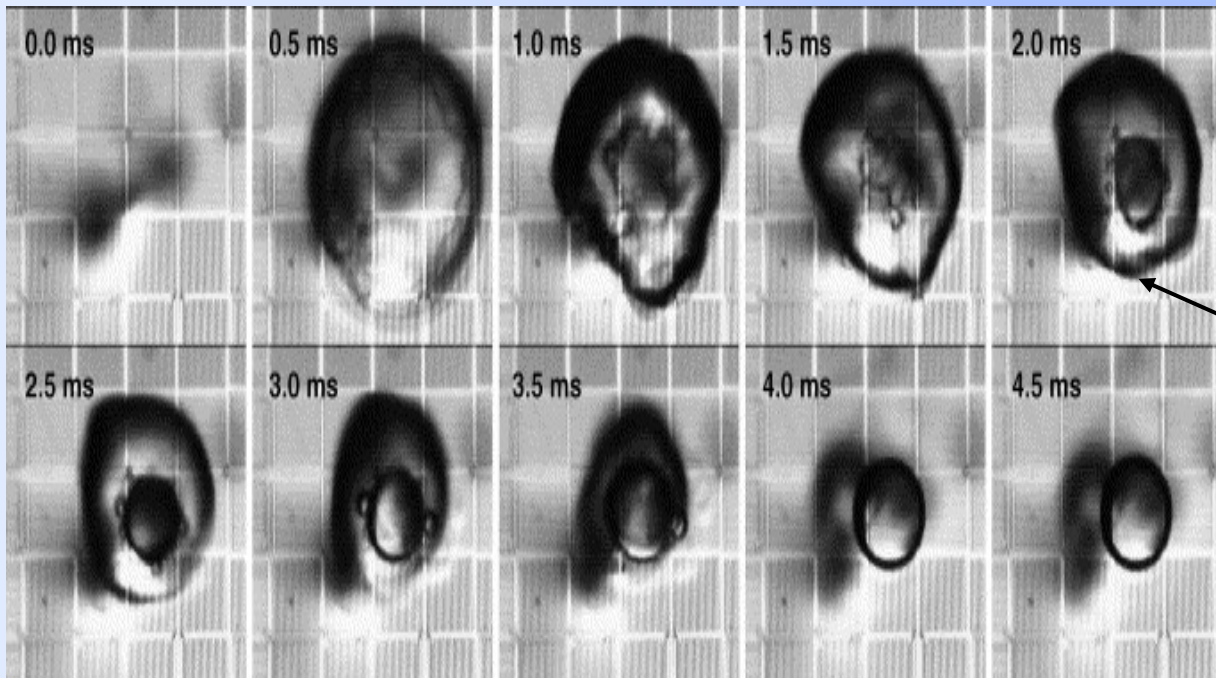
$$J = 1,44 \cdot 10^{40} \left(\frac{\rho_l^2 \sigma}{M^3} \right)^{0,5} \exp \left(\frac{-1,213 \cdot 10^{24} \sigma^3}{T [\eta P_{\text{sat}}(T_l) - P_l]} \right)$$

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



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

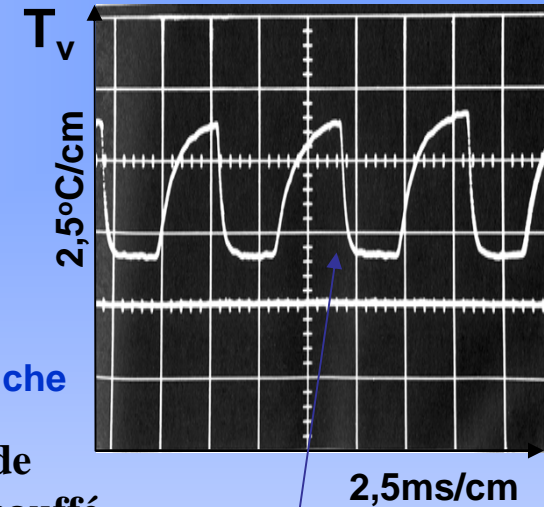
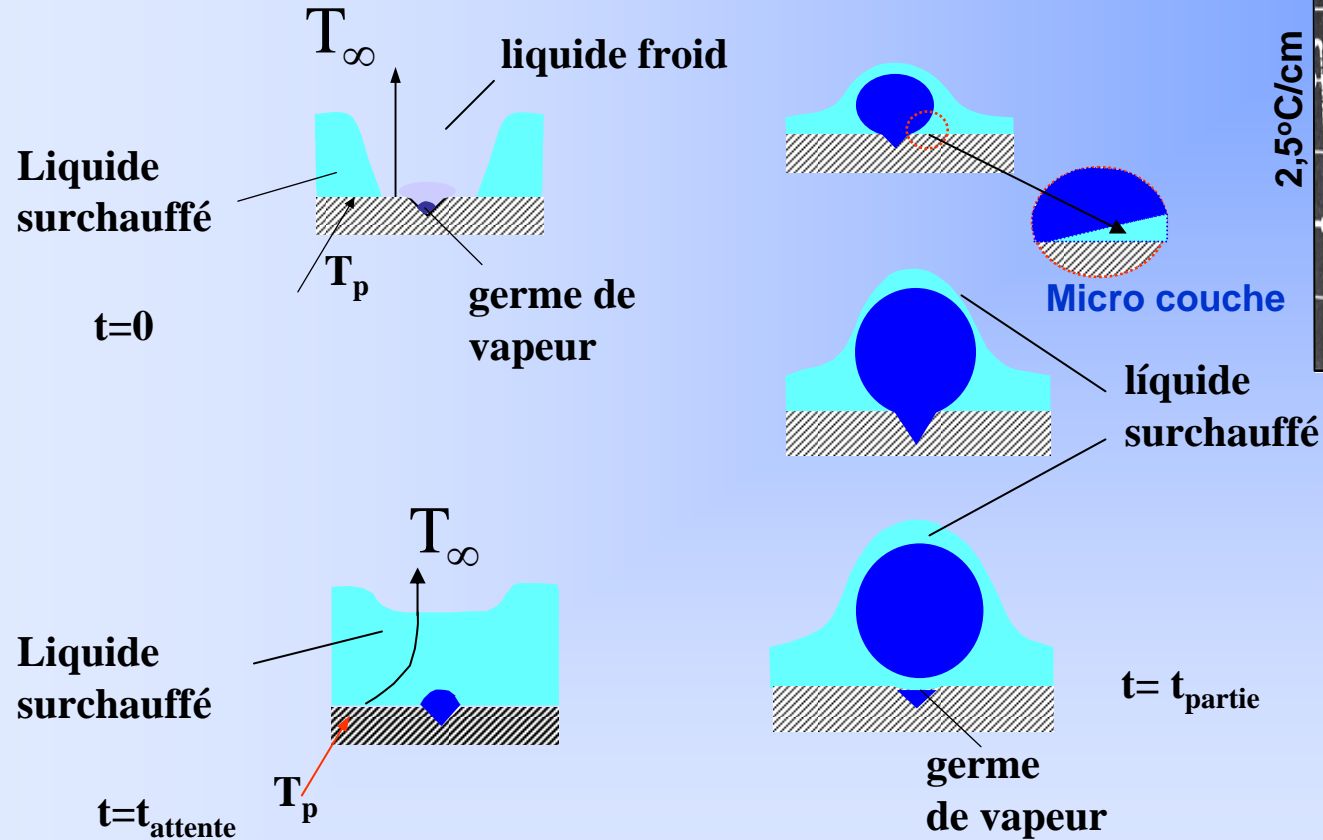
Calculation of threshold nucleation rates of FC-72 at 1 atm

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

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

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

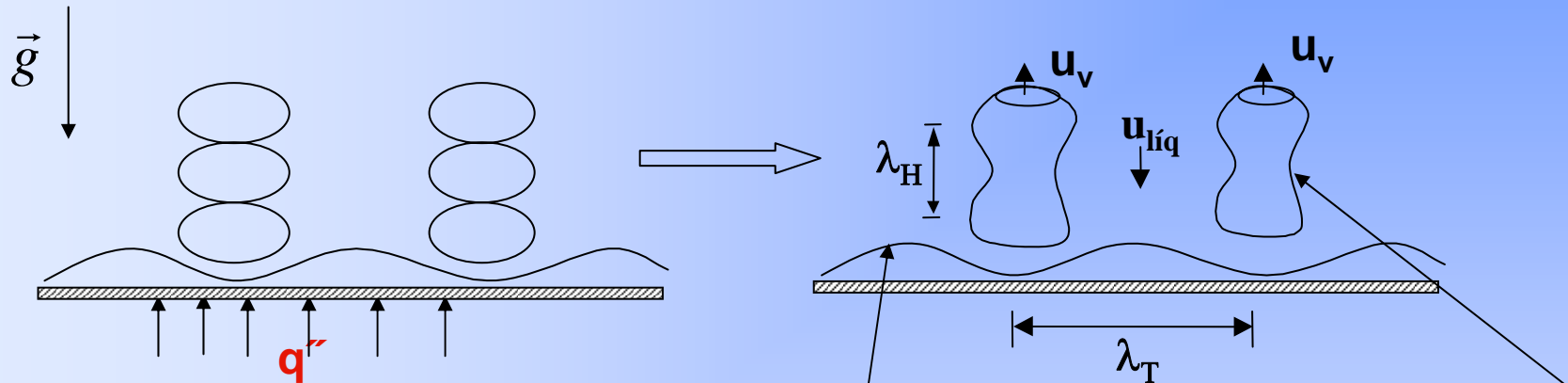
- ébullition libre
- sur une plaque chauffante plane horizontale infinie
- surface chauffée de la plaque placée vers le haut
- liquide à la température de saturation, $T_{liq} = T_{sat}(p_{liq})$

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.

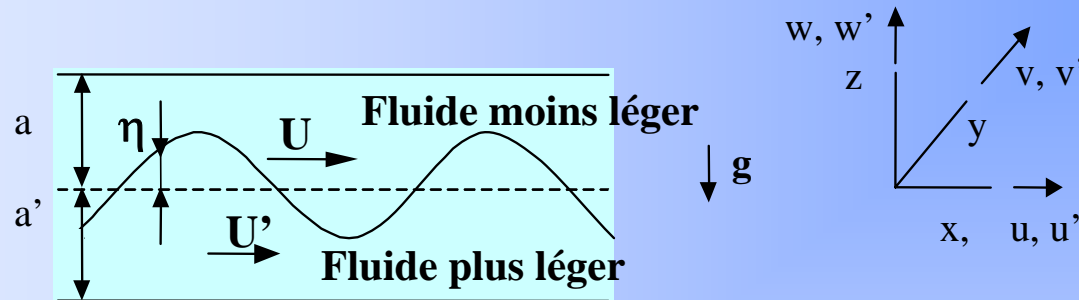
Le modèle de Zuber (3)



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

l'idée clé
Intéraction 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)

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

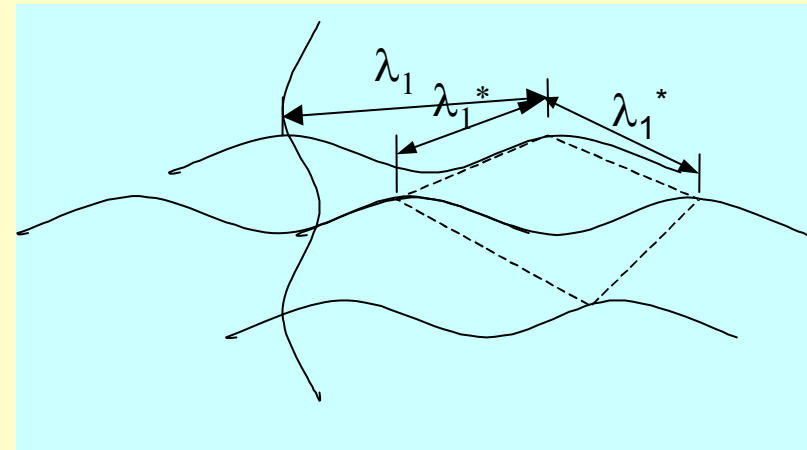
$$a \rightarrow \infty$$

$$a' \rightarrow \infty$$

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

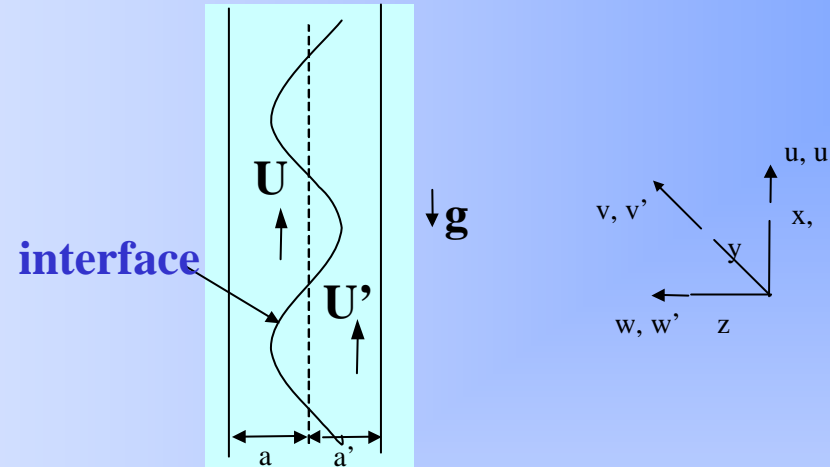
$$\lambda_1^* = \frac{\lambda_1}{\sqrt{2}} = 2\pi \left[\frac{\sigma}{(\rho - \rho')g} \right]^{\frac{1}{2}}$$

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



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

L'instabilité de Helmholtz



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

$$m_1 = L_o = m_H$$

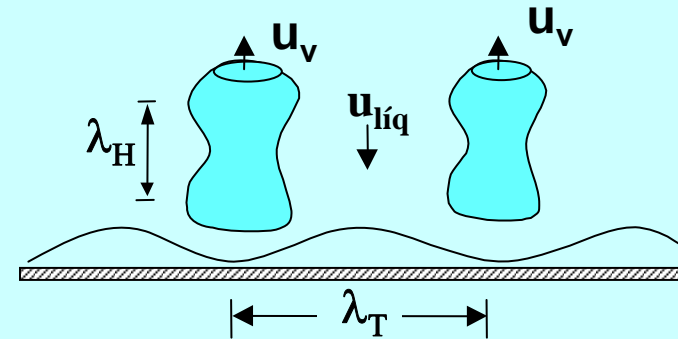
$$\rho = \rho_{\text{liq}} ; \quad \rho' = \rho_v$$

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

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

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

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

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

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

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

[Nombre de WEBER]⁻¹

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_{sat} (°C)] | q'' (W/cm ²) |
|--|----------------------------|
| 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

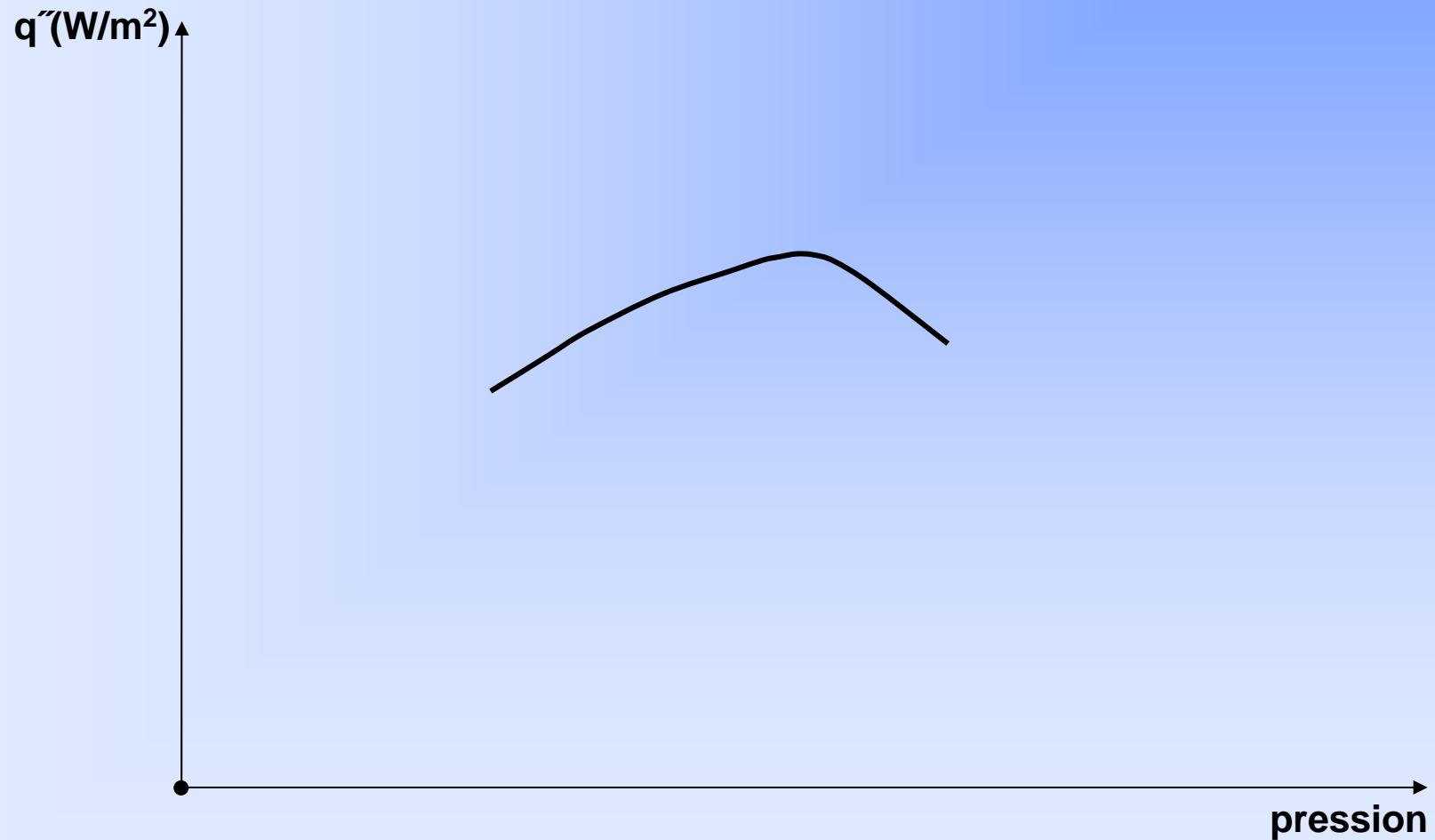
Corrélation de Zuber et al. (1961)

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

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

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

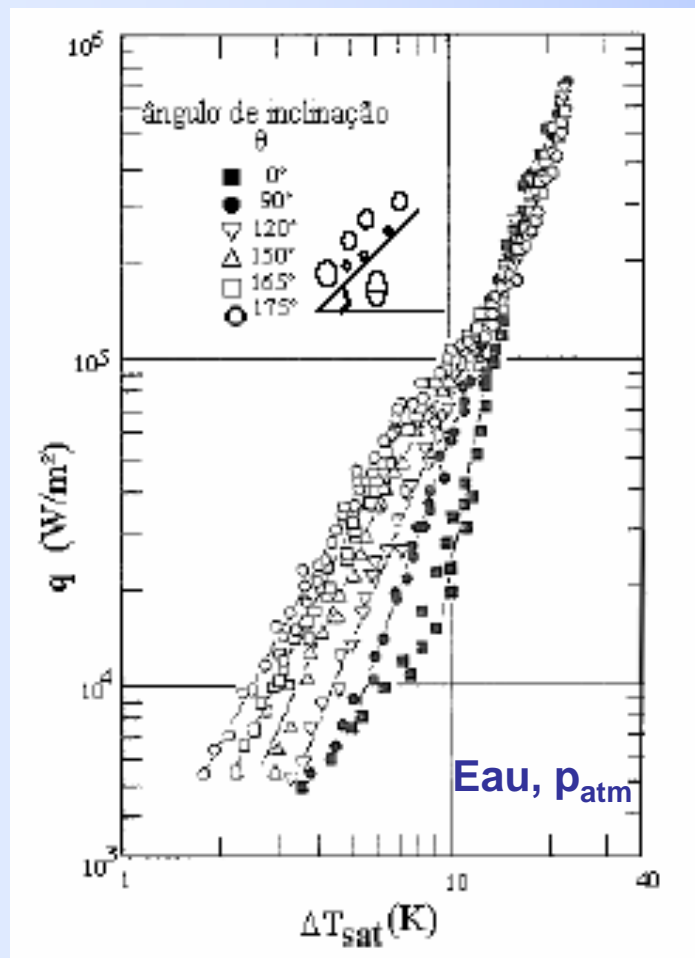


LEPTEN LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA



ARCUS-Journées Rhônes-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 θ 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

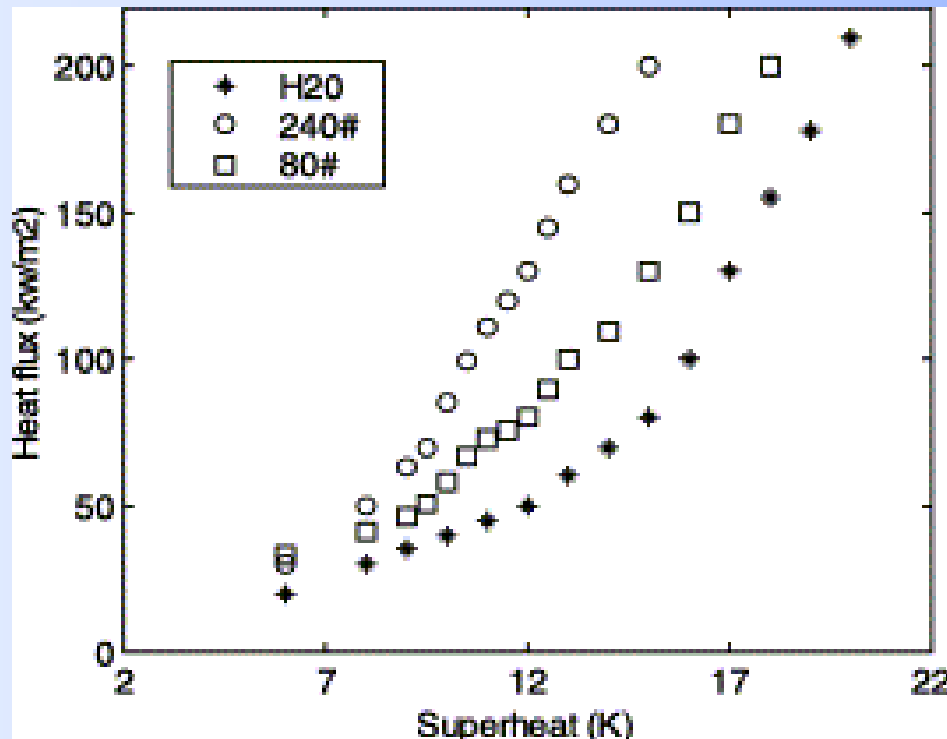
(prochains trois transparents)

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.

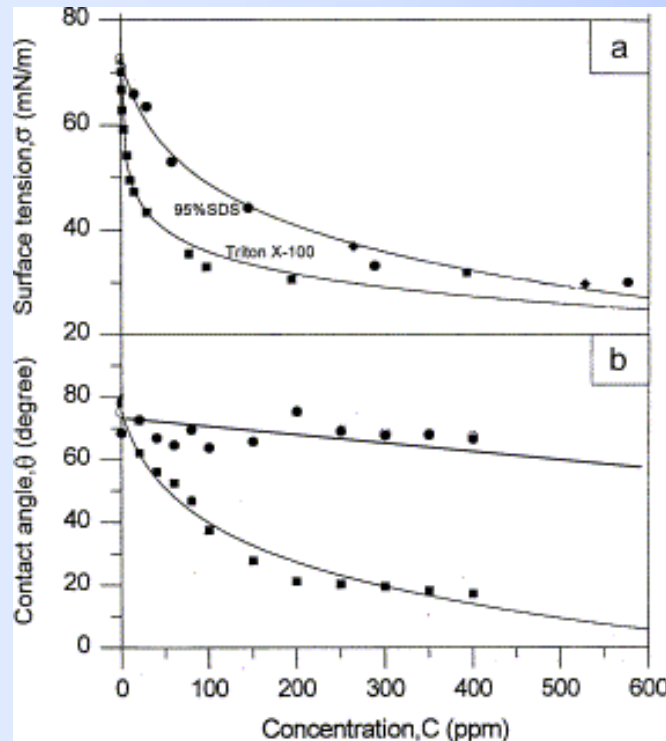


Effet de la rugosité sur le coefficient de transfert de chaleur

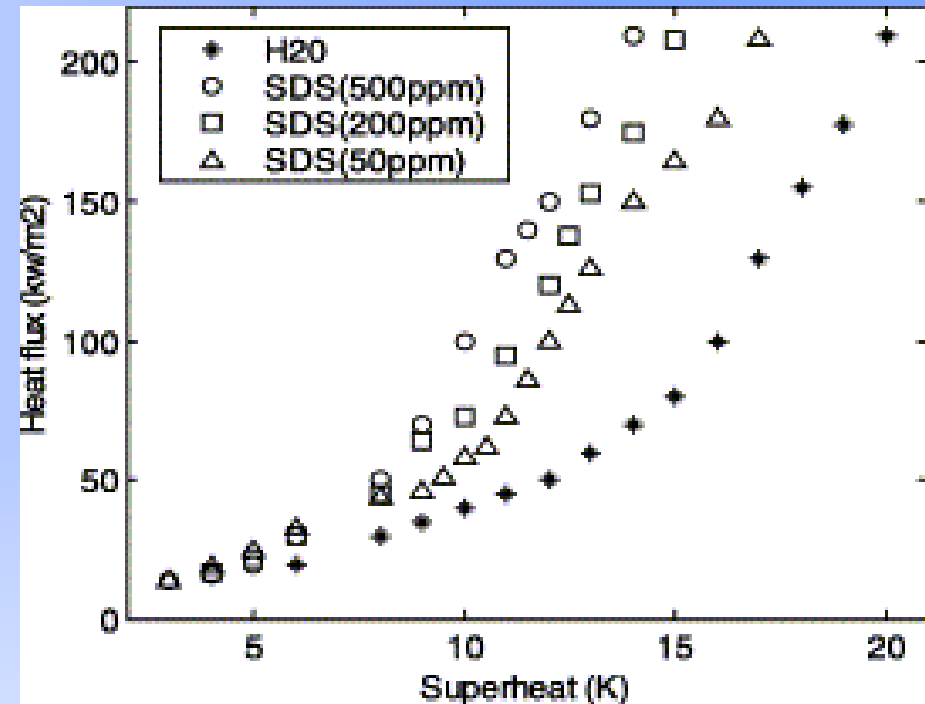
Fluide: Eau

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



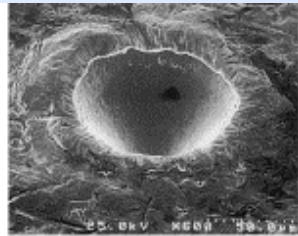
Effet de la concentration de SDS sur le coefficient de transfert de chaleur

Fluide: Eau

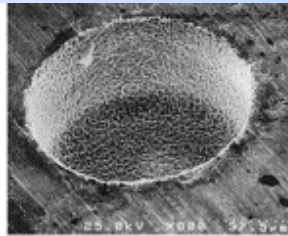
Surfactantes testés: SDS, Triton X-100 et Octadecylamine

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

Influence du type des cavités sur l'ébullition nucléée



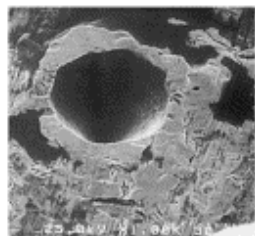
(a) Conical, $D=100 \mu\text{m}$



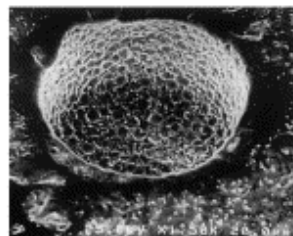
(b) Cylindrical, $D=100 \mu\text{m}$



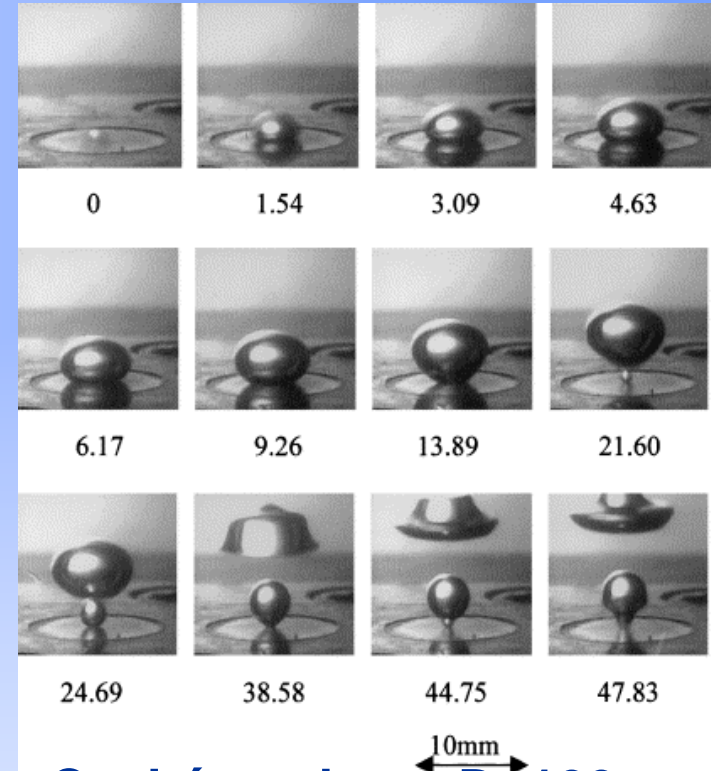
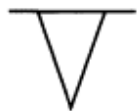
(c) Reentrant, $D=100 \mu\text{m}$



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



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



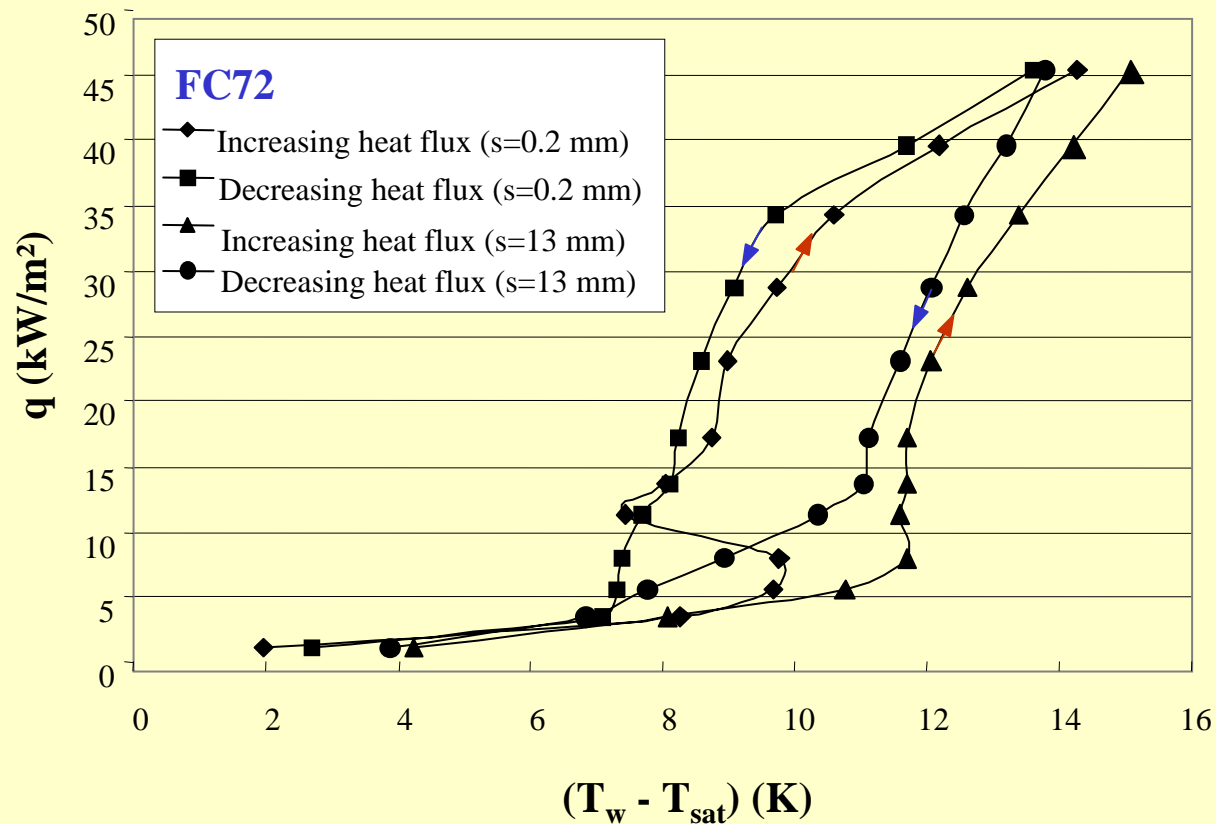
Cavité conique, $D=100 \mu\text{m}$

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.

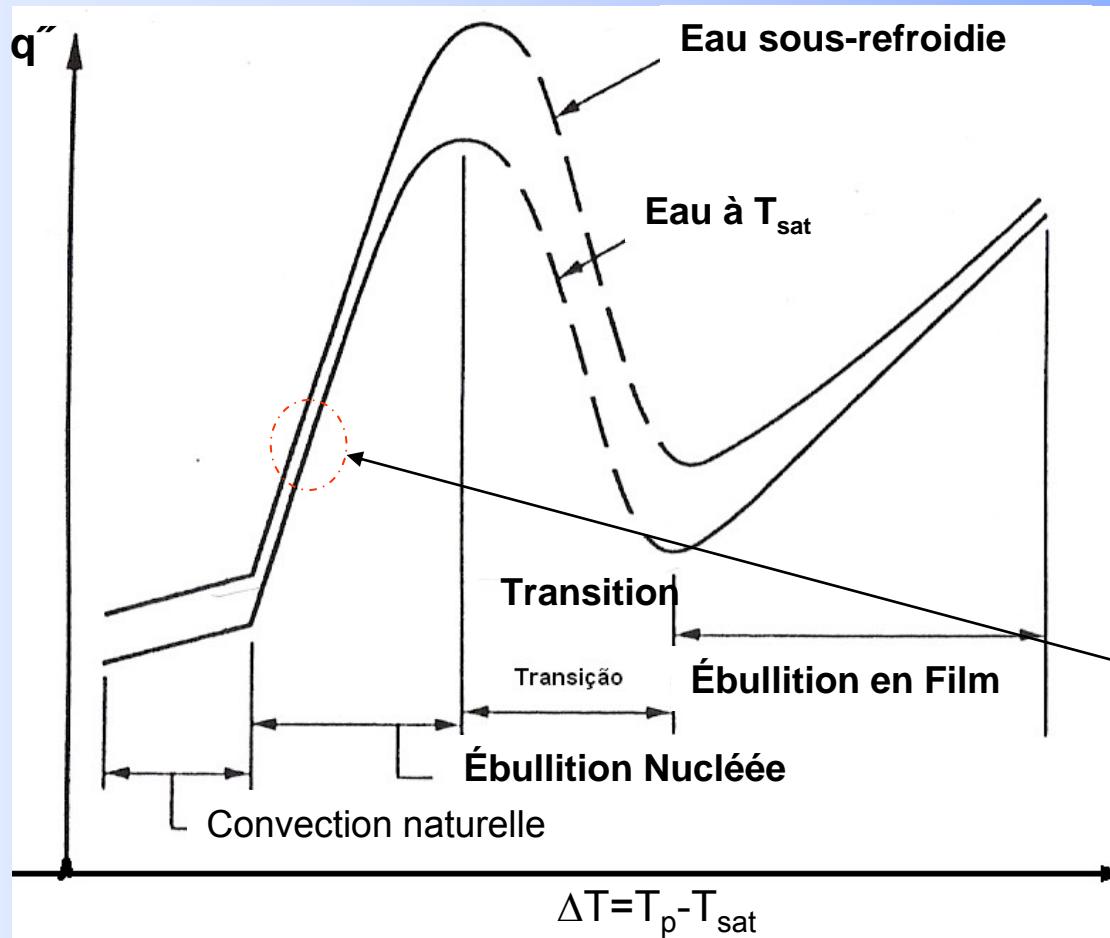
Influence du mode de chauffage sur l'ébullition nucléée

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

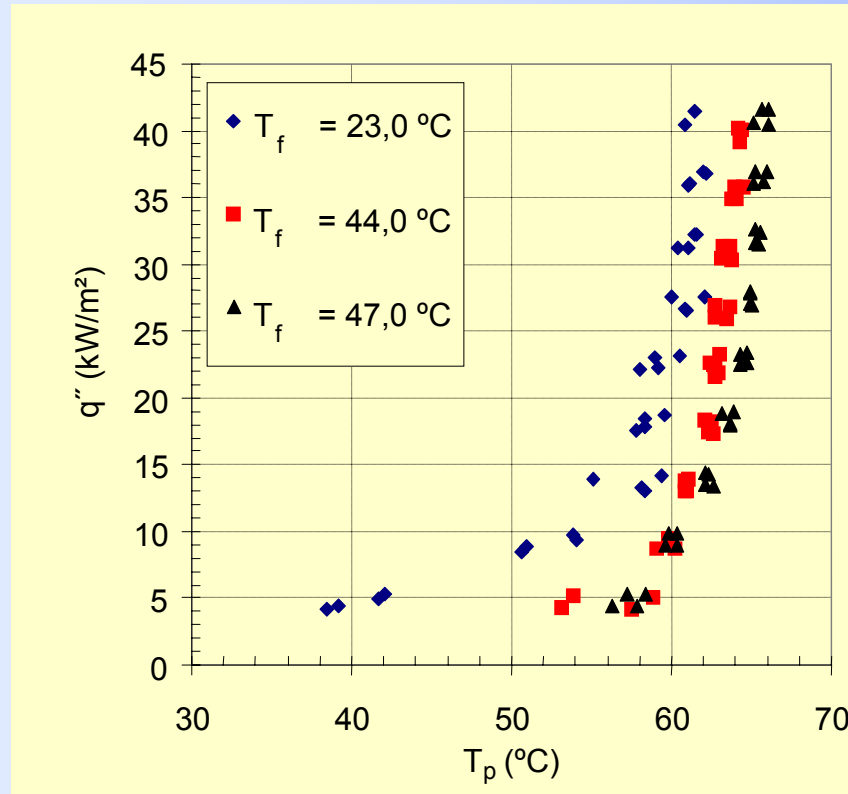
$$\Delta T \downarrow$$



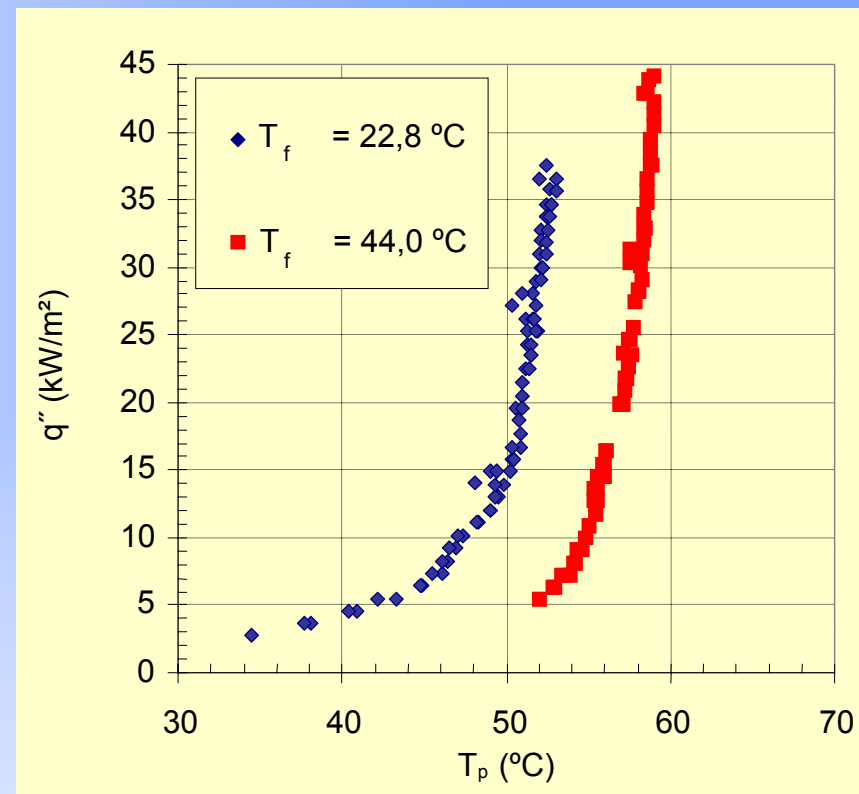
Ebullition sur un fil de platine «Technique Schlieren», in Jabardo (2008)

Influence du sous-refroidissement du liquide

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



Tube vertical lisse

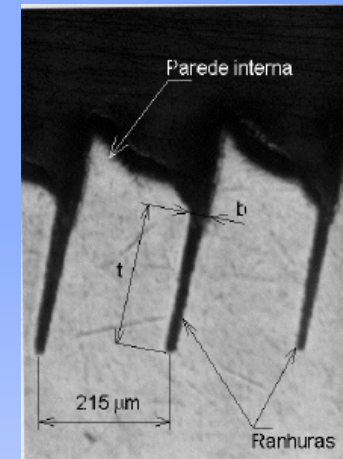
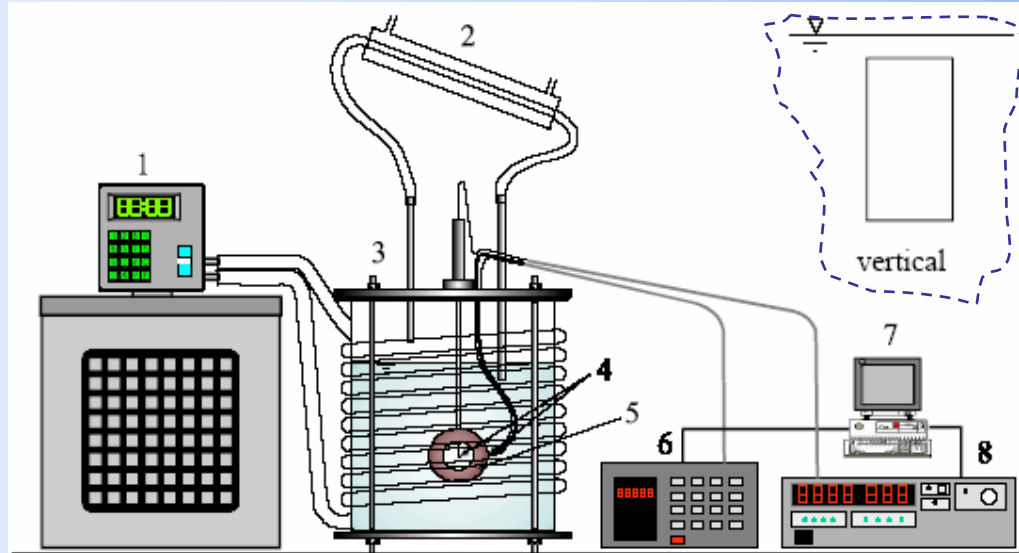


Tube vertical rainuré

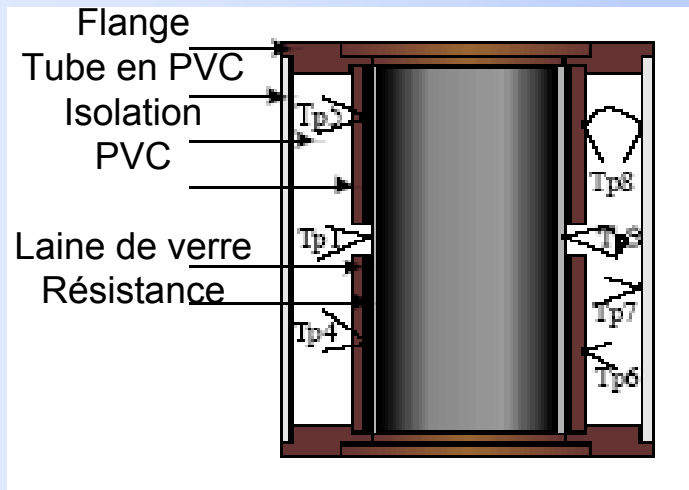
L'ébullition nucléée est peu influencée par le sous-refroidissement du liquide.

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

Banc d'essai pour les résultats précédents



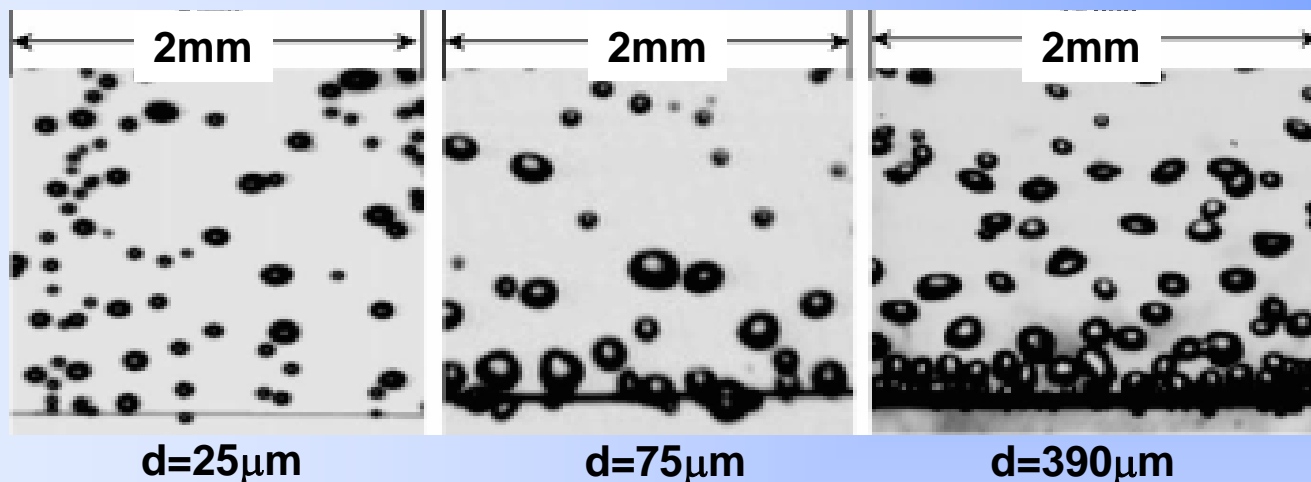
**Paroi interne rainurée
du tube testé**



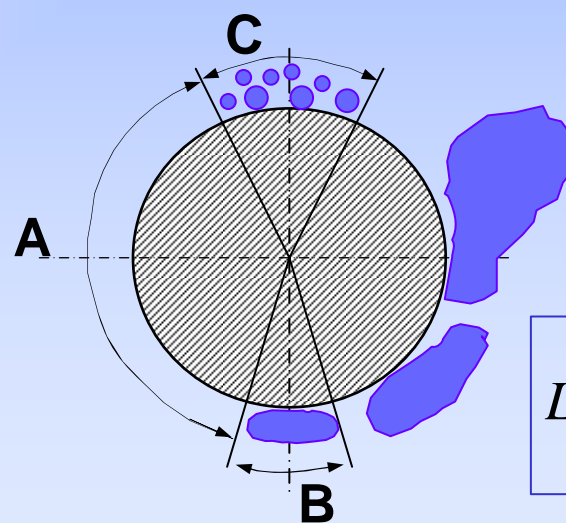
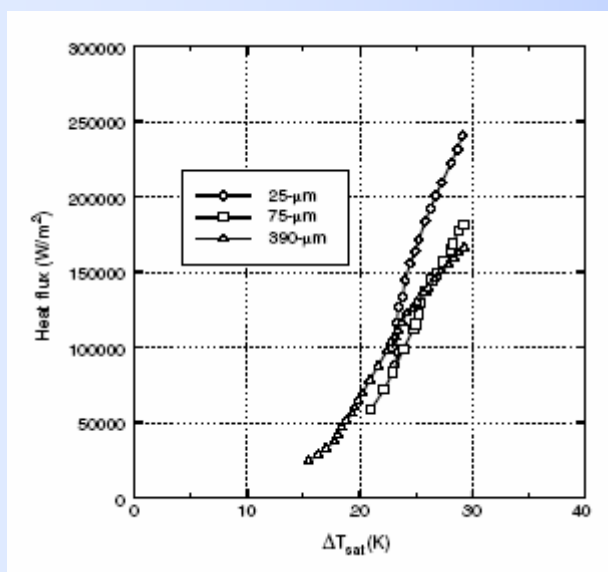
**Ébullition nucléée à
l'intérieur des tubes verticaux**

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

Influence du diamètre du fil chauffant



Fluide:
FC72



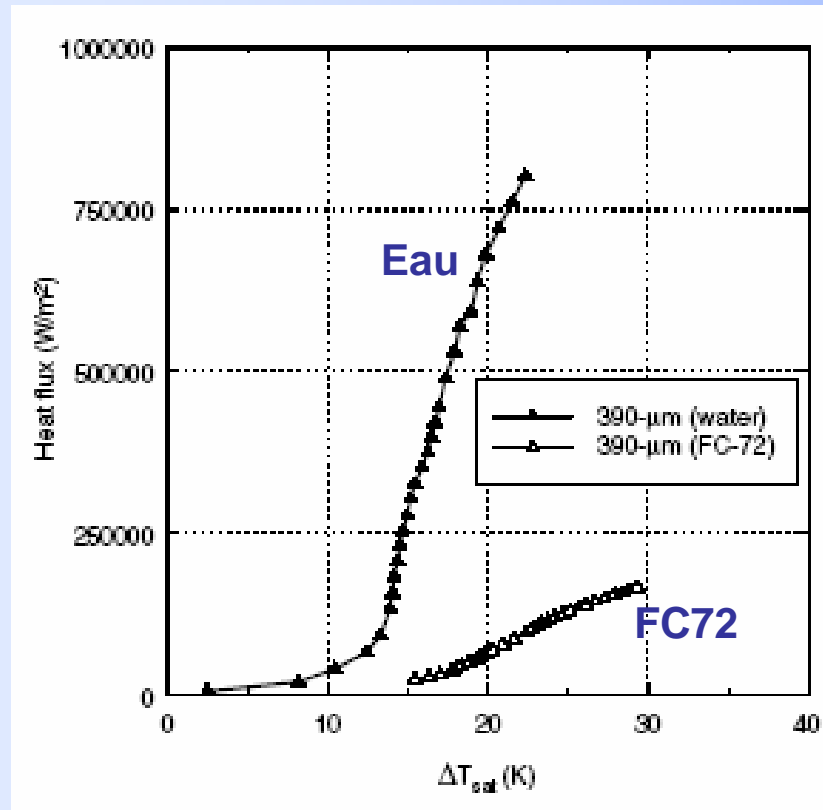
Pour tubes
de grands
diamètres
 $R \gg L_c$

Longueur capillaire

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

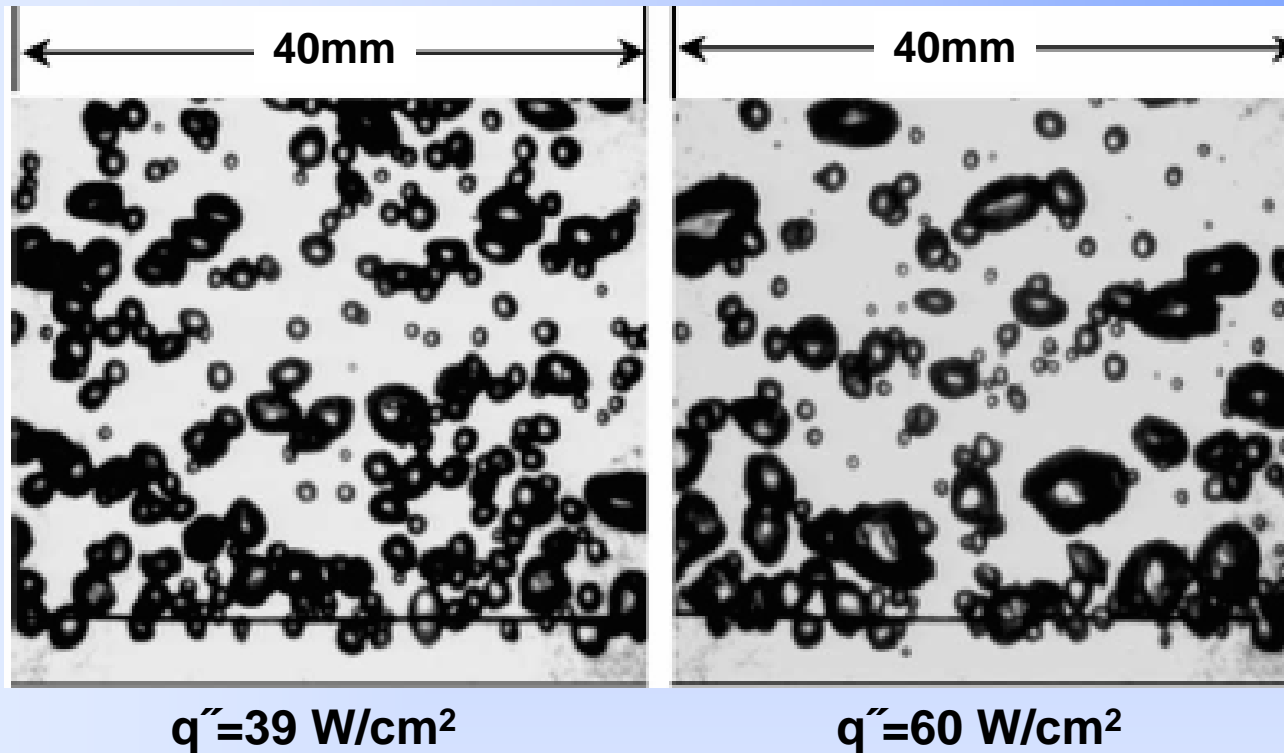
in, Kim et al., *IJHMT*, vol. 49, pp. 122-131, 2006

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

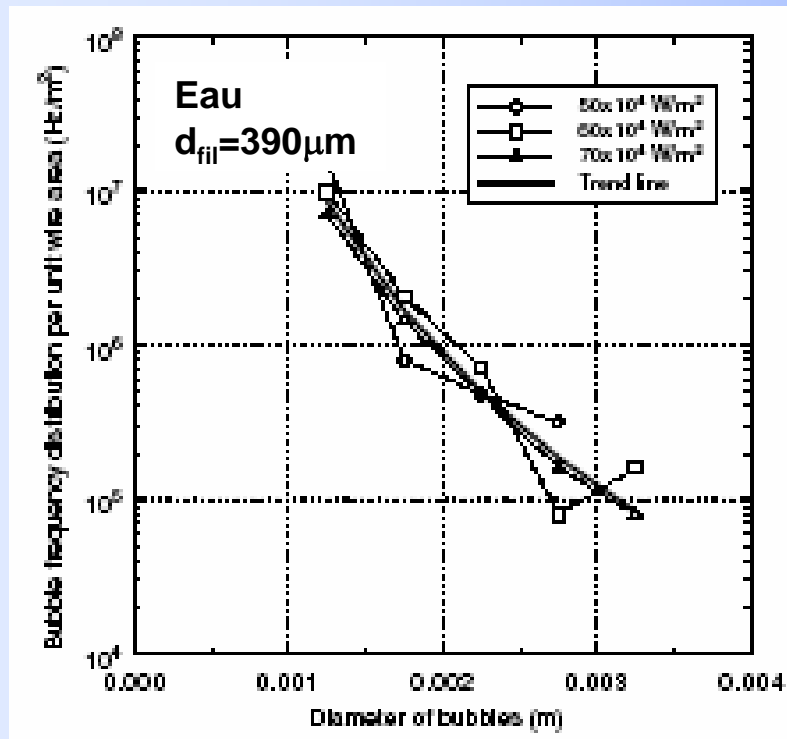


Eau

$d_{\text{fil}} = 390 \mu\text{m}$

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)

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

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

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

Transport convective

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

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

Corrélation de Rhosenow (2)

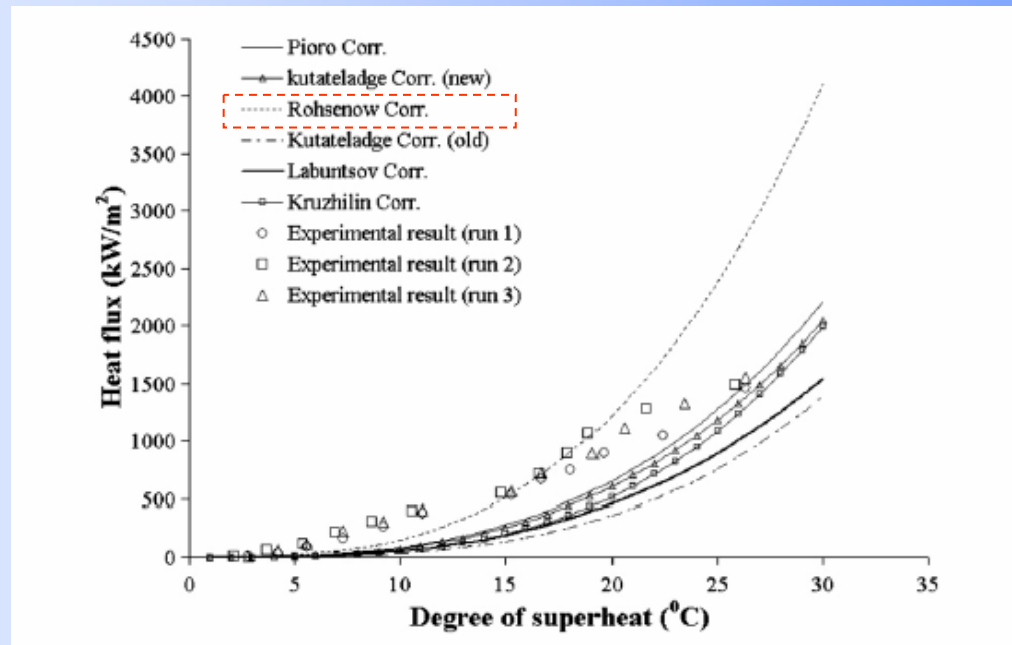
Transport convective

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

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

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

Corrélation de Rohsenow (3)



Constante empirique dans la corrélation de Rohsenow

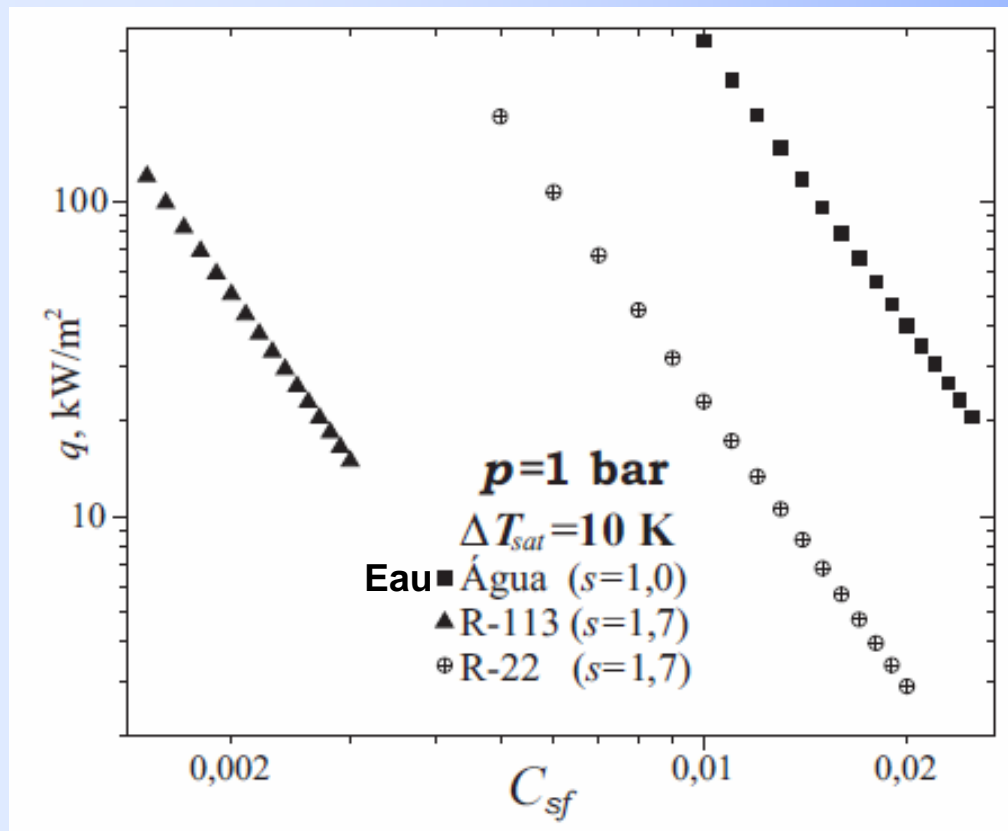
$C_{sf}=0,016$ (cuivre + eau)

$C_{sf}=0,013$, 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

Corrélacion 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

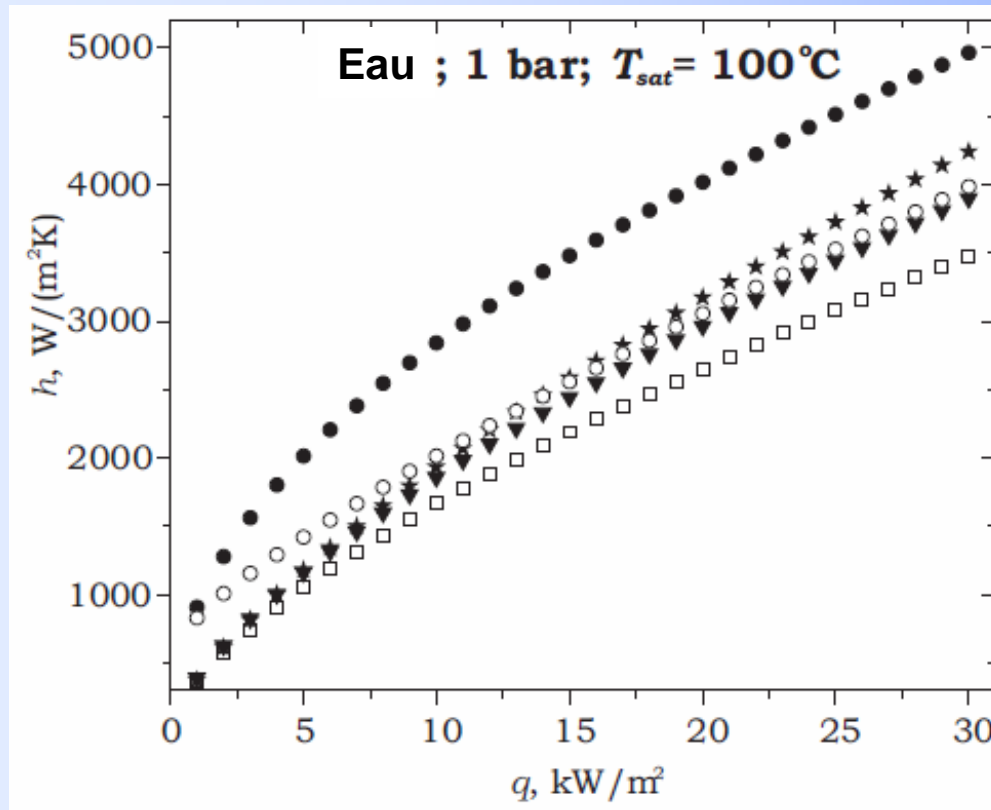
| Corrélation | C | n |
|----------------------|-------|-------|
| Borishansky | 1,21 | 0,700 |
| Cooper | 2,66* | 0,670 |
| Forster e Zuber | 9,90 | 0,520 |
| Rohsenow 1 (s = 1) | 3,00 | 0,670 |
| Rohsenow 2 (s = 1,7) | 0,75 | 0,670 |
| Stephan e Abdelsalam | 1,16* | 0,745 |

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

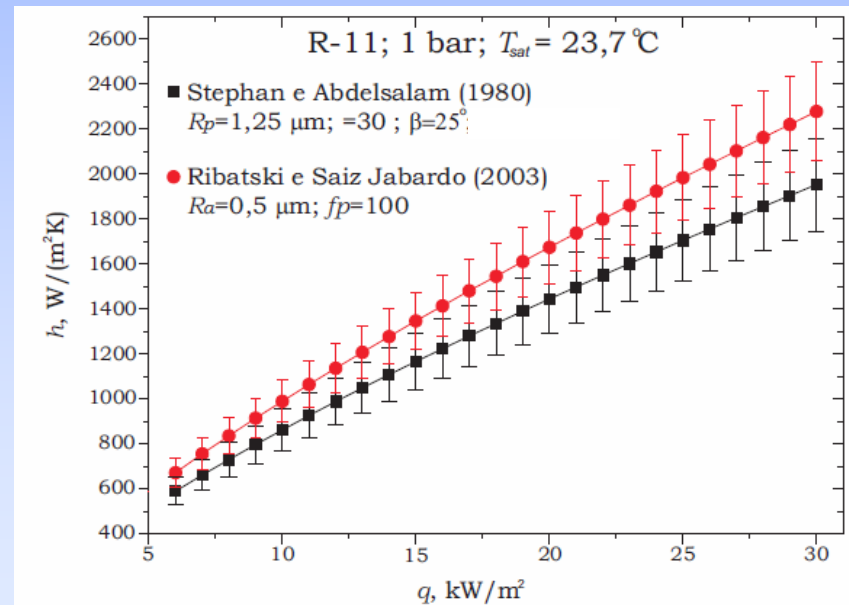
(*) $R_p = 2,2 \mu m$

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

Comparaison des corrélations

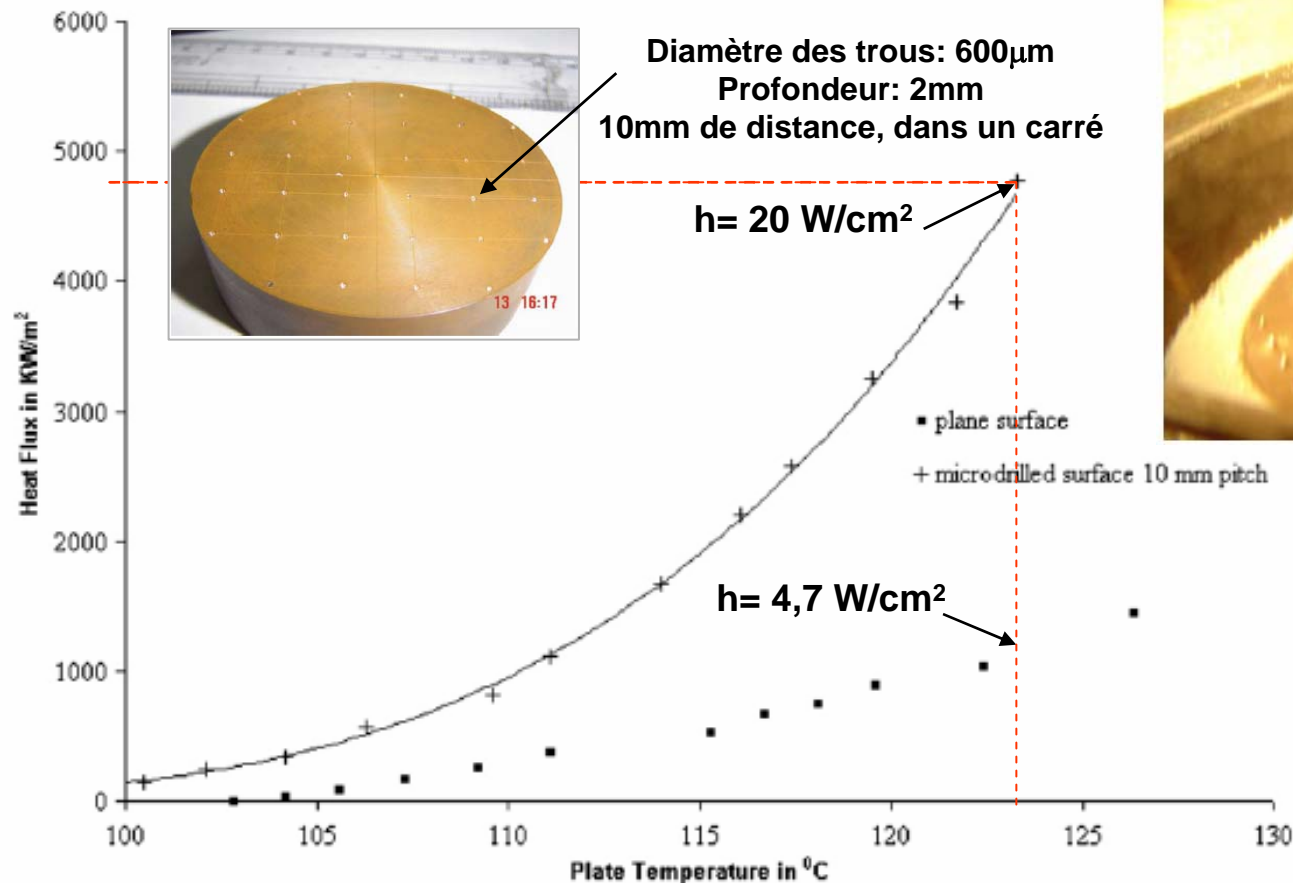


- Forster e Zuber (1955)
- ★ Mikic e Rohsenow (1969)
- Benjamin e Balakrishnan (1996)
 $Ra = 1 \mu\text{m}$
- ▼ Stephan e Abdelsalam (1980)
 $Rp = 2,5 \mu\text{m}$
- Rohsenow (1952)
 $C_{sf} = 0,013; s = 1,7$



Technique et mécanismes physiques d'intensification

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



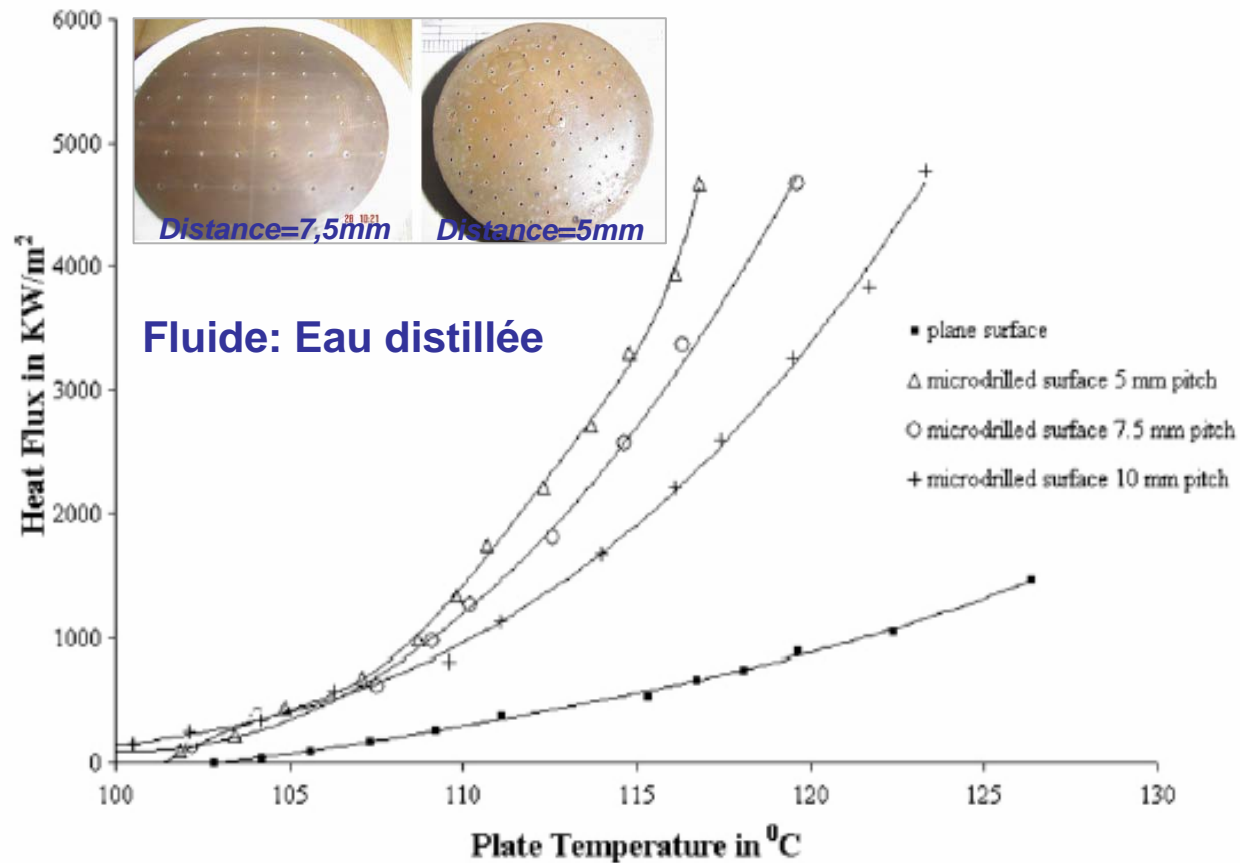
Surface structurée, avec une distribution discrète des sites de nucléation

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

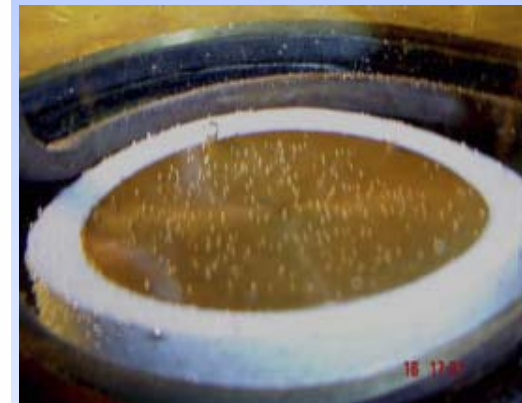
in A.K. Das, P.K. Das, P. Saha, "Nucleate boiling of water from plain and structured surfaces",

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

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

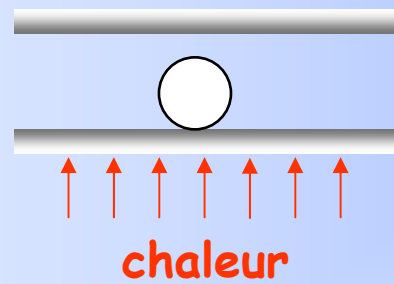
$$\left(\frac{N}{A} \right)$$

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

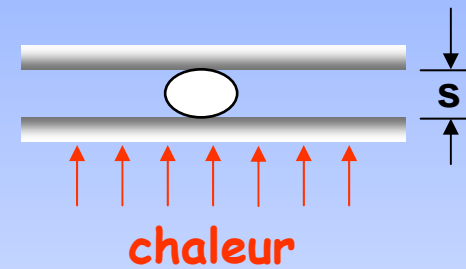
$$a = 7,5655; b = 2,0307; c = 0,52341$$

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

Effet du confinement

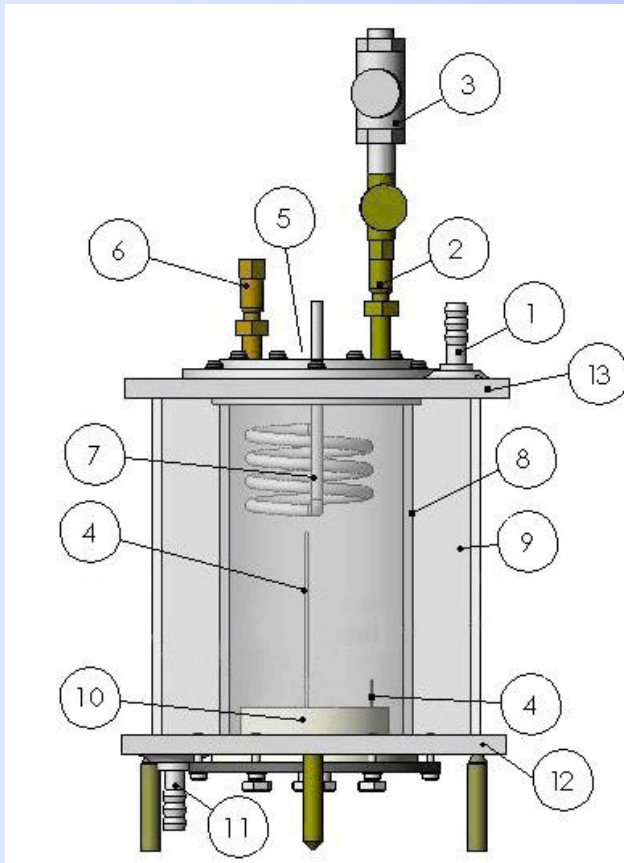


Non confinée



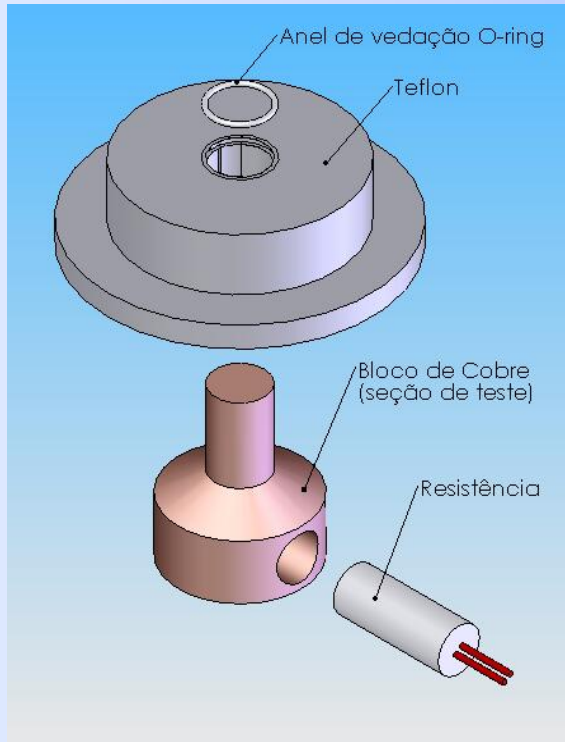
Confinée

Boucle à étudier l'ébullition confinée



LEPTEN/Boiling - UFSC

Section d'essai



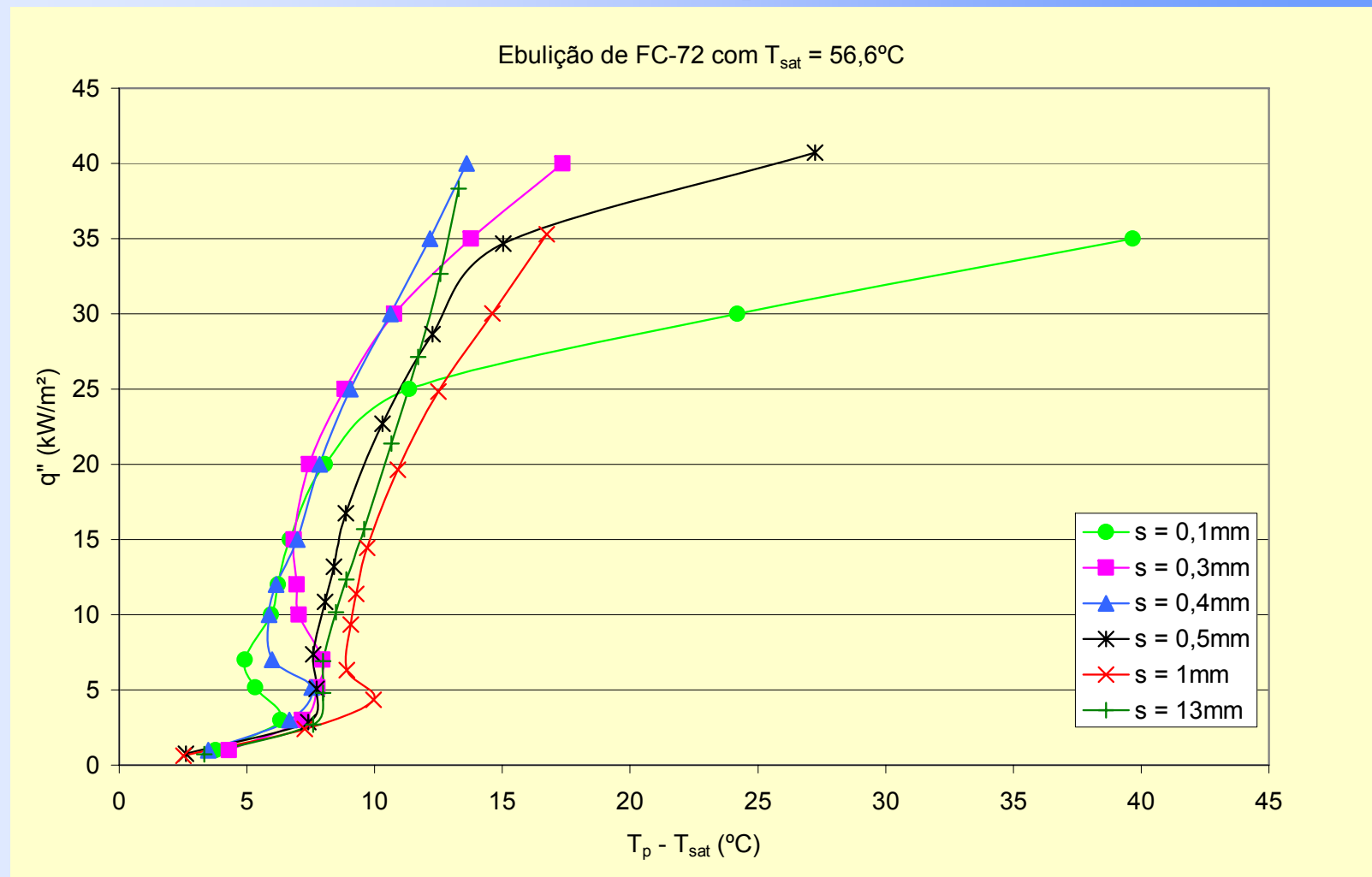
Section d'essai.



Système de confinement

LEPTEN/Boiling - UFSC

Résultats expérimentaux



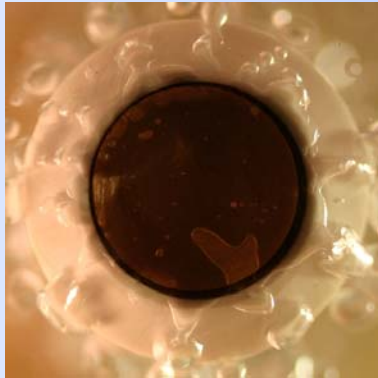
FC-72, en fonction de s , surface chauffante vers le bas
(Cardoso, 2005).

Explication du mécanisme probable

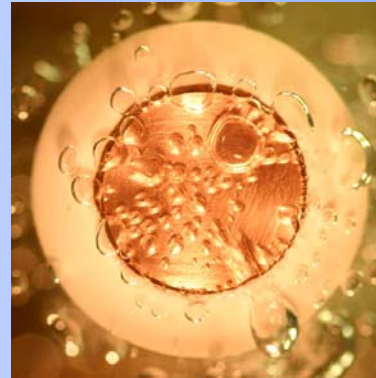
L'intensification de l'ébullition dans un espace confiné est due à l'évaporation d'une couche mince de liquide interposée entre la bulle et la paroi.

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



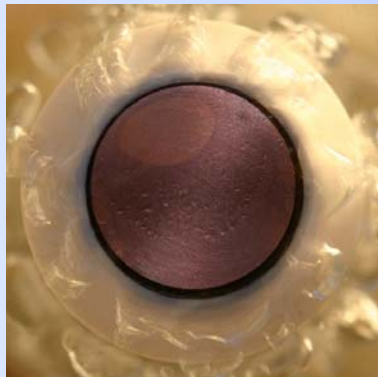
$s = 0,1\text{mm}$
 $T_p = 65,6^\circ\text{C}$



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

FC-72

20kW/m^2



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



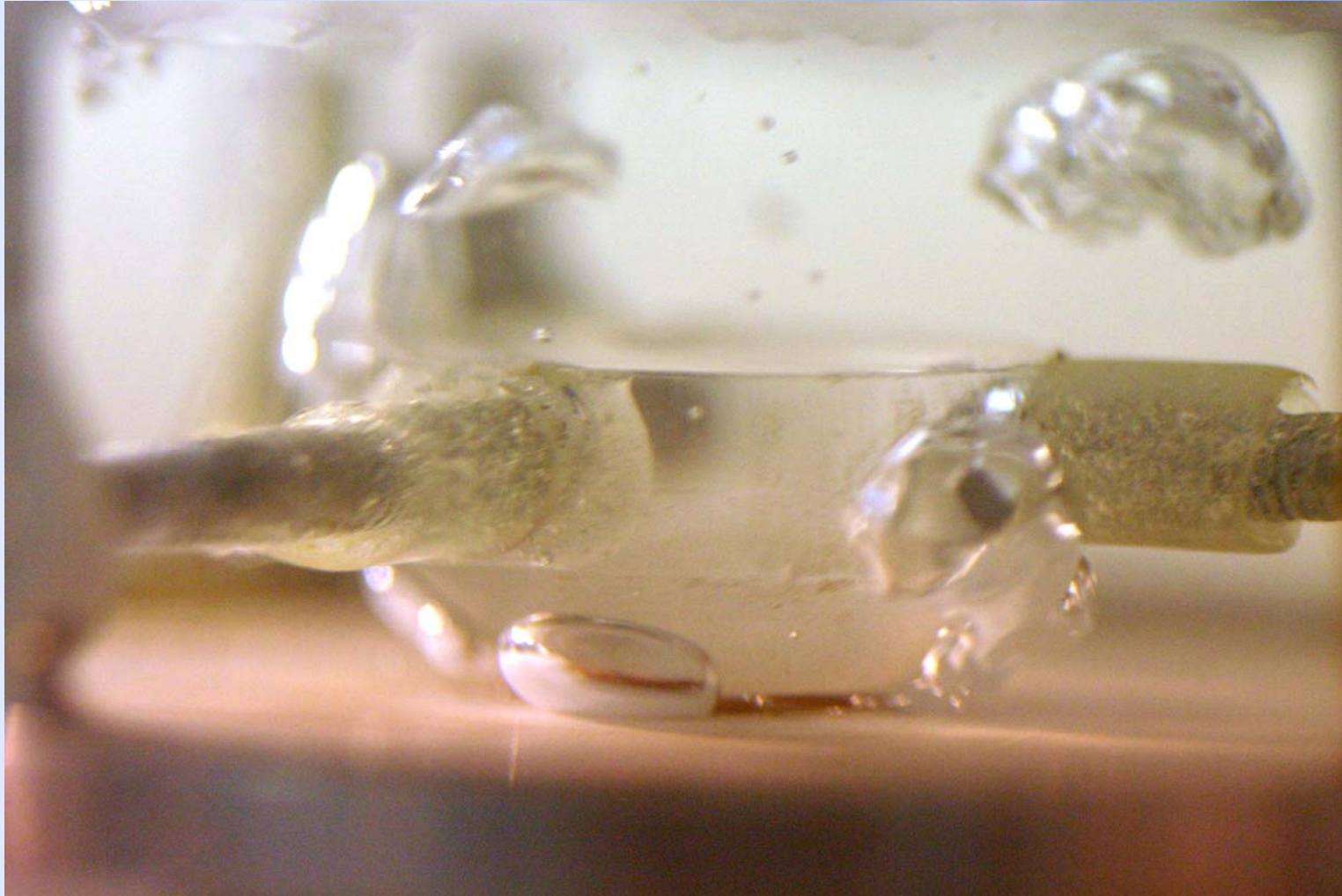
$s = 13\text{mm}$
 $T_p = 68,4^\circ\text{C}$

30kW/m^2

in, Cardoso, 2005

Ebullition confinée

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



LEPTEN-Boiling – UFSC.



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



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

Ebullition confinée

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



LEPTEN-Boiling – UFSC.



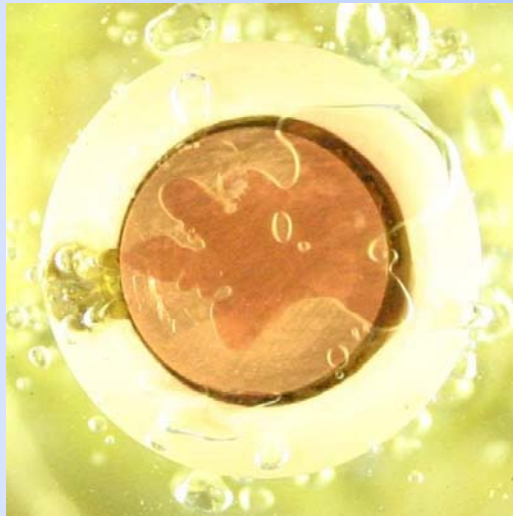
LEPTEN LABORATÓRIOS DE ENGENHARIA DE PROCESSOS
DE CONVERSÃO E TECNOLOGIA DE ENERGIA



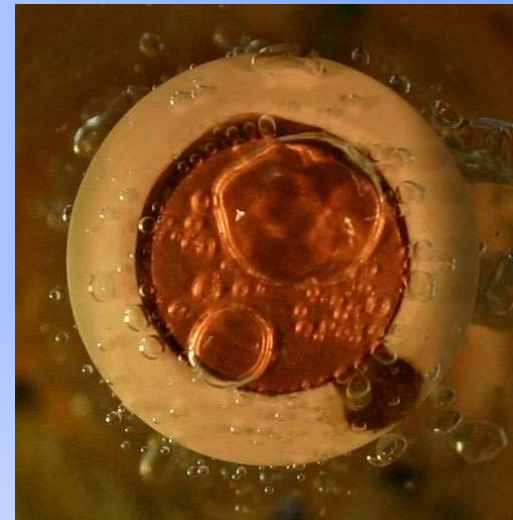
ARCUS-Journées Rhône-Alpes-Brésil:
CETHIL-INSA-LYON – 20-24 /10/2008

Effet 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

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*