

TRANSFERTS de CHALEUR

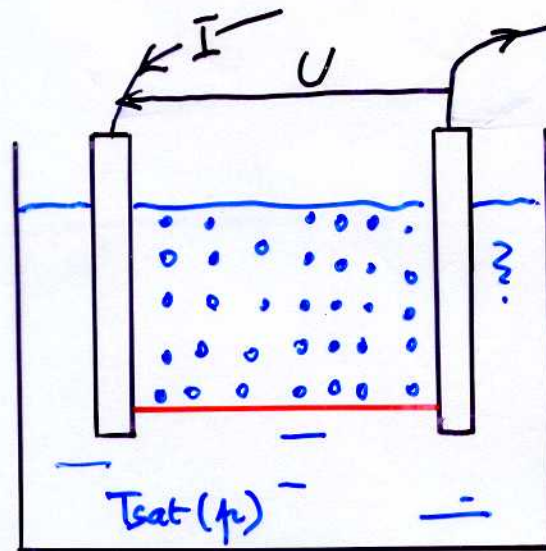
EBULLITION et CONDENSATION

- EBULLITION en VASE
- EBULLITION en CONVECTION FORCÉE
- CONDENSATION
- INSTABILITÉS de LE DINEGG

△ . Liquides purs seulement

EBULLITION EN VASE.

EXP. de NUKIYAMA



• Nukiyama 1934

eau: $T_{sat}(p_a)$

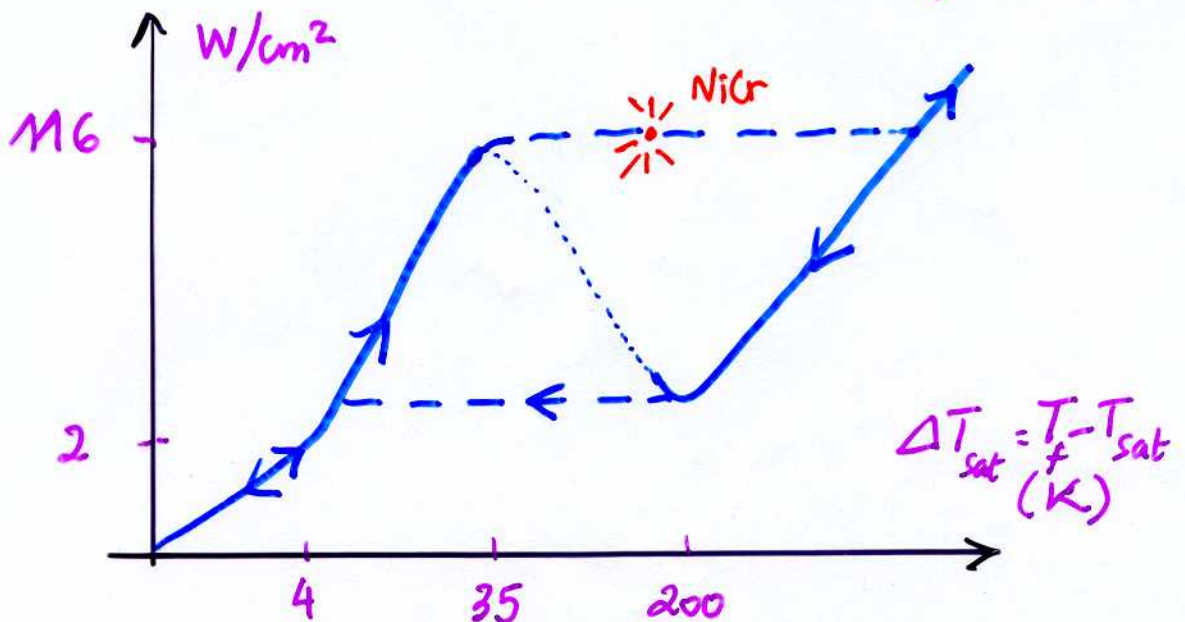
ϕ l, diam: d

long: L

• NiCr et Pt

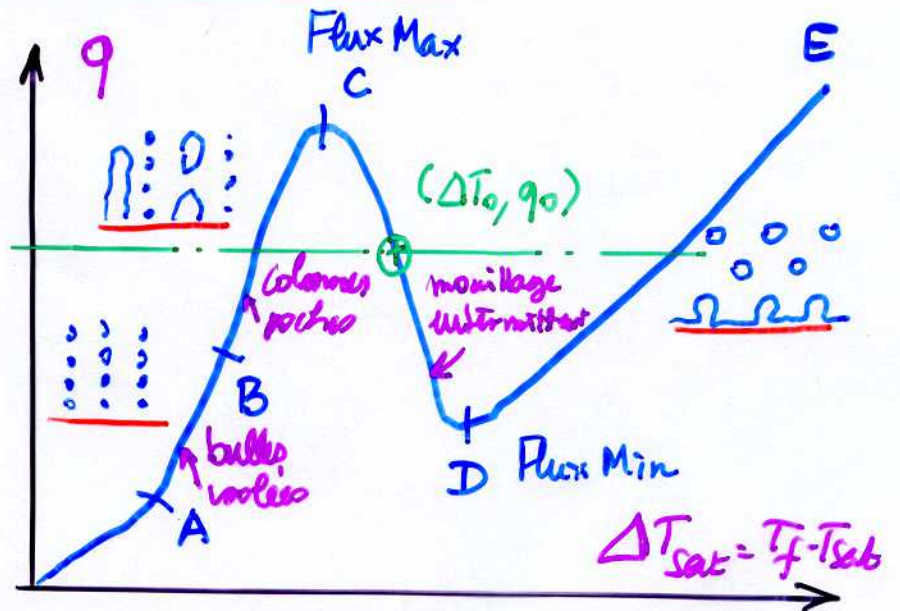
• Chauffage à flux constant - $q(P)$

$$P = UI = qndL ; R = \frac{U}{I} ; R(T_f)$$



REGIMES D'EBULLITION en VASE

- OA: conv nat 1 ϕ
- AC: Ebul. Nuclée
- CD: Ebul Transition
- DE: Ebul. film



- Branche CD : ébullition de Transition

Instable pour un chauffage à q imposé

bilan thermique

linéarisé $q_0(\Delta T_0); T_2 = T_0 + T_n$

$$M C_p \frac{dT}{dt} = P - qS$$

$$M C_p \frac{dT_n}{dt} = P - q_0 S - S \frac{\partial q}{\partial \Delta T} T_n$$

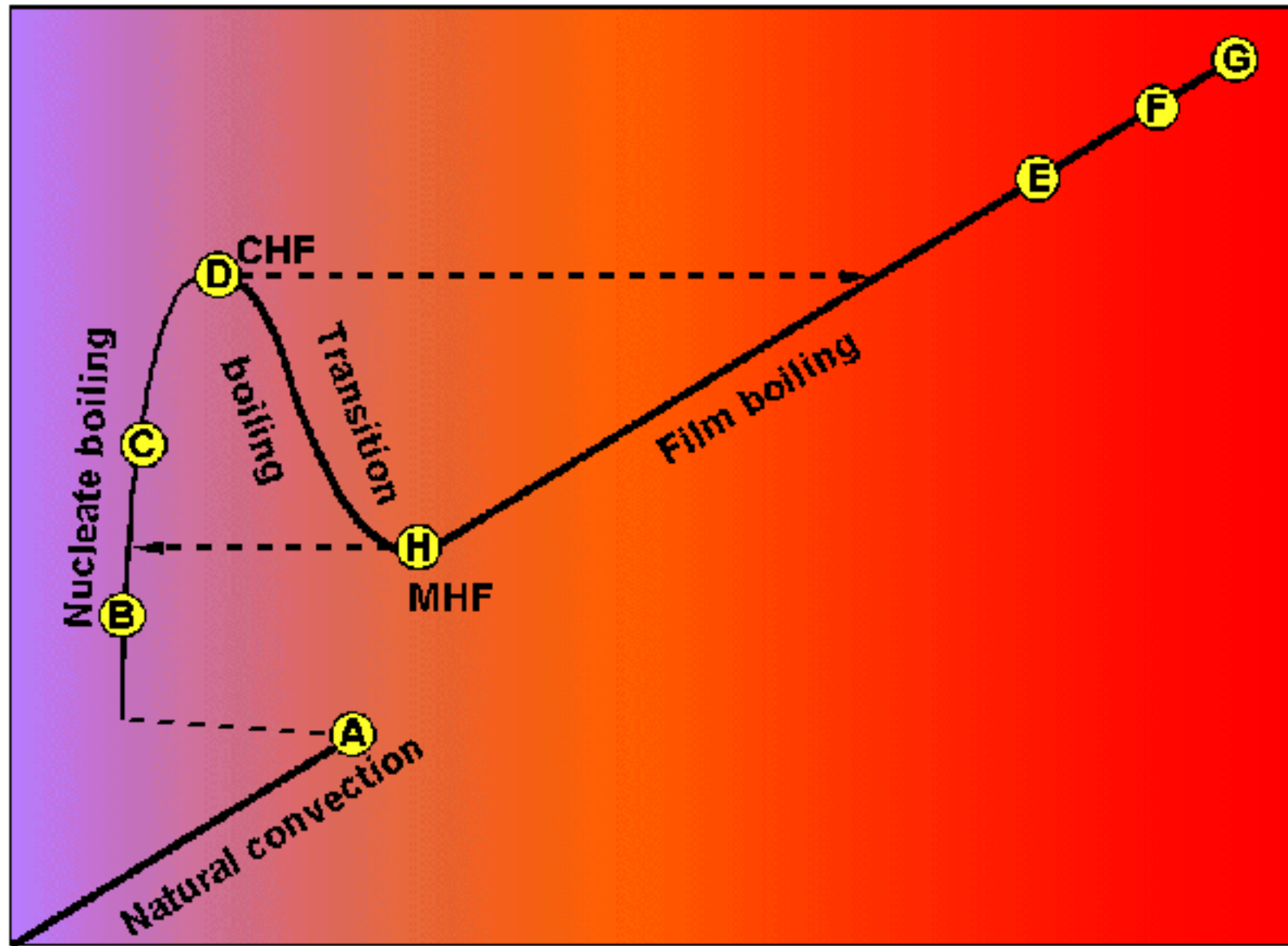
$$T_n = T_{n0} e^{-\alpha t} \quad \alpha = \frac{S \frac{\partial q}{\partial \Delta T}}{M C_p \frac{\partial T}{\partial T_0}}$$

- Stable si $\alpha > 0$:

Branche CD instable : $\left(\frac{\partial q}{\partial \Delta T} < 0 \right)$

- Expérience à T -imposée (arrosissement...)
DRENB MULLER (1937)

Heat flux



Surface superheat

CONVECTION NATURELLE

- Monophasique fil diam: D

$$Nu \triangleq \frac{hD}{k_L}$$

$$q = h(T_f - T_{sat}(p))$$

$$Pr \triangleq \frac{\gamma_L}{\alpha_L}$$

$$\uparrow k_L, \nu_L, \alpha_L$$

$$Ra \triangleq \frac{g\beta_L \Delta T_{sat} D^3}{\nu_L \alpha_L}$$

$$@ T_{film} \triangleq \frac{T_p + T_{sat}}{2}$$

Churchill & Chu (1975) $10^{-5} < Ra < 10^{12}$

$$Nu = \left\{ 0.60 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[1 + \left(\frac{0.559}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2$$

- Plaque plane Aire: A ; Perimètre P .

$$Nu = \begin{cases} 0.54 Ra^{1/4}; & 10^4 < Ra < 10^7 \\ 0.15 Ra^{1/3}; & 10^7 < Ra < 10^9 \end{cases}$$

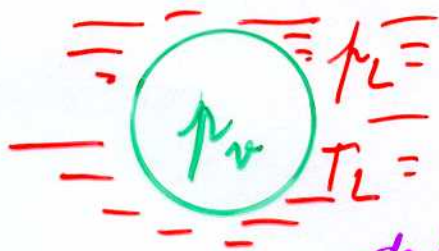
$$Nu = \frac{hL}{k_L} = \frac{qL}{k_L \Delta T_{sat}}$$

$$Ra = \frac{g\beta \Delta T L^3}{\nu_L \alpha_L}$$

$$L \triangleq \frac{A}{P}$$

APPARITION de L'EBULLITION NULLÉE

• Seuil d'apparition (stabilité)



Eq. Mécanique : $p_v = p_L + \frac{2\sigma}{R_c}$

Eq. Thermique : $T_v = T_L$

do la bulle $p_v = p_{\text{sat}}(T_v) = p_{\text{sat}}(T_L)$

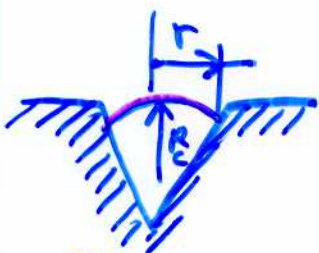
$\Rightarrow R_c = \frac{2\sigma}{p_{\text{sat}}(T_L) - p_L}$: condition d'eq.

• Bulle de Rayon R (R qeq : pas équilibre)

$$R = \frac{2\sigma}{p_v - p_L}$$

• $R > R_c \Rightarrow p_v < p_{\text{sat}}(T) \rightarrow \text{évaporation } R \uparrow$

• $R < R_c \Rightarrow p_v > p_{\text{sat}}(T) \rightarrow \text{condensation } R \downarrow$



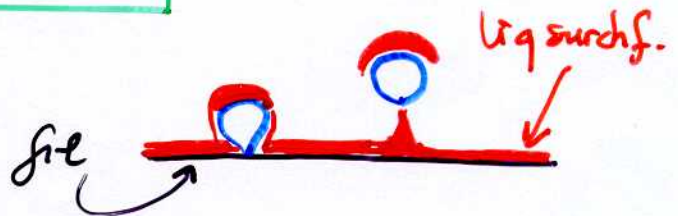
Site rayon $r \sim R_c$

• qd $T_w \uparrow, T_L \uparrow; R_c = \frac{2\sigma}{p_{\text{sat}}(T_L) - p_L} \downarrow$

le rayon des sites actifs diminue
quand $T_w \uparrow$

MECANISMES D'EBULLITION (NUCLEE)

- Transport de liq. surch.



Yagumata et al. (1955)

$$q \sim (T_w - T_{sat})^{1.2} n^{0.33} \quad (m^{-2})$$

densité surfacique
de sites de nucléation actifs

n : $n \uparrow$ qd $\Delta T = T_f - T_{sat} \uparrow$

$$n \sim \Delta T^{5/6} \Rightarrow q \propto \Delta T_{sat}^3$$

échange très efficace (précision secondaire ...)

- Corrélations de Rosenow (1952)

$\frac{conv}{cond}$: $Na_L = C Re_L^2 Pr_L^3$ diamètre de détachement (flot ~ cap.)

Echelles Vitesse : $\frac{q}{\rho_L d} \left(\frac{q}{d} \approx \dot{m}_L = \dot{m}_v \right)$ $Li: \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}}$

$$\frac{C_L (T_w - T_{sat})}{d} = C_{sf} \left[\frac{q}{\mu_L d} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_L - \rho_v)}} \right]^{0.33} \left(\frac{\mu_L C_L}{k_L} \right)^s$$

$$Ja = C_{sf} Re_L^{0.33} Pr^s$$

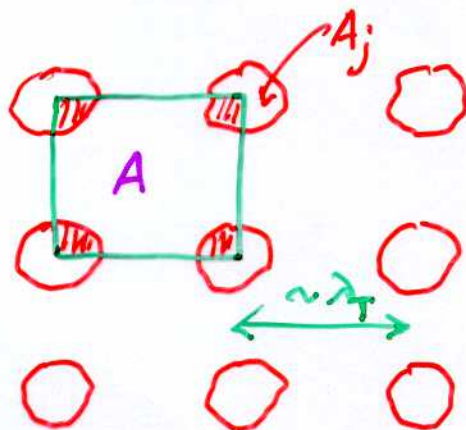
Jakob = $\frac{\text{Chaleur sensible}}{\text{Chaleur latente}}$

dépend du
liquide et surface
(~ 0.013)

$s = 1$ eau
 $s = 1.7$ autres fluides

FLUX CRITIQUE & CRISE D'EBULLITION

- Regime d'écoulement au voisinage du CHF



distance entre colonne

long d'onde la + dangereuse (R.T.I)

RT: Rayleigh-Taylor (T)

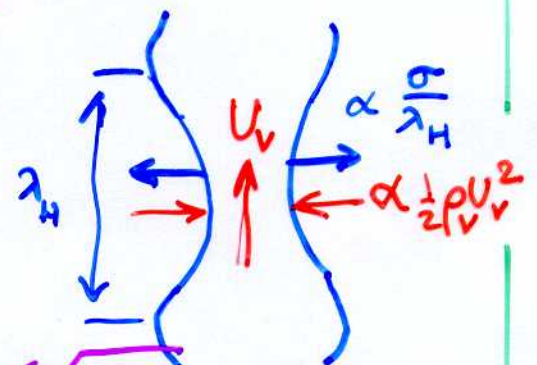
$$\lambda_T = 2\pi\sqrt{3} \sqrt{\frac{\sigma}{(\rho_l - \rho_v)g}}$$

- Stabilité de la colonne de vapeur
- Instabilité de Kelvin Helmholtz

Capillarité > Effet "Bernoulli"

- Stabilité marginale K-H

$$\frac{1}{2}\rho_v U_v^2 < \pi \frac{\sigma}{\lambda_H} \Rightarrow U_v < \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda_H \rho_v}}$$



- U_v : bilan thermique sur $\square$ le motif

$$qA = \rho_v U_v A_j \lambda \quad U_v = \frac{q}{\rho_v} \frac{A}{A_j}$$

FLUX MAXIMUM (Pool Boiling)

Stabilité de la colonne de vapeur :

$$U_v = \frac{q}{\rho_v} \frac{A}{A_j} < \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda_H \rho_v}}$$

d'où

$$q < \frac{A_j}{A} \rho_v \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda_H \rho_v}} \triangleq q_{\max.}$$

Corrélations :

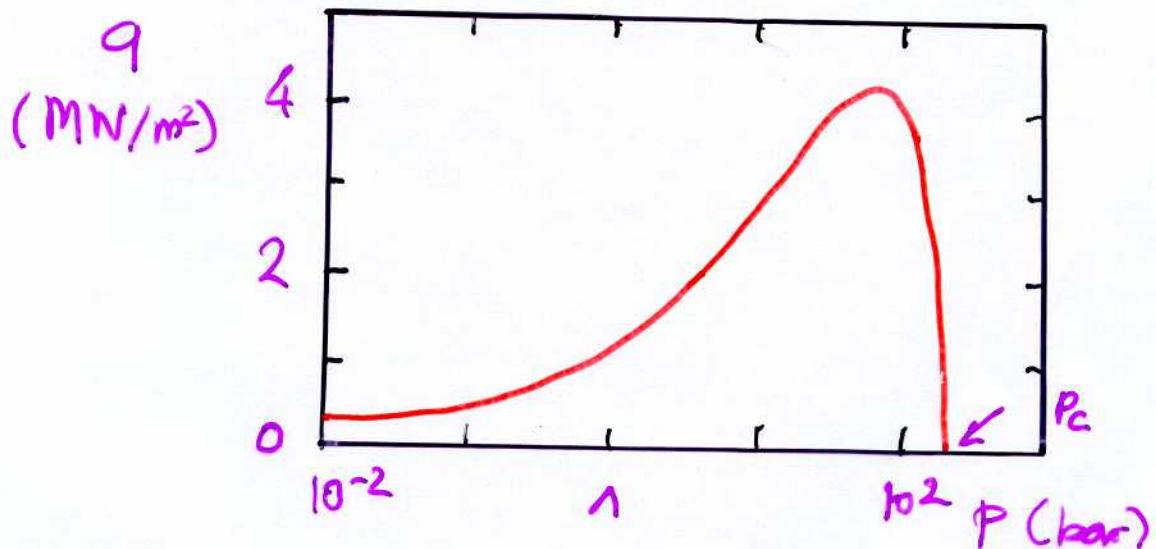
- Zuber (1958) Rayon du jet $(A_j) = \frac{1}{4} \lambda_T$
 $\lambda_H = \lambda_R = 2\pi \left(\frac{1}{4} \lambda_T\right)$
 $\uparrow \lambda$ la + gde stable pour RTI
 $q_{\max} = 0,12 \rho_v^{1/2} \lambda \sqrt[4]{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}$

- Lienhard & Dhir (1973) Rayon du jet $= \frac{1}{4} \lambda_T$
 $\lambda_H = \lambda_T$
 $q_{\max} = 0,15 \rho_v^{1/2} \lambda \sqrt[4]{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}$

- Kutateladze (1948)

analyse dimensionnelle

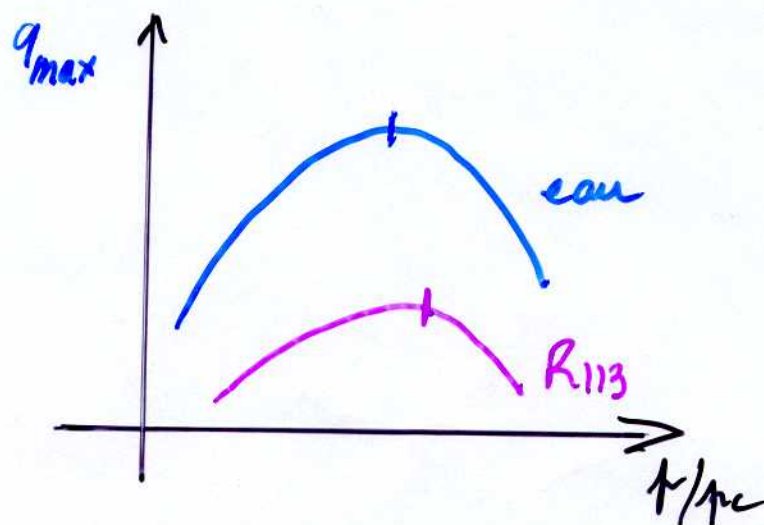
$$q_{\max} = 0,13 \rho_v^{1/2} \lambda \sqrt[4]{\sigma(\rho_l - \rho_v)g}.$$



flux critique
Plaque plane - eau

$$q_{\max} \propto p_c^{1/2} d \sqrt[4]{\sigma(p - p_c)} \quad f(p)$$

Etat correspondants $q = f(p/p_c)$



CHF maximum : Eau 400 W/cm^2 @ 70 bar

Freon 113 32 W/cm^2 @ 10 bar

EBULLITION En FILM.



- Ebullition en film sur un cylindre horizontal, Bromley (1950). eau

$$\overline{Nu}_v = 0,62 \left[\frac{\rho_v (\rho_L - \rho_v) g \mathcal{L}' D^3}{\mu_v h_v (T_w - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

$$\mathcal{L}' = \mathcal{L} \left(1 + 0,34 \frac{C_{p,v} (T_w - T_{sat})}{\mathcal{L}} \right) \quad (*)$$

Pas de roulement ; $D > 1,3 \text{ mm}$; Pression atmosphérique

Analogie / Conduction sur un cylindre horizontal, Nusselt (1916).

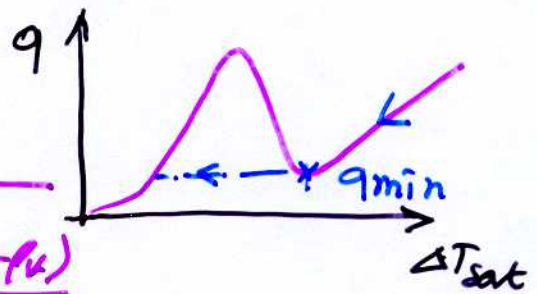
$$\overline{Nu}_L = 0,729 \left[\frac{\rho_L (\rho_L - \rho_v) g \mathcal{L}' D^3}{\mu_L h_L (T_{sat} - T_w)} \right]^{1/4}$$

$$\text{avec } \mathcal{L}' = \mathcal{L} \left(1 + 0,68 \frac{C_{p,L} (T_{sat} - T_w)}{\mathcal{L}} \right)$$

(*) Propriétés physiques : liq @ T_{sat}

$$Nu_p @ T_f = (T_{sat} + T_w) / 2.$$

• Flux Minimum



$$q_{min} = C_{pr} \sqrt[4]{\frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{(\rho_L + \rho_v)^2}}$$

Zuber (1959) $C = 0,13$ (stabilité)

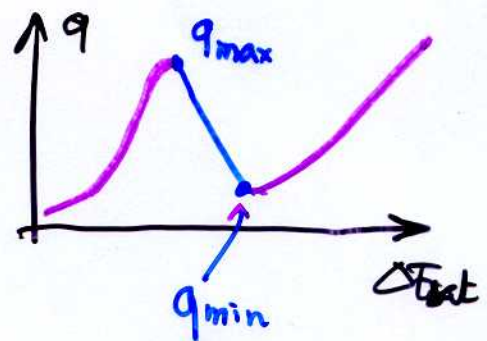
Barenson (1960) $C = 0,09$ Remouillage, Pt de Lieben frost

• Ebullition de transition ? peu de données

Méthode pragmatique :

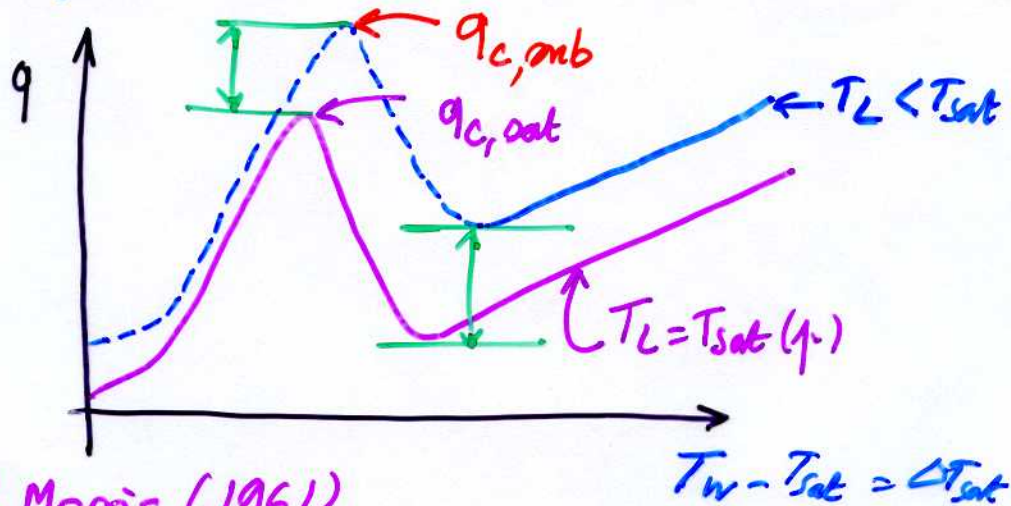
Evolution linéaire entre q_{max} et q_{min} (Echelles log/cos)

ΔT_{min} : corrélation ab. film



AUTRES EFFETS

- Sous refroidissement du liquide $T_L < T_{sat}(p)$

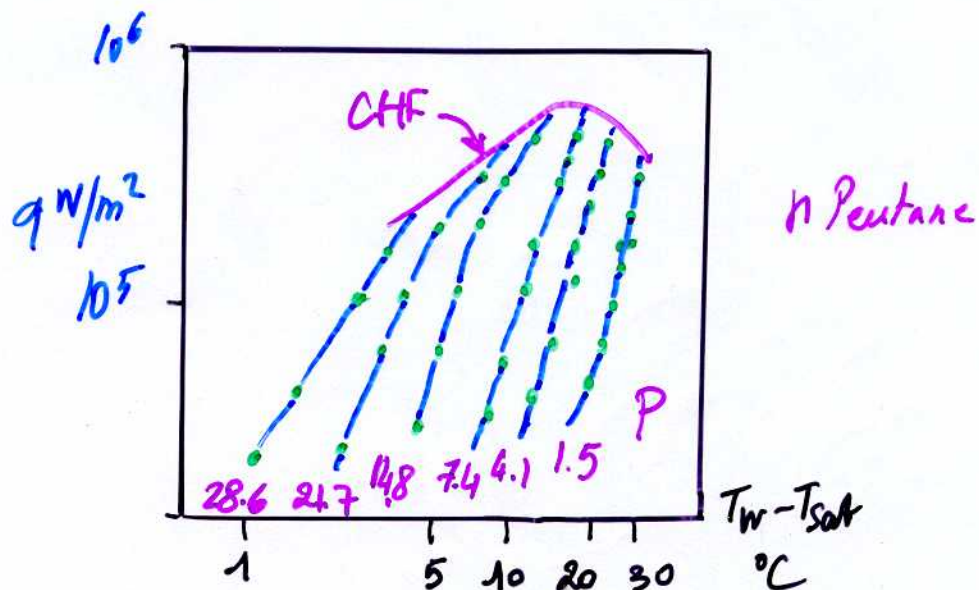


Ivey & Morris (1961)

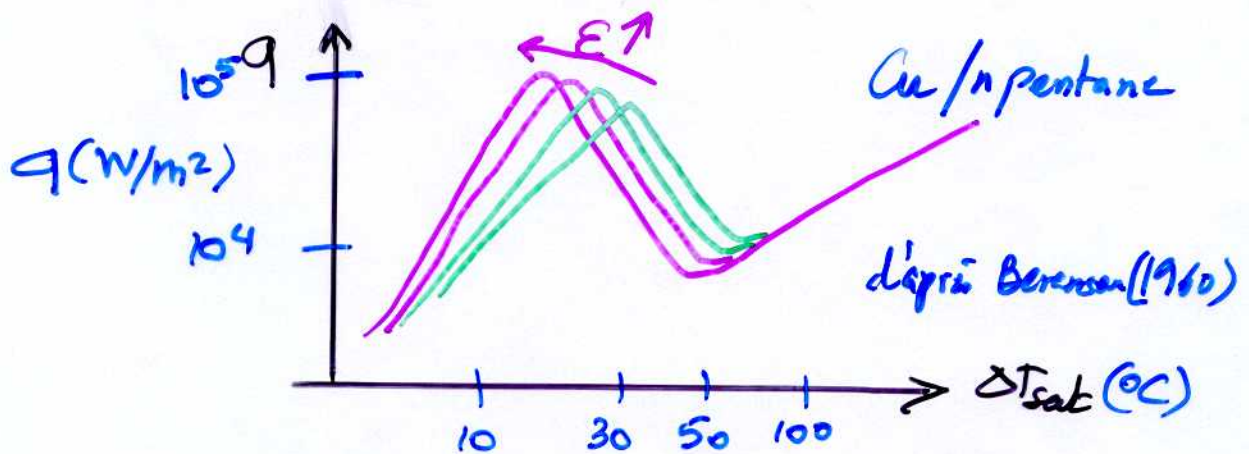
Sous refroidissement $\Delta T_{sub} \triangleq T_{sat} - T_L$

$$q_{c,sub} = q_{c,sat} \left(1 + 0.1 \left(\frac{P_c}{P_v} \right)^{3/4} \frac{Gr \Delta T_{sub}}{L} \right)$$

- Pression $q_{cat} \rightarrow P \uparrow \Rightarrow \Delta T_{sat} \downarrow (R_c \downarrow)$



AUTRES EFFETS (suite)



● Rugosité ϵ :

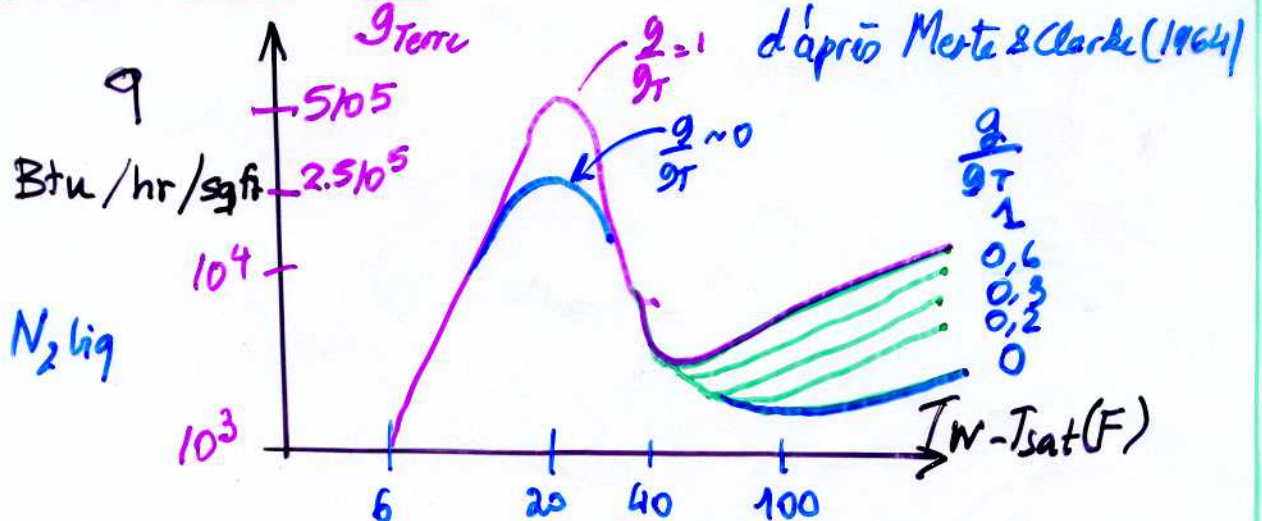
affecte l'ébullition nucléé $q \uparrow$; $\epsilon \uparrow$

effet limité sur le flux critique

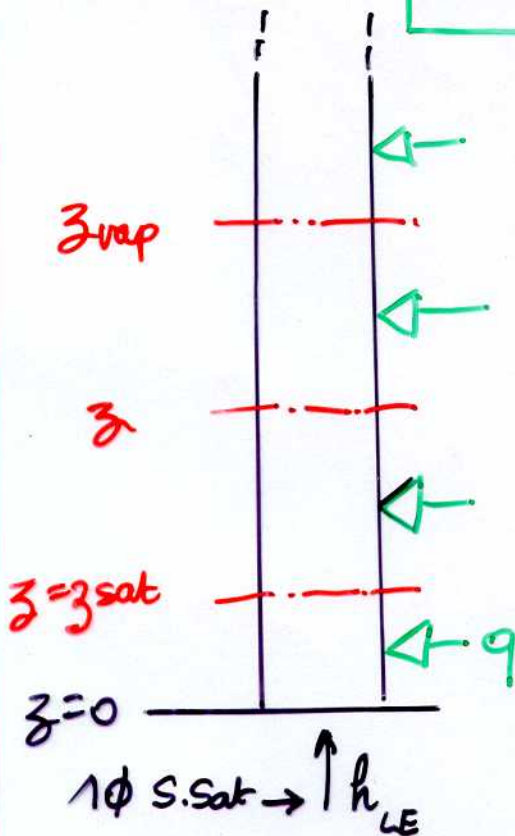
Pas d'influence sur l'ébullition en film

$\epsilon \downarrow r_{\text{car}} \downarrow \Delta T_{\text{sat}} \text{ à l'apparition bulle } \uparrow$

● Gravité Réduite $\frac{g}{g_{\text{Terre}}}$



TITRES et BILANS THERMIQUES



$$\text{Titre massique } x = \frac{M_G}{M_G + M_L}$$

$$x \sim x_{eq} \text{ titre à l'eq. th.}$$

• la vapeur apparaît à z_{sat}
où $T_L = T_{sat}(p)$

• le liquide disparaît à z_{vap}

• Entre les deux $lq + vap$ à T_{sat}

$$2\phi : z_{sat} < z < z_{vap} \quad \phi_{reDz} = M(h_i^{sat} - h_{LE}) + x_{eq} M \Delta$$

Titre thermodynamique Enthalpie fluide

Monophasique liquide $x_{eq} = -\frac{h_i^{sat} - h_i}{\Delta} < 0 \quad h = h_L$

Diphasique

$x_{eq} \Leftarrow$ Bilan Therm. $h = x_{eq} h_V^{sat} + (1 - x_{eq}) h_i^{sat}$

Monophasique Vapeur

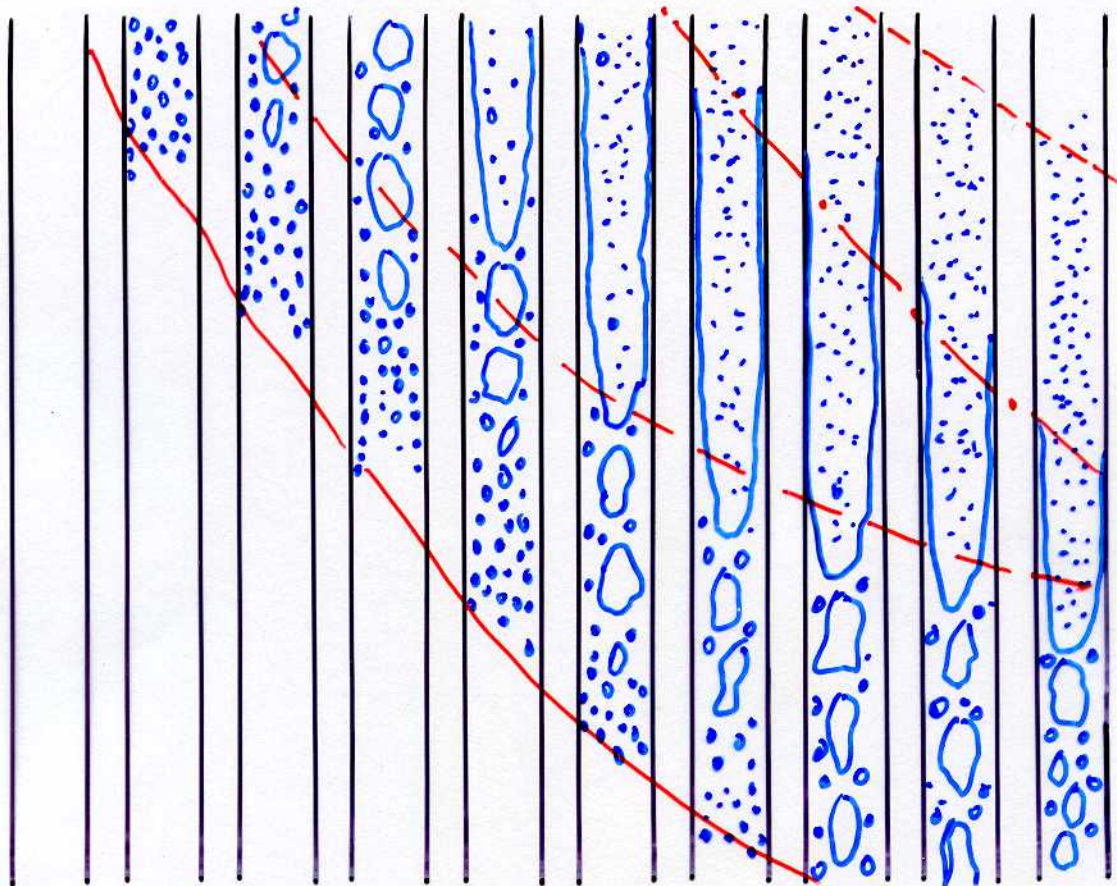
$x_{eq} = 1 + \frac{h_V - h_V^{sat}}{\Delta} > 1 \quad h = h_V$

Partout

$$x_{eq} \triangleq \frac{h - h_i^{sat}}{\Delta}$$

REGIMES D'ECOULEMENT VERTICAL ASCENDANT

- Ecoulements bouillants (Chauffage)
→ Evaporateurs, chaudières



(4) — flux de chaleur croissant —→

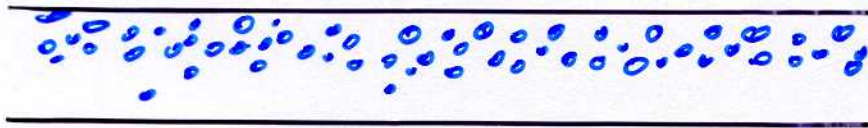
[d'après Hewitt & Hall Taylor (1970)].

- débit liquide constant

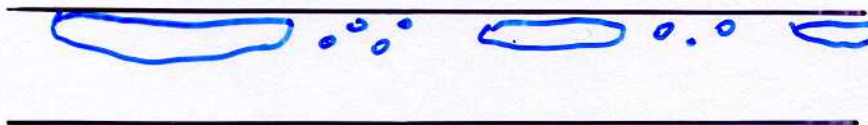
- apparition de l'ébullition nucléé
- - - fin de l'ébullition nucléé
- . - . - assèchement (du film)
- - - - vapeur surchauffée

REGIMES D'ECOULEMENT HORIZONTAL X CO-COLR.

• Configurations principales (adiabatiques)



Ec. à bulles



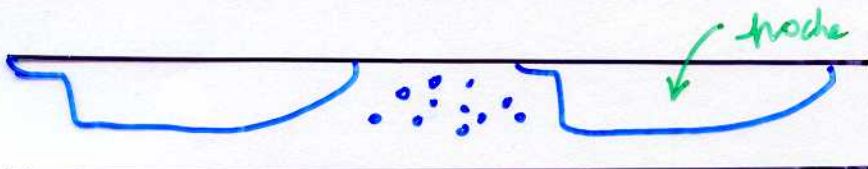
Ec. à bouchons



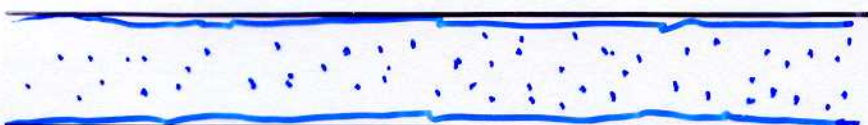
Ec. stratifié (lisse)



Ec. strat. à vagues

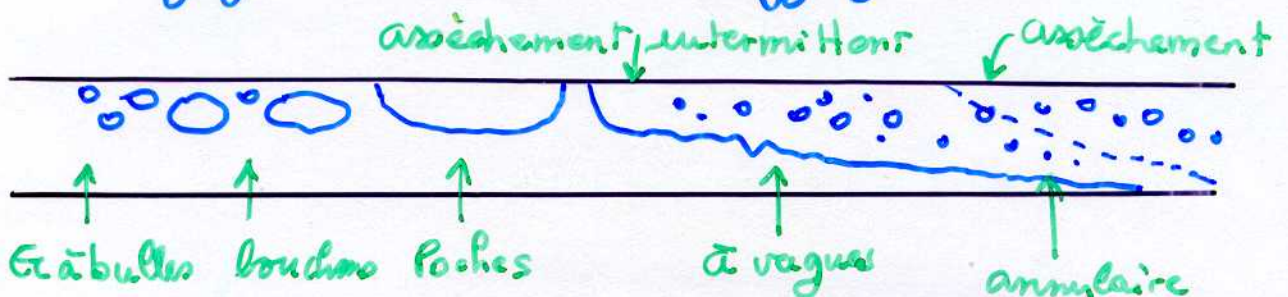


Ec. à poches



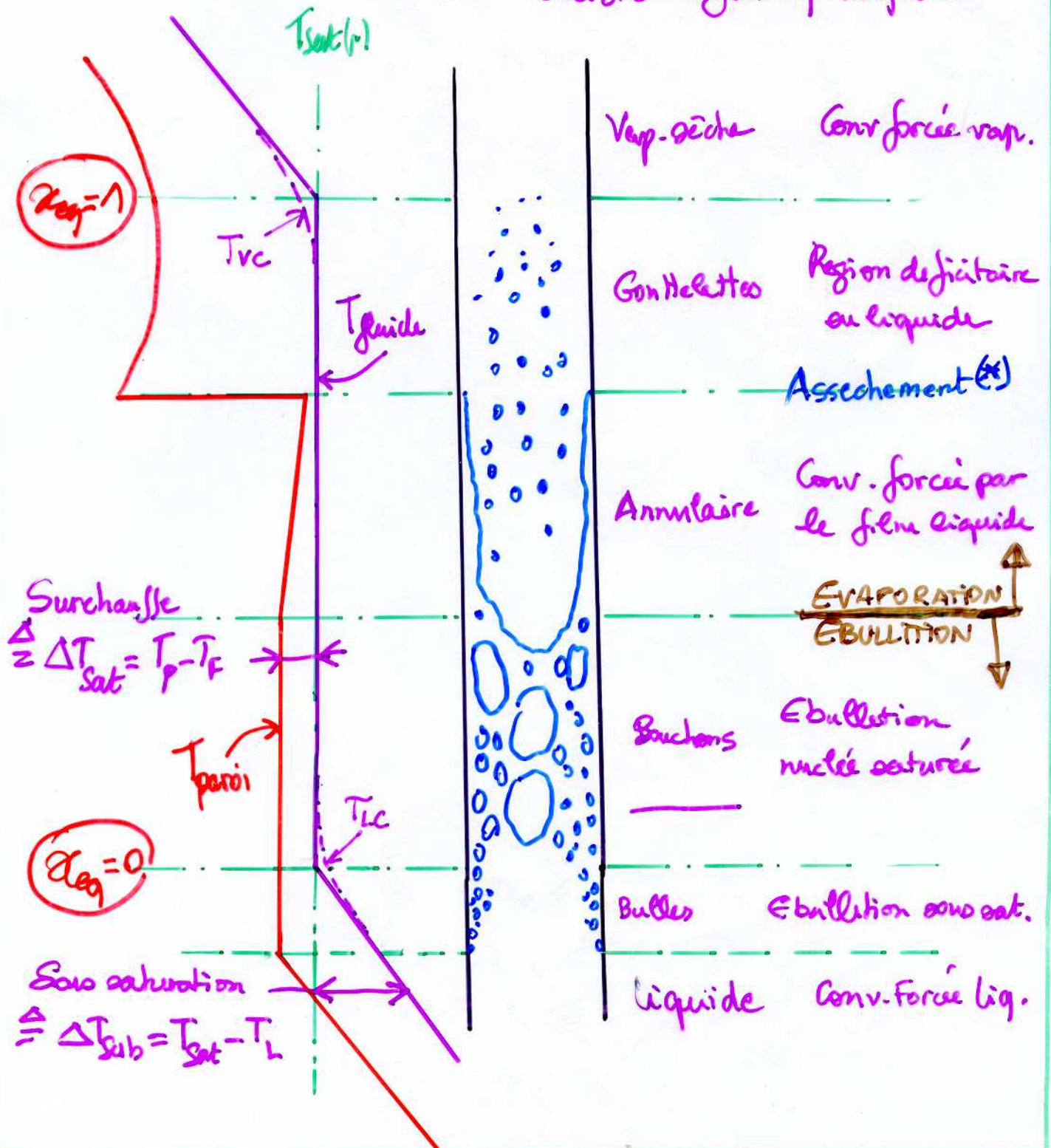
Ec. annulaire

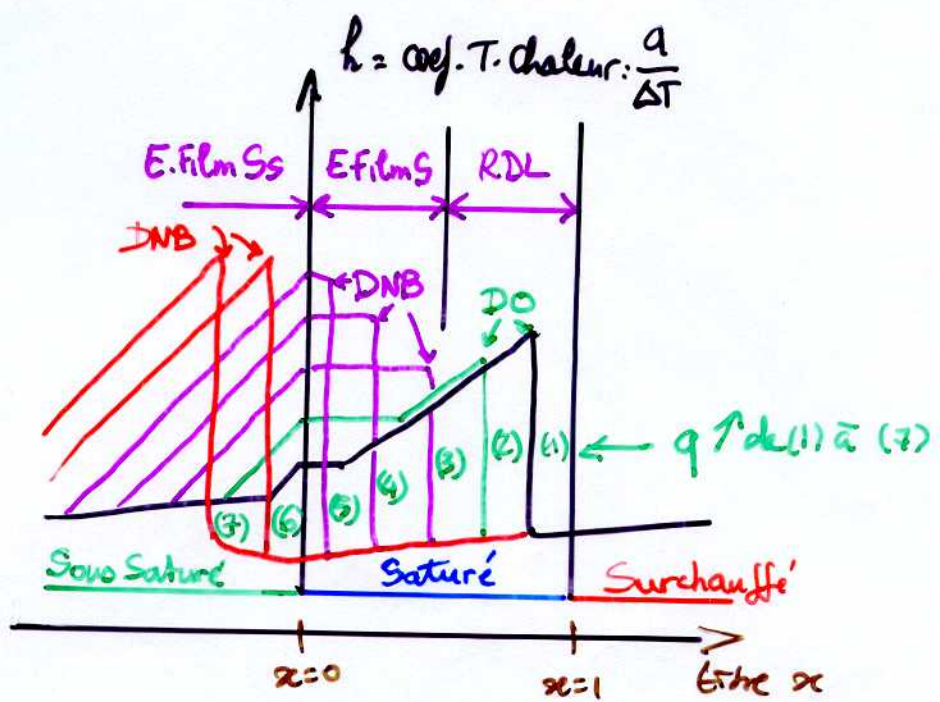
• Configurations avec chauffage

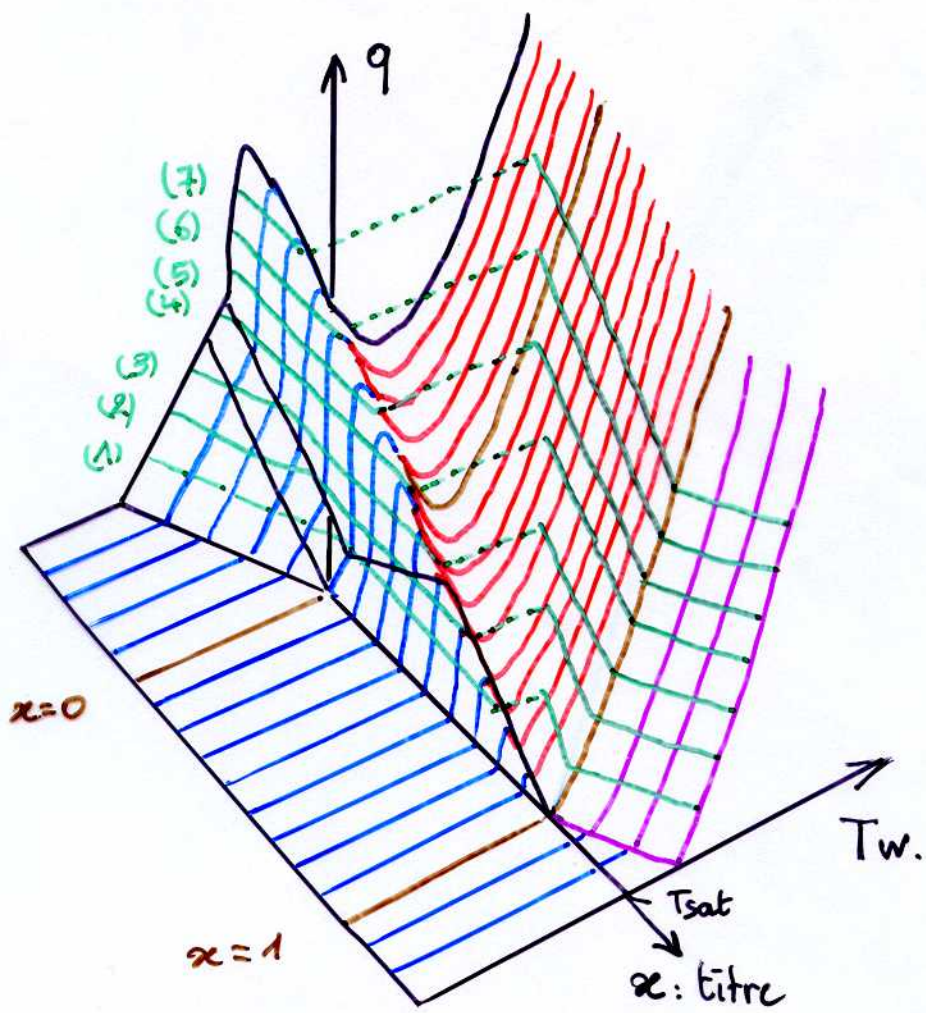


REGIMES THERMIQUES TUBE CHAUFFANT VERTICAL

Densité de flux q imposée



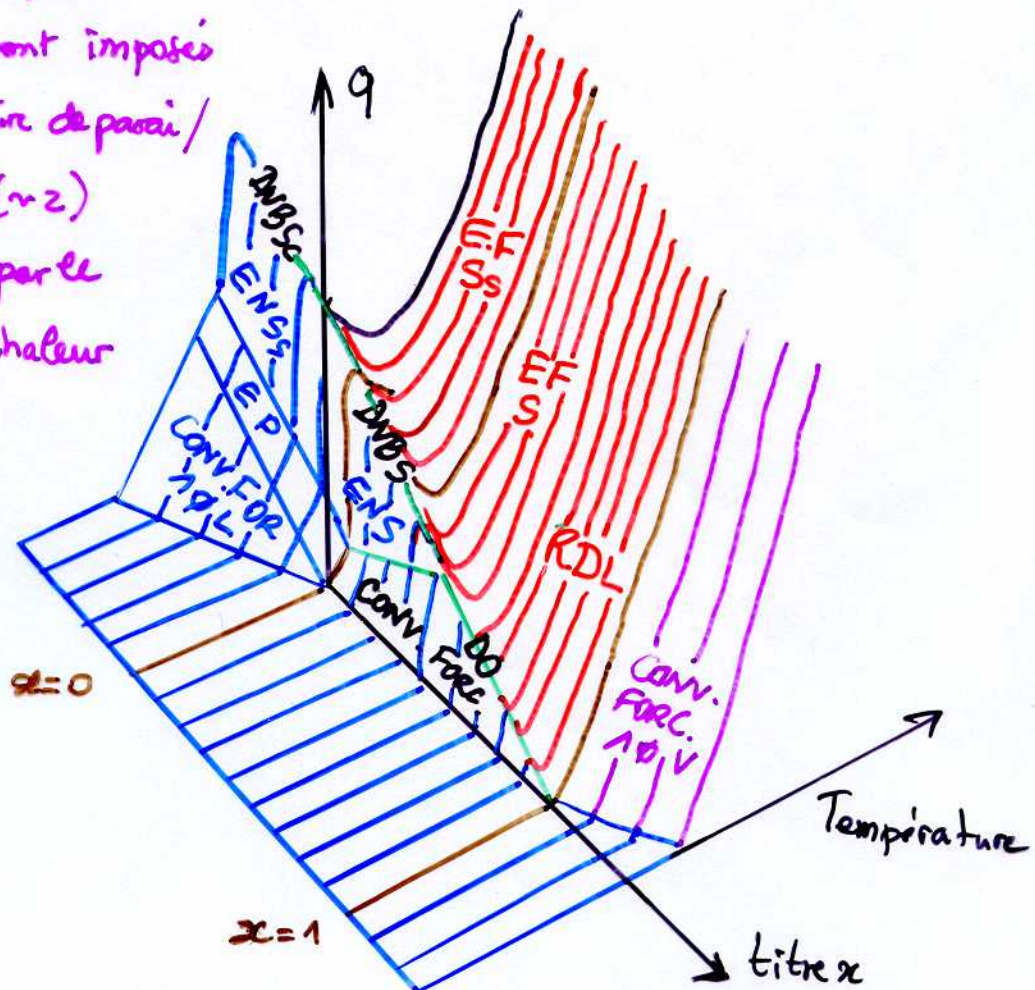




d'après Collier (1981)

RÉGIMES D'EBULLITION FLUX VARIABLE

- débit liquide et T° amont imposés
- Température de paroi / titre x (≈ 2) paramétrée par le flux de chaleur



CONV. FOR 100 L: Convection forcée en monophasique liquide / Vapeur

EP: Ebullition partielle

ENS / Ss: Ebullition Nuclée saturée / Sous-saturée

EFS / Ss: Ebullition en film saturée / Sous-saturée

RDL: Région déficitaire en liquide

CONV. FORC: Convection forcée / film liquide

DNB S/Sg: crise d'ébullition DO: Assèchement

CORRELATIONS du TRANSPORT de CHALEUR.

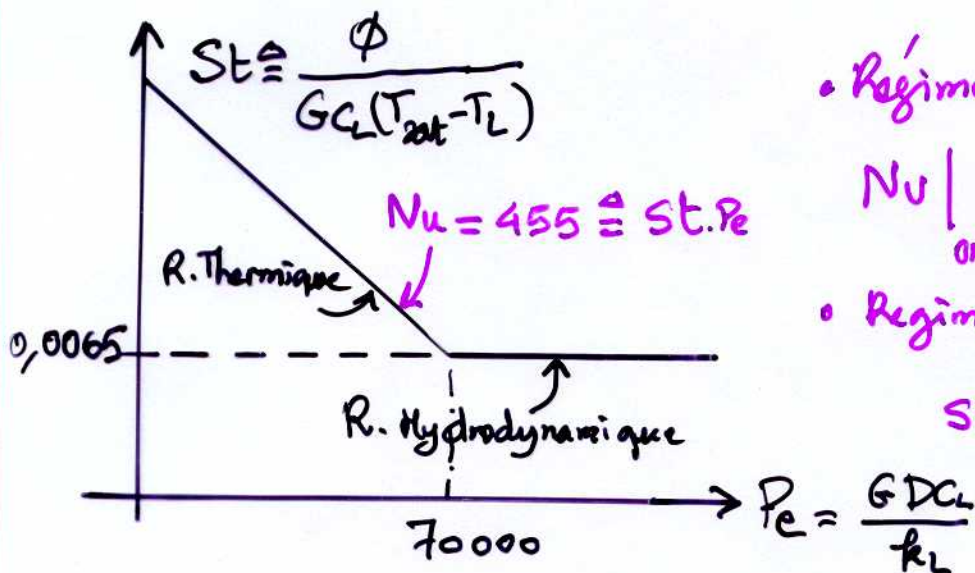
- **Monophasique** Dittus Boelter $Re > 10\,000$

$$Nu = \frac{hD}{k_L} = 0,023 \left(\frac{GD}{\mu_L} \right)^{0,8} \left(\frac{C_p \mu_L}{\lambda_L} \right)^{1/3}$$

$(Re) \uparrow$ $(Pr) \uparrow$

- **Ebullition sous-saturée** Saha & Zuber (1974)

- démarrage de l'ébullition significative $\rightarrow \Delta P_g$



- Régime thermique ($G \downarrow$)

$$Nu \Big|_{ONB} = \frac{\phi D}{k_L (T_{sat} - T_L)} \Big|_{ONB} = 455$$

- Régime Hydrodynamique ($G \uparrow$)

$$St = 0,0065$$

- Apparition et Arrêt de l'ébullition nucléé (DNB)

Frost & Drazbonic (1967)

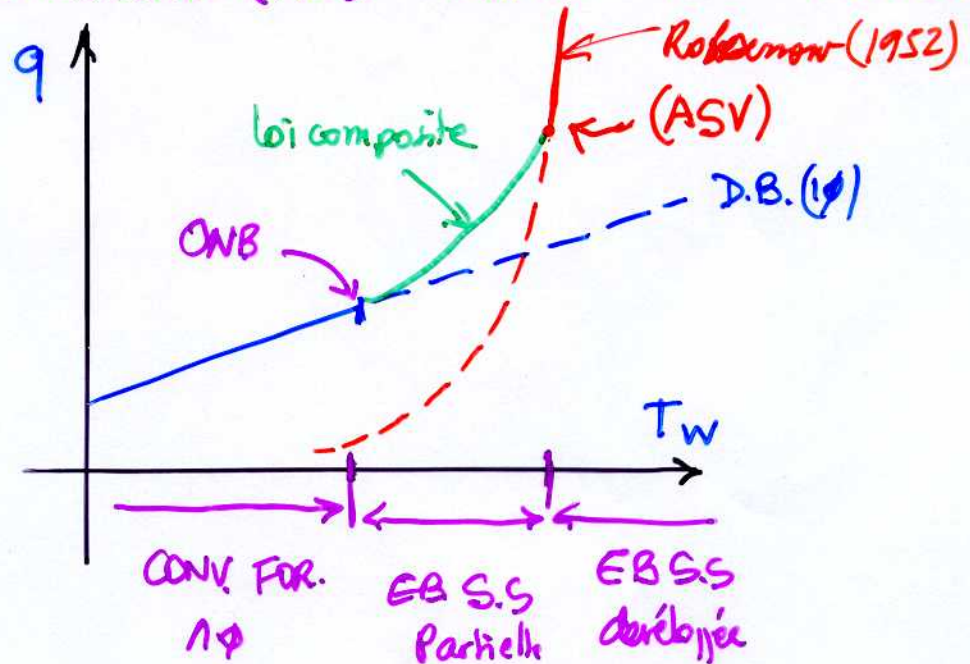
surchauffe: $(T_w - T_{sat}) = \left(\frac{80 q T_{sat}}{k_L Pr \lambda} \right)^{0,5} Pe$

✓ fluide

EBULLITION (Suite)

• Ebullition sous-saturée partielle

- Ebullition (qqc nées) et conv. forcé 1 ϕ Rohsenow (1952)
- ou - Bergles & Rohsenow (1964) : raccord 1 ϕ -Eb. ss dével.



• Ebullition sous saturée développée

Mécanisme identique à l'ébullition nucléée en vase

Rohsenow (1952) $Ja = C_{sf} Re_L^{0,33} Pr^s \quad C_{sf} \sim 0,015$

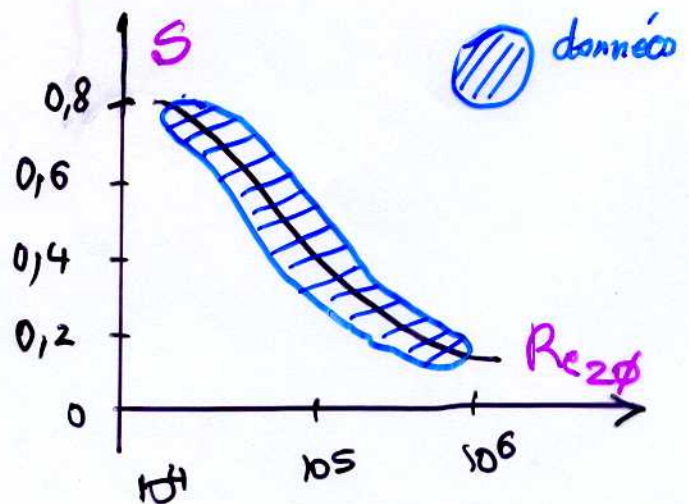
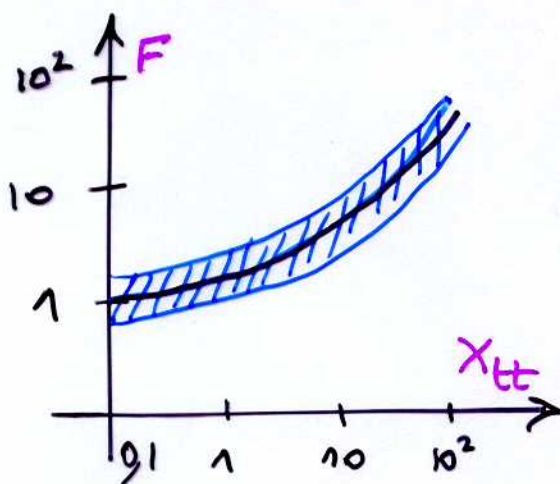
EBULLITION SATURÉE

• Ebullition saturée (Franche) Chen (1966).

Pondération de deux mécanismes.

1 - Ebullition nucléée Forster & Zuber (1955)
pondérée par un facteur de suppression S

2 - Convection forcée Dittus & Butler (1930)
pondérée par un facteur d'amplification F



X_{tt} paramètre de Martinelli $X_{tt} = \left(\frac{1-x_{eq}}{x_{eq}} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_v}{\rho_L} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_L}{\mu_v} \right)^{0.1}$

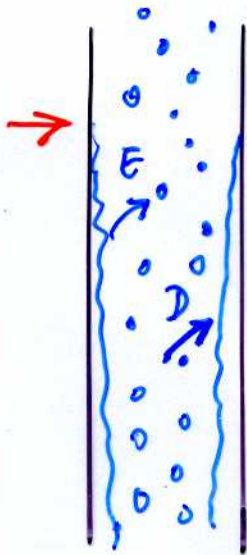
$$F = \begin{cases} 1 & \text{si } 1/X_{tt} \leq 0.1 \\ 2.35 (1/X_{tt} + 0.213)^{0.735} & \text{sinon} \end{cases} \quad R_{2\phi} = \frac{DG(1-x_{eq})}{\mu_L} F^{1.25}$$

$$1/S = 1 + 2.53 \cdot 10^{-6} Re_{2\phi}^{1.17} \quad ; \quad \Delta P_{sat} = \frac{2(T_P - T_{sat})}{T_{sat} (1/\rho_v - 1/\rho_L)} [C.G.]$$

$$h = 0.0022 \frac{k_L^{0.73} C_{PL}^{0.45} \rho_L^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_L^{0.29} \alpha^{0.24} \rho_v^{0.24}} (T_P - T_{sat})^{0.24} S + 0.023 \left[\frac{DG(1-x_{eq})}{\mu_L} \right]^{0.8} \left(\frac{\rho_L \mu_L}{k_L} \right)^{0.4} \frac{k_L}{D} F$$

CRISE D'ÉBULLITION ET ASSECHÈMENT

- Modèles (HARWELL A.F. Model) Assèchement (Dryout)



Bilan de Masse du film liquide

$$M_L = \alpha M = M_{LF} + M_{LE}$$

$$\frac{dM_{LF}}{dz} = \mathcal{P} \left(D - E - \frac{q}{\mathcal{L}} \right)$$

D : taux de déposition (modèle)

E : taux d'entraînement (modèle)

$\mathcal{P}$ périmètre mouillé D/E débit masse / unité d'aire pariétale

- CORRELATION CALEFACTION et ASSECHÈMENT

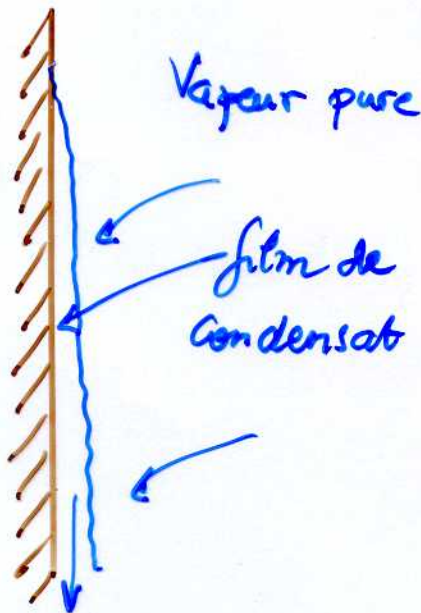
— pas de modèle général pas de mécanisme simple
très sensible à la géométrie (grilles de mélange)

⇒ approche empirique incontournable. ⚠

- Tables Groeneveld, Académie des Sciences URSS
 - tube 8 mm — flux uniforme. —
- Corrélations (Poly p.400)

— Spécifiques et précises (eau PWR) Bowring (1972)
— Sans dimension multifuide (Cryo, métaux liq...)
Katto et Ohne (1984)

CONDENSATION de VAPEURS PURES

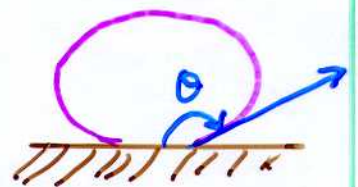


- Condensation de vapeur pure

film liquide, écoulement

gouttelettes, surface hydrophobe (θ grand)

- propreté nécessaire
- meilleur échange.



- ⚠ • Mélanges / incondensable

non symétrie condensation évaporation

Couche limite de diffusion : accumulation
incondensables ~ paroi froide

CONDENSATION EN FILM.

• Coefficients d'échange

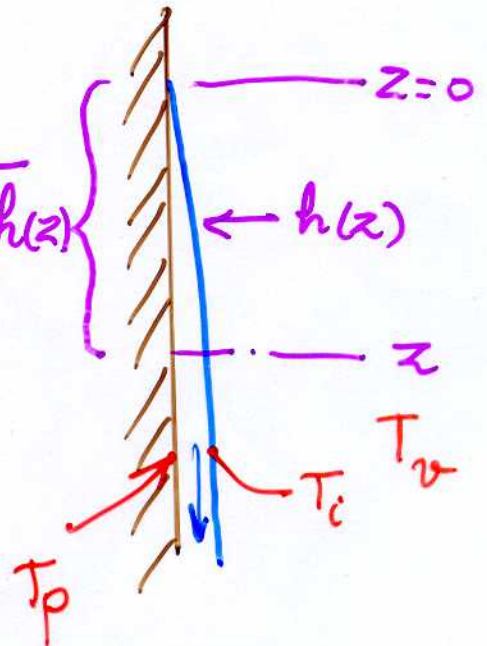
$$T_{\text{interface}} = T_{\text{sat}} \quad (\text{eq. Thermo}) \quad \bar{h}(z)$$

local :

$$h(z) \triangleq \frac{q}{T_i - T_p} = \frac{q}{T_{\text{sat}} - T_p}$$

global :

$$\bar{h}(z) \triangleq \frac{1}{z} \int_0^z h(z) dz$$



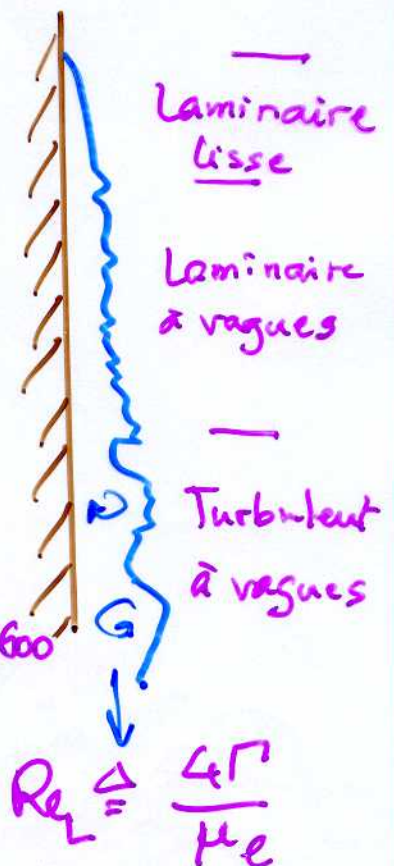
• Mécanismes physiques

Résistance prépondérante : film
épaisseur et structure du film

⇒ Régimes Thermiques

- Laminaire lisse $Re_L < 30$
- Laminaire à vagues $30 < Re_L < 1600$
- Turbulent $Re_L > 1600$

$$\Gamma \triangleq M_L / D$$



CONDENSATION EN FILM (Suite)

- Condensation film laminaire $Re < 30$

Nusselt (1916) Rohsenow (1956)

$$h(z) = \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g [2 + 0.68 Gr_L (T_{sat} - T_L)]}{4 \mu_L (T_{sat} - T_p) z} \right]^{1/4}$$

si $(T_p = \text{cte}) : \bar{h}(z) = \frac{4}{3} h(z) \quad (h \propto z^{-1/4} !)$

- Débit de condensat :

Bilan thermique à l'interface

$$\Gamma(z) = \frac{\bar{h}(z) (T_{sat} - T_p) z}{L}$$

- Propriétés physiques t^o de film

$$\alpha = h_V^{sat} - h_L^{sat} \quad (@ T_{sat})$$

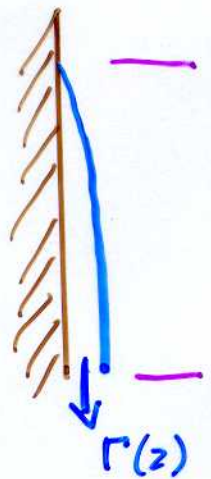
$$\rho_L, h_L \quad @ \quad \frac{1}{2} (T_p + T_{sat})$$

$$\mu_L \quad @ \quad \frac{1}{4} (3 \mu_L(T_p) + \mu_L(T_{sat}))$$

- Vapeur surchauffée $T_V > T_{sat}$ Bu Herwig (1977)

$$\bar{h}_s(z) = \bar{h}(T_V = T_{sat}) \left(1 + \frac{C_{pr} (T_V - T_{sat})}{\alpha} \right)^{1/4}$$

$$\Gamma(z) = \frac{\bar{h}_s (T_p - T_{sat}) z}{\alpha + C_{pr} (T_V - T_{sat})}$$



CONDENSATION EN FILM (suite).

- Film laminaire relation $\bar{h}$ / débit

$$\frac{\bar{h}(z)}{k_L} \left[\frac{\mu_L^2}{\rho_L(\rho_L - \rho_V)g} \right]^{1/3} = 1,47 Re_L^{-1/3}$$

- Film laminaire à vagues $30 < Re_L < 1600$

Kutateladze (1963) $h_{(z)} \propto Re_L^{-0,22}$

Zones LL+LV : $\frac{\bar{h}(z)}{k_L} \left[\frac{\mu_L^2}{\rho_L(\rho_L - \rho_V)g} \right]^{1/3} = \frac{Re_L}{1,08 Re_L^{1,22} - 5,2}$

- Film Turbulent V_V faible $T_V = T_{sat}$

Labuntsov (1957) $h(z) \propto Re_L^{0,25} Pr_L^{0,5}$

Zones LL+LV +TV : $\frac{\bar{h}(z)}{k_L} \left[\frac{\mu_L^2}{\rho_L(\rho_L - \rho_V)g} \right]^{1/3} = \frac{Re_L}{8750 + 58 Pr_L^{0,5} (Re_L^{0,75} - 253)}$

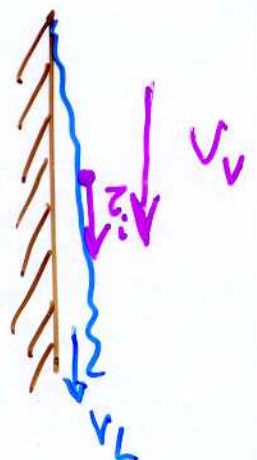
- Effet du frottement interfacial

$V_V \uparrow$ ép. film $\downarrow$ $R_{th} \downarrow \Rightarrow h \uparrow$

$h_i \propto z_i^{1/2}$

- Régime mixte Effet f.i et $g \approx$

$$h^2 = h_1^2 + h_2^2$$

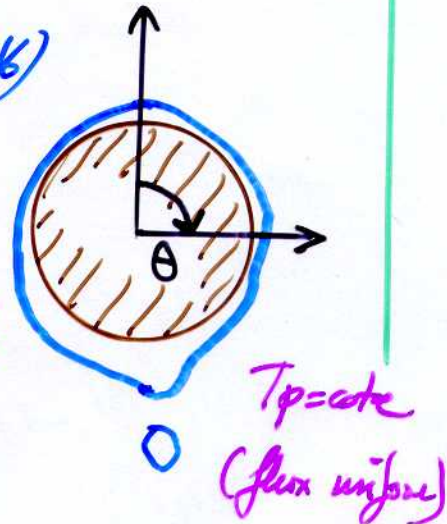


CONDENSATION EN FILM SUR UN TUBE

- Vitesse de vapeur faible Nusselt (1916)

$$\bar{h} = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi h(\theta) d\theta$$

$$\bar{h} = \frac{0,728}{(0,70)} \left[\frac{k_L^3 \rho_L (\rho_L - \rho_V) g \Delta T}{\mu_L (T_{sat} - T_p) D} \right]^{1/4}$$



Relation débit - échange (Bilan thermique)

$$\frac{\bar{h}}{k_L} \left[\frac{\mu_L^2}{\rho_L (\rho_L - \rho_V) g} \right]^{1/3} = 1,51 Re_L^{-1/3} \quad Re_L \equiv \frac{4\dot{m}}{\mu_L} \quad (1,47)$$

- Effets surchauffe et p. phy $\rightarrow$ plaque plane
- Effets de la vitesse vapeur (Fujii)

$$\frac{\bar{h}}{h_0} = 1,4 \left[\frac{U_v^2 (T_{sat} - T_p) k_L}{g \Delta T \mu_L} \right]^{0,05} \quad 1 < \frac{\bar{h}}{h_0} < 1,7$$

- Effet de nombre (ruissellement) Kern (1958)

Jaillieau horizontal : $\begin{cases} \bar{h}_{vertical} \propto z^{-1/4} \\ \bar{h}_{horizontal} = O(1) \end{cases}$

$$\frac{\bar{h}(n\Delta N)}{\bar{h}_n} = N^{-1/6}$$

CONDENSATION
en GOUTTES.

- Mécanisme

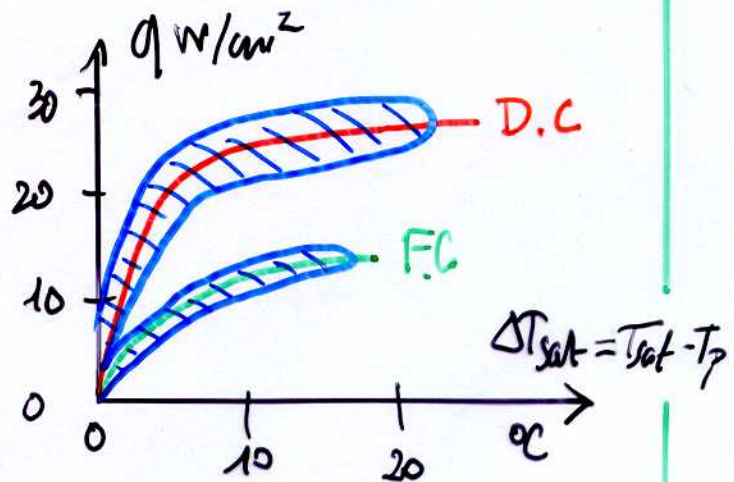
Nucleation (sites)

Choix an 2.

coalition

ruisselement Asichement

(paroi non enovillante)



- Technologie

Additifs, métaux nobles, résines ($99.5 \times 10^{-3} \text{ hr}$)
(PTFE)

- Calcul du coefficient d'échange

$$\frac{1}{h} = \frac{1}{h_G} + \frac{1}{h_{go}} + \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_{pr}}$$

↑
inwenden!

$$\Delta: \alpha_v = 0,02$$

↑ promoteur h/s

Chyt de ϕ interface

gentler.

$$T_{sat} > 22^\circ\text{C}$$

ex: Vap. d'eau / Air

$$h_{fo} = \min(5 + 0,2 T_{sat}; 25) \quad \text{W/cm}^2/\text{K}$$

OC

INSTABILITÉS STATIQUES

• Stabilité asymptotique

Régime permanent initial

Perturbation $\uparrow$ et $\downarrow$

Régime permanent final

SABLE ∞

Régime final $\rightarrow$ R.P. initial



• Instabilité Statique.

Perturbation infinitésimale



R.P. in $\neq$ R.P. final : STATIQUE
analyse : éqs R. Permanent

$\nexists$ R. Permanent : DYNAMIQUE
analyse : éqs instationnaires

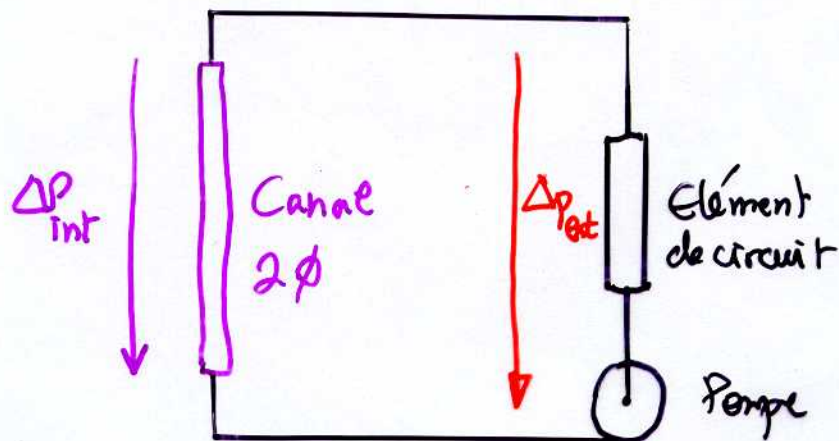
• Exemples.

Instabilité de ledinegg (Canal chauffant)

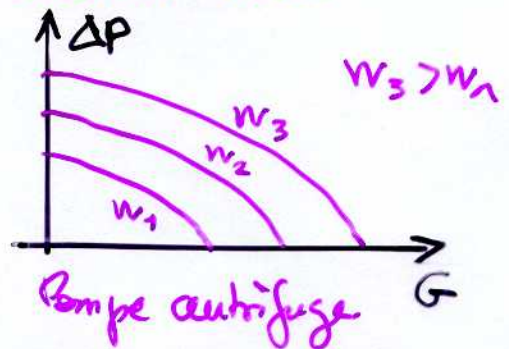
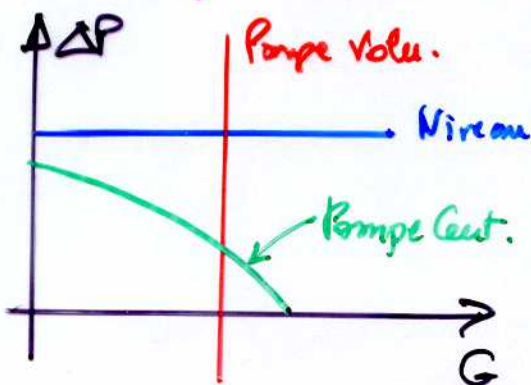
Instabilité de type d'écoulement.

REDISTRIBUTION de débit.

Caractéristiques Hydrauliques

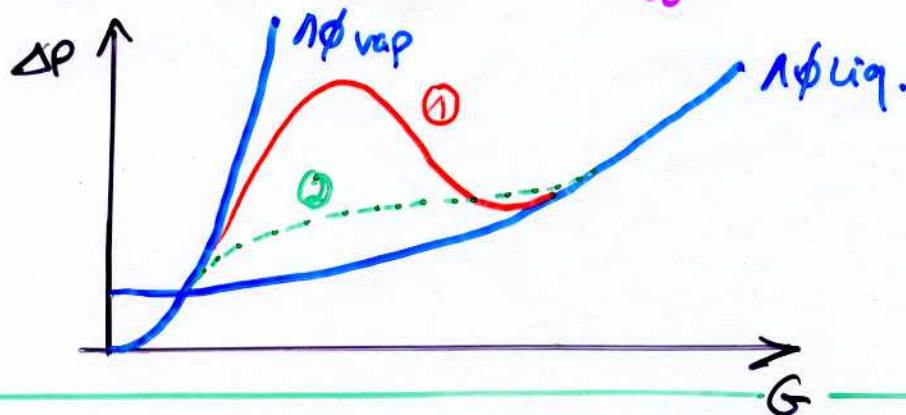


- Caractéristique externe : Pompe centrifuge / volumétrique
Niveau constant etc..



- Caractéristique interne canal chauffant

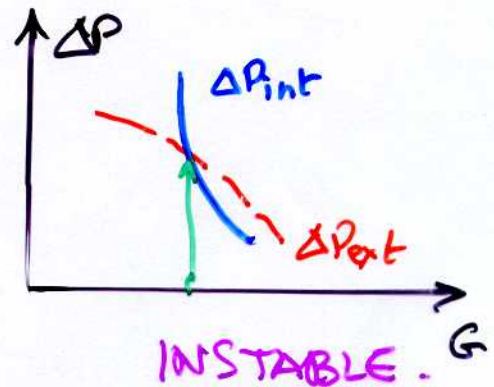
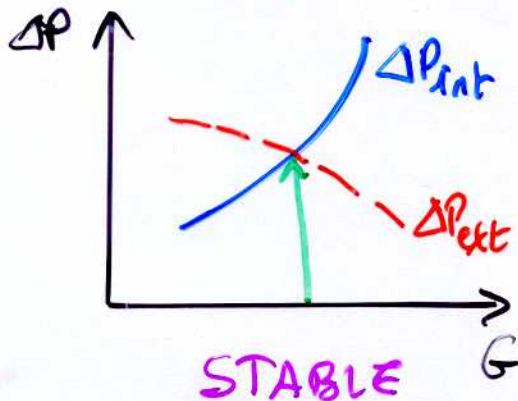
$$\Delta P = \Delta P_{acc} + \Delta P_{frott} + \Delta P_{grav}$$



REDISTRIBUTION de DÉBIT (suite)

• Critère de Stabilité de LEDINEGG (1938)

caractéristique externe $\frac{\partial \Delta P_{ext}}{\partial G} < 0$



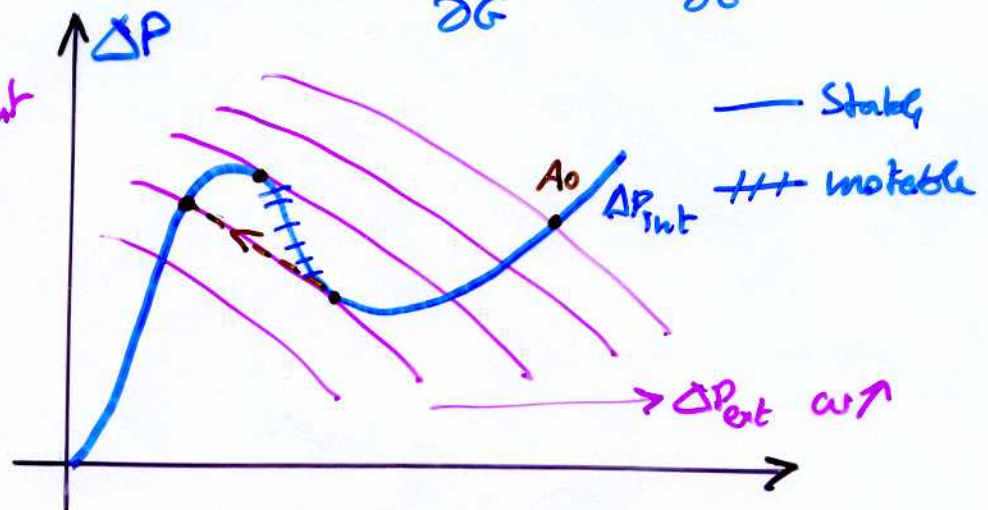
si $G \uparrow \Delta P_{int} \uparrow \Rightarrow G \downarrow$

si $G \uparrow \Delta P_{int} \downarrow \Rightarrow G \uparrow$

(on rencontre caractéristique C/Ω moteurs asynchrones)

Stabilité : $\frac{\partial \Delta P_{int}}{\partial G} > \frac{\partial \Delta P_{ext}}{\partial G}$

Canal chauffant
à flux imposé

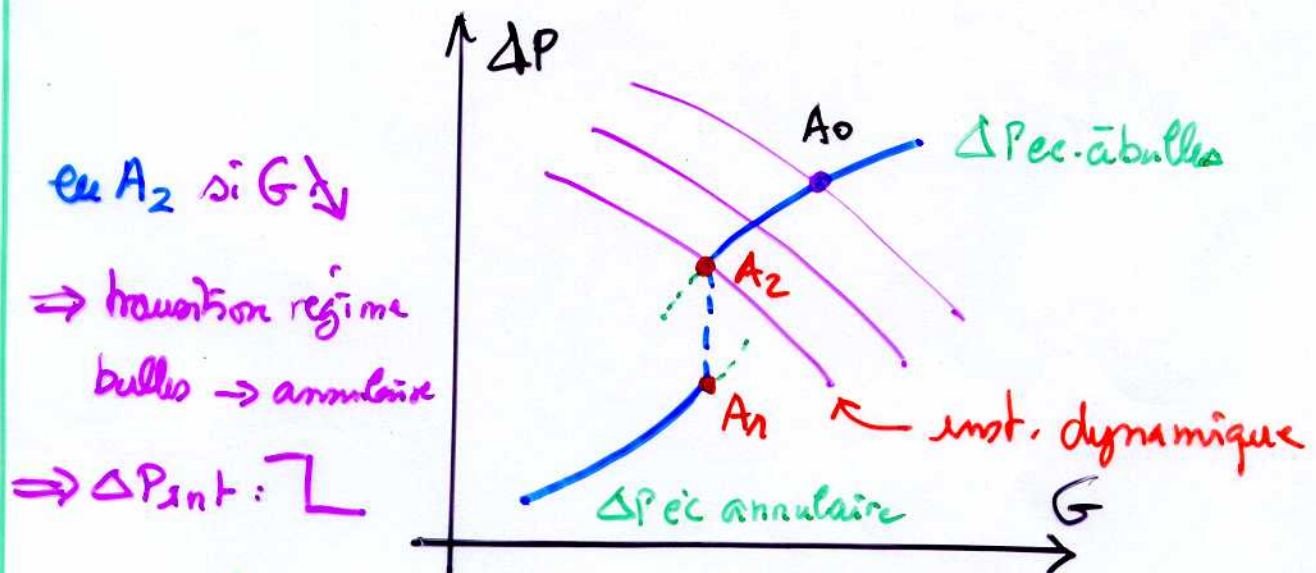


⚠ Instabilité peut engendrer un phénomène

secondaire : si $G \downarrow$ on peut avoir $\phi > \phi_{critique}$
(Burnout — CHF)

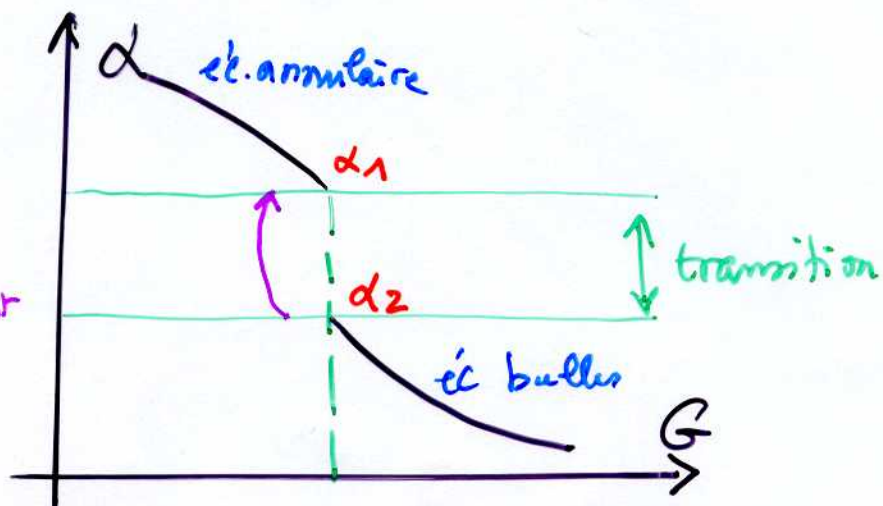
INSTABILITE de REGIME d'ECOULEMENT

- Transition de régime d'écoulement dans le domaine de fonctionnement



$\Rightarrow G \uparrow$

$\Rightarrow$ transition de régime inverse
 Cycle permanent



Modélisation

- instationnaire (réponse thermodynamique)
- Transition de régime
- ΔP par régime