



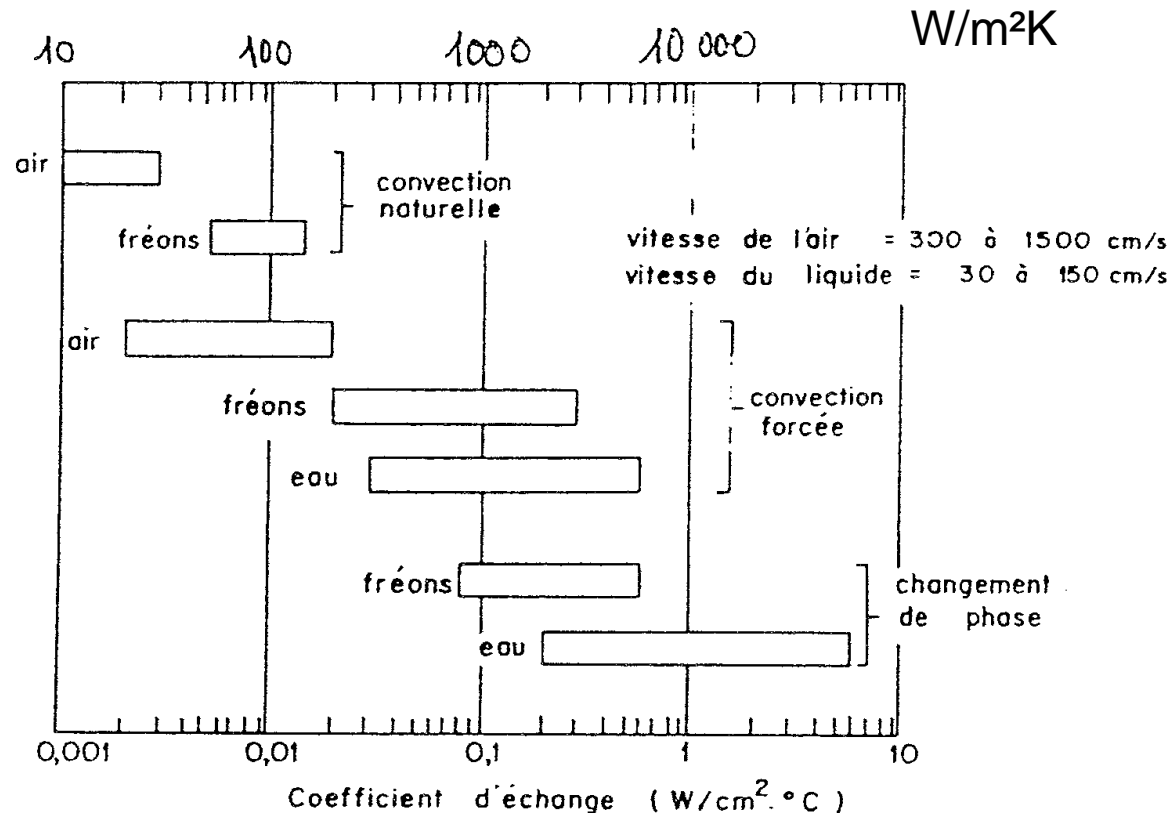
# LEÇON 9: ÉBULLITION, CONDENSATION

Phénomènes de  
changement de phase  
liquide/gaz

# INTRODUCTION

## ■ Changement de phase:

### □ Ordre de grandeur:



# INTRODUCTION

## ■ Ebullition:

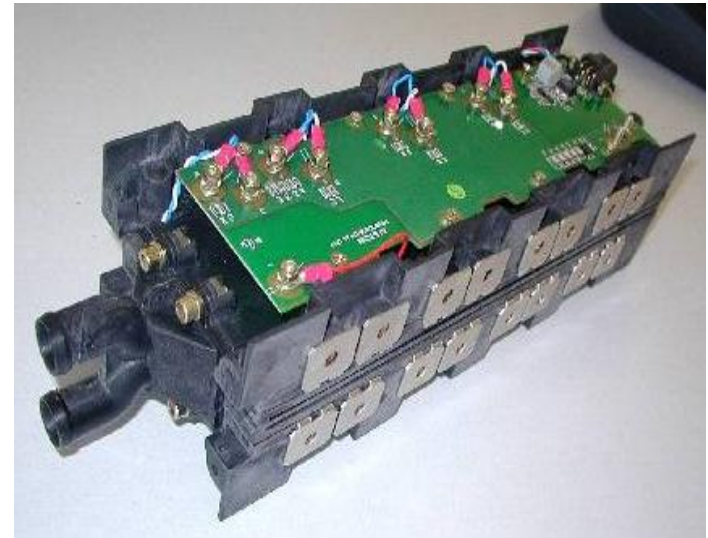
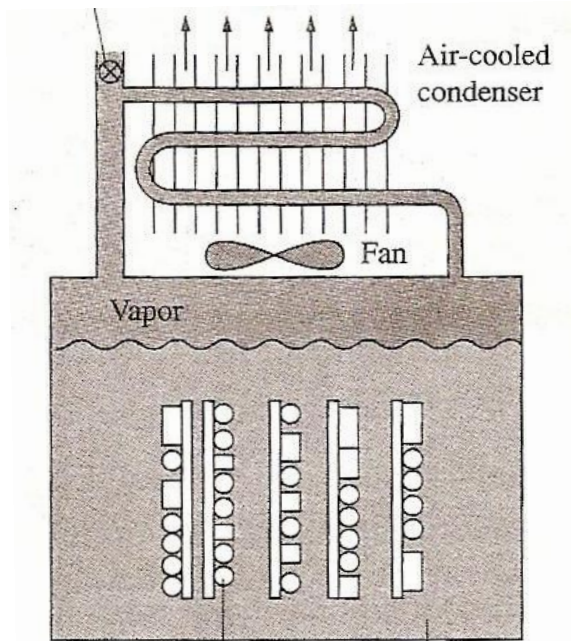
- ☐ Introduction
- ☐ Présentation générale
- ☐ Différents modes d'ébullition
- ☐ L'ébullition en vase

## ■ Condensation

- ☐ Introduction
- ☐ La condensation en film sur la plaque plane verticale en régime laminaire
- ☐ Extension aux régimes ondulants et turbulents

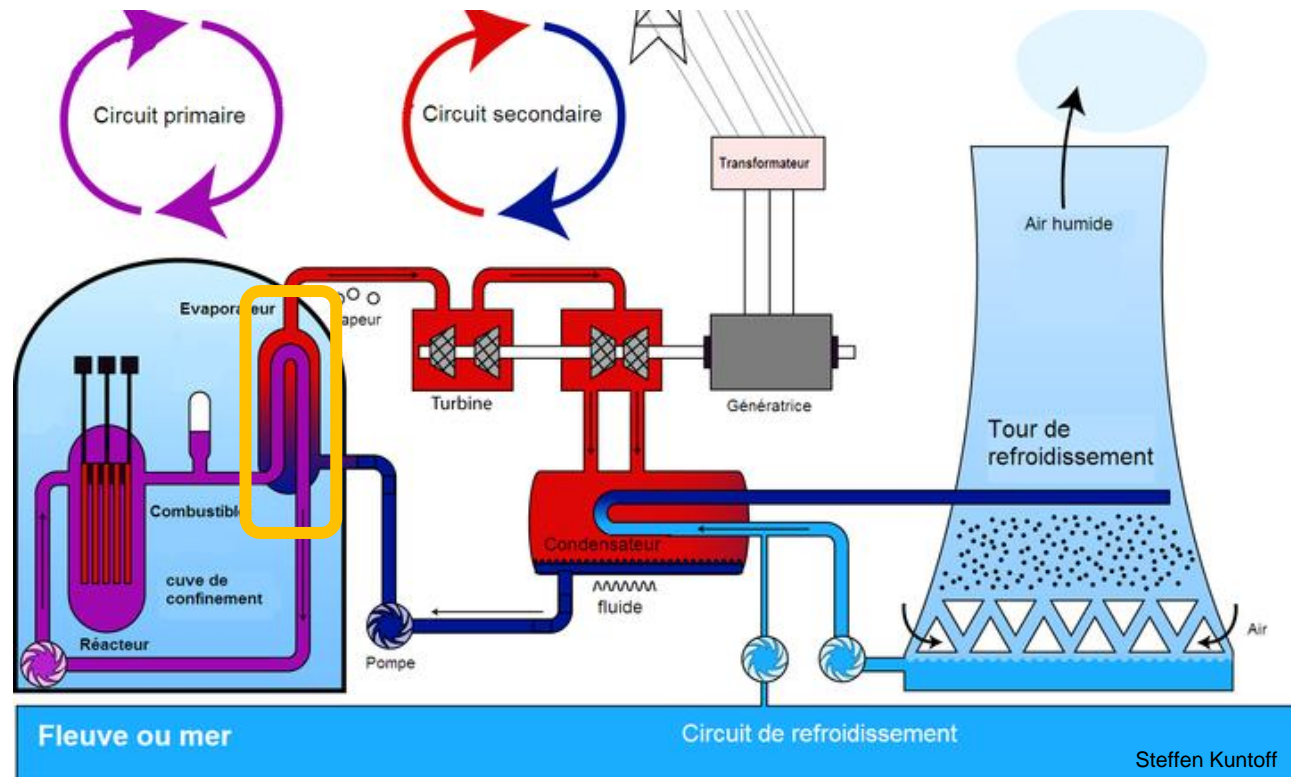
# EBULLITION: INTRODUCTION

- Exemples d'application:
  - Refroidissement électronique de forte puissance



# EBULLITION: INTRODUCTION

- Exemples d'application:
  - Centrale nucléaire: générateurs de vapeur



# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

- Ebullition:

- ☐ Changement de phase: vaporisation
- ☐ Mouvement du liquide et du gaz

⇒ Convection

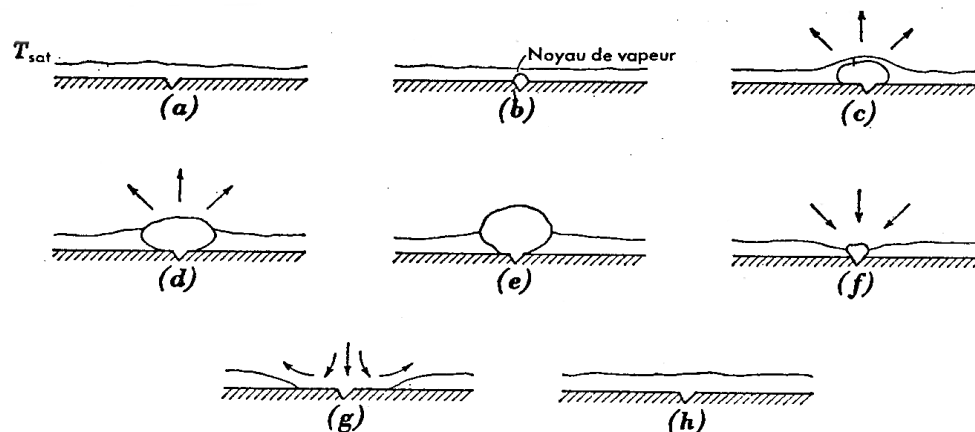
# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## ■ Principes de base:

□ Cas d'un liquide sous refroidi:  $T_{\text{moyenne liquide}} < T_{\text{sat}}$

### ■ Présence d'une paroi chauffée ( $T_p > T_{\text{sat}}$ )

- a) Le liquide près de la paroi est surchauffé
- b) Formation d'un noyau de vapeur
- c) Création d'une bulle
- d) Le sommet de la bulle arrive dans le liquide plus froid



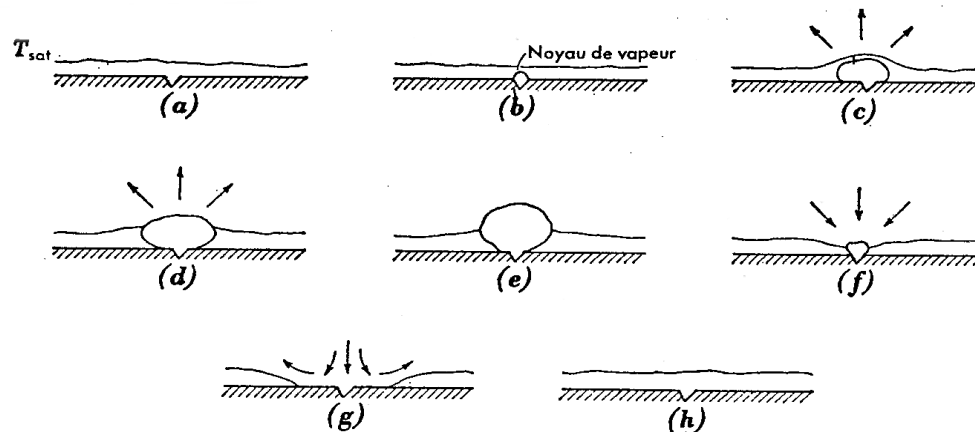
# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## ■ Principes de base:

□ Cas d'un liquide sous refroidi:  $T_{\text{moyenne liquide}} < T_{\text{sat}}$

### ■ Présence d'une paroi chauffée ( $T_p > T_{\text{sat}}$ )

- d) Le sommet de la bulle arrive dans le liquide plus froid
- e) La bulle perd de la chaleur à l'interface liquide/vapeur
- f) Les forces d'inertie ont été dissipées : la bulle se contracte. Du liquide "froid" la suit





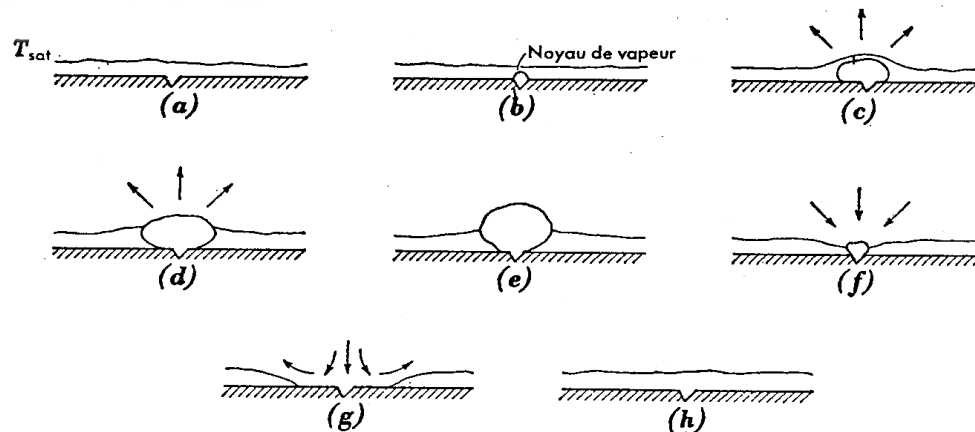
# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## ■ Principes de base:

□ Cas d'un liquide sous refroidi:  $T_{\text{moyenne liquide}} < T_{\text{sat}}$

### ■ Présence d'une paroi chauffée ( $T_p < T_{\text{sat}}$ )

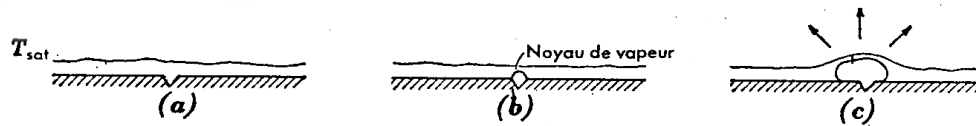
- f) La bulle se contracte. Du liquide "froid" la suit
- g) La phase vapeur a été condensée : la bulle a disparu et le "mur chauffant" est "frappé" par un courant de liquide "froid"
- h) Le film liquide surchauffé s'est reformé et le cycle se reproduit



# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## ■ Principes de base:

- Cas d'un liquide avec  $T_{\text{moyenne liquide}} > T_{\text{sat}}$
- Comportement proche a) à c)
- Détachement de la bulle



# EBULLITION: PRÉSENTATION GÉNÉRALE

## ■ Nouvelles grandeurs:

- Température de saturation  $T_{\text{sat}}$
- Chaleur Latente  $L_v$
- Tension superficielle (bulles)  $\sigma$
- Différentes masses volumiques (liquide/vapeur)  $\rho_l$  et  $\rho_v$
- ...

## ■ Nouveaux nombres adimensionnels

- Jakob:  $Ja = \frac{C_L \Delta T}{L_v}$
- Bond:  $Bo = \frac{g(\rho_L - \rho_v)L^2}{\sigma}$

# EBULLITION: DIFFÉRENTS MODES D'ÉBULLITION

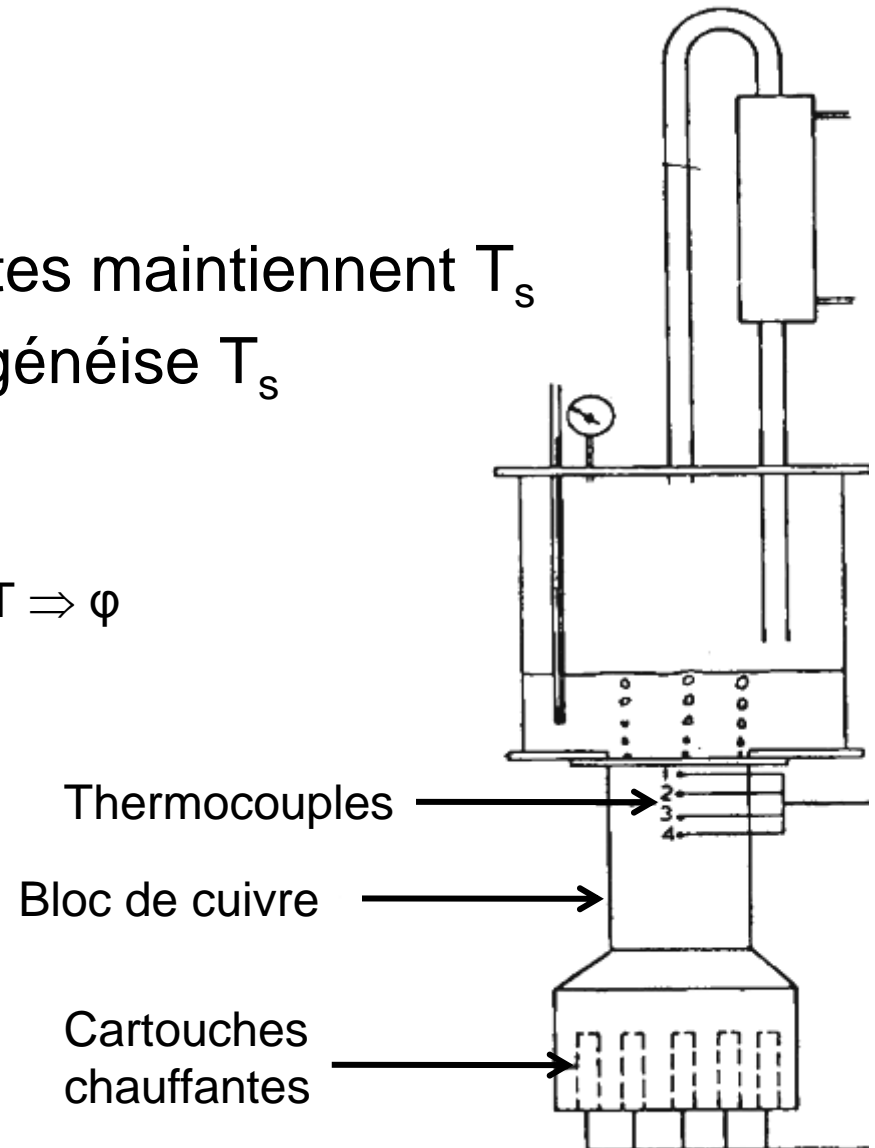
- Ebullition en vase:
  - Sans agitation extérieure
  - Clos ou libre
  - A  $T$  ou  $\phi$  imposée
  
- Ebullition en convection forcée
  - Très complexe et spécifique
  - Hors du cadre de ce cours

# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

- A  $T$  imposée:

- Dispositif expérimental:

- Cartouches chauffantes maintiennent  $T_s$
    - Bloc de cuivre homogénéise  $T_s$
    - Thermocouples
      - Mesure de  $T_s$
      - Mesure du gradient de  $T \Rightarrow \phi$

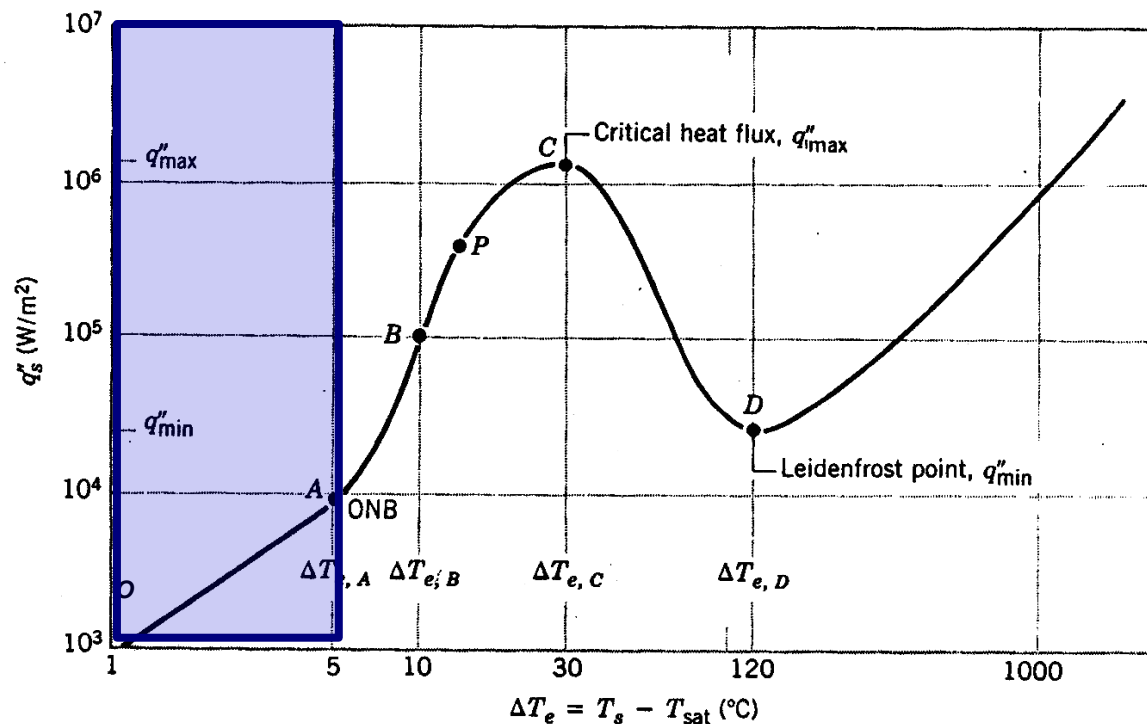


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ A T imposée:

□ Zone OA:  $\Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} < 5^\circ\text{C}$ :

- Convection naturelle
- Pas d'ébullition

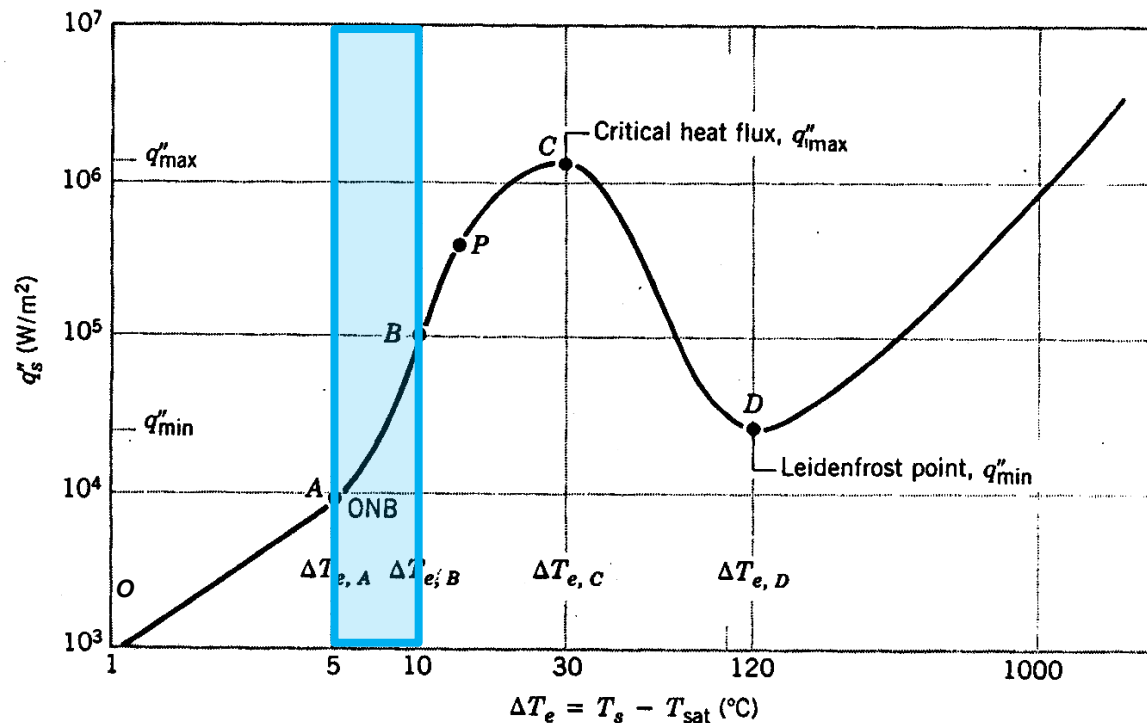


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ A T imposée:

□ Zone AB:  $5^{\circ}\text{C} < \Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} < 10^{\circ}\text{C}$  :

- Bulles isolées
- Fort brassage
- $h \nearrow$

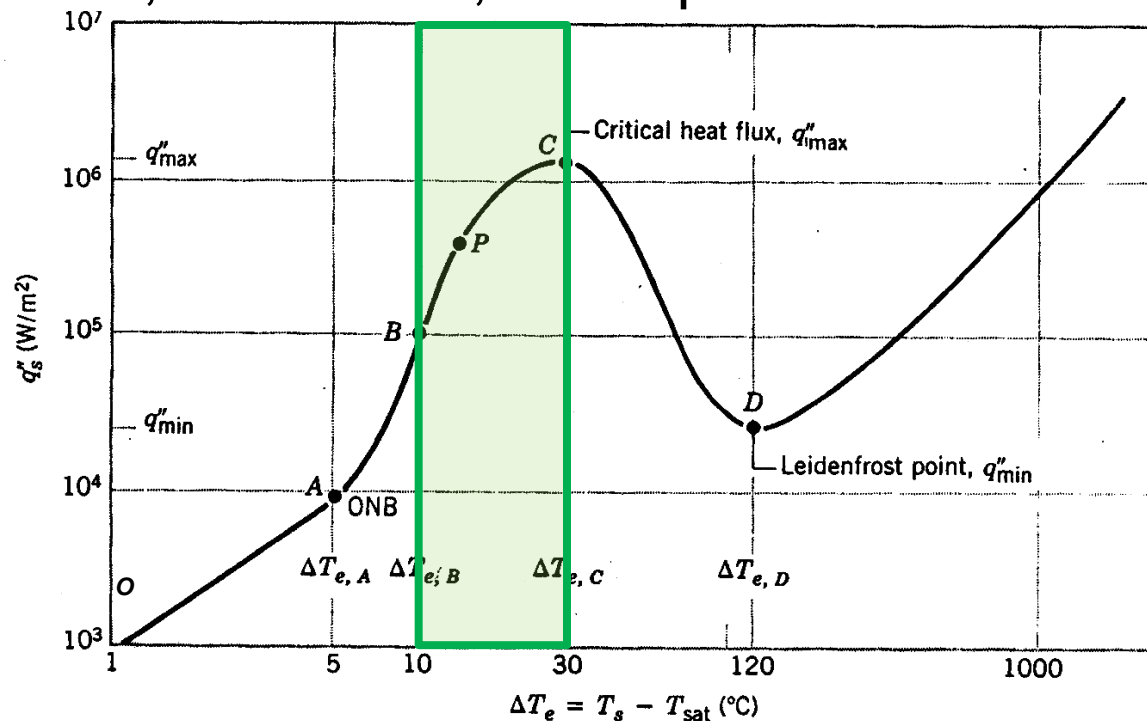


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ A T imposée:

□ Zone BC:  $10^{\circ}\text{C} < \Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} < 30^{\circ}\text{C}$  :

- Colonnes de bulles
- Mouvement du liquide vers la surface chaude freiné
- $h \searrow$ , mais  $\Delta T \nearrow$ , donc  $\phi \nearrow$



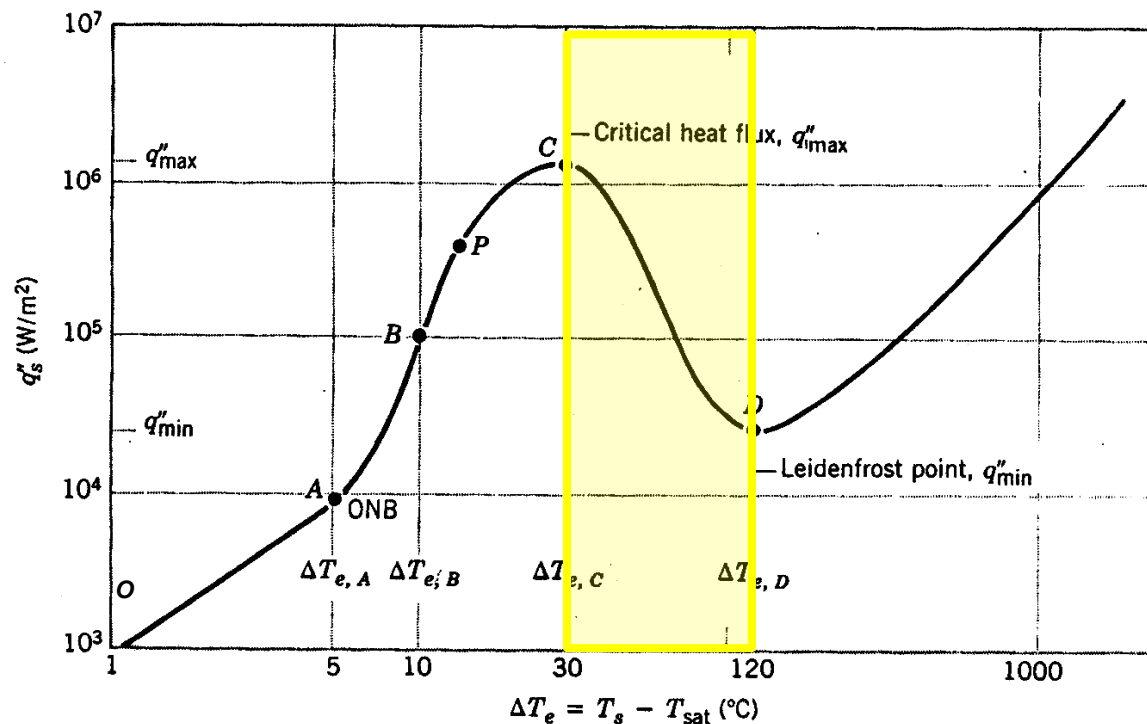


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ A T imposée:

□ Zone CD:  $30^{\circ}\text{C} < \Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} < 120^{\circ}\text{C}$  :

- Film de vapeur instable à la surface mais de +en+ stable
- $h \searrow$  + vite que  $\Delta T \nearrow$  donc  $\phi \searrow$

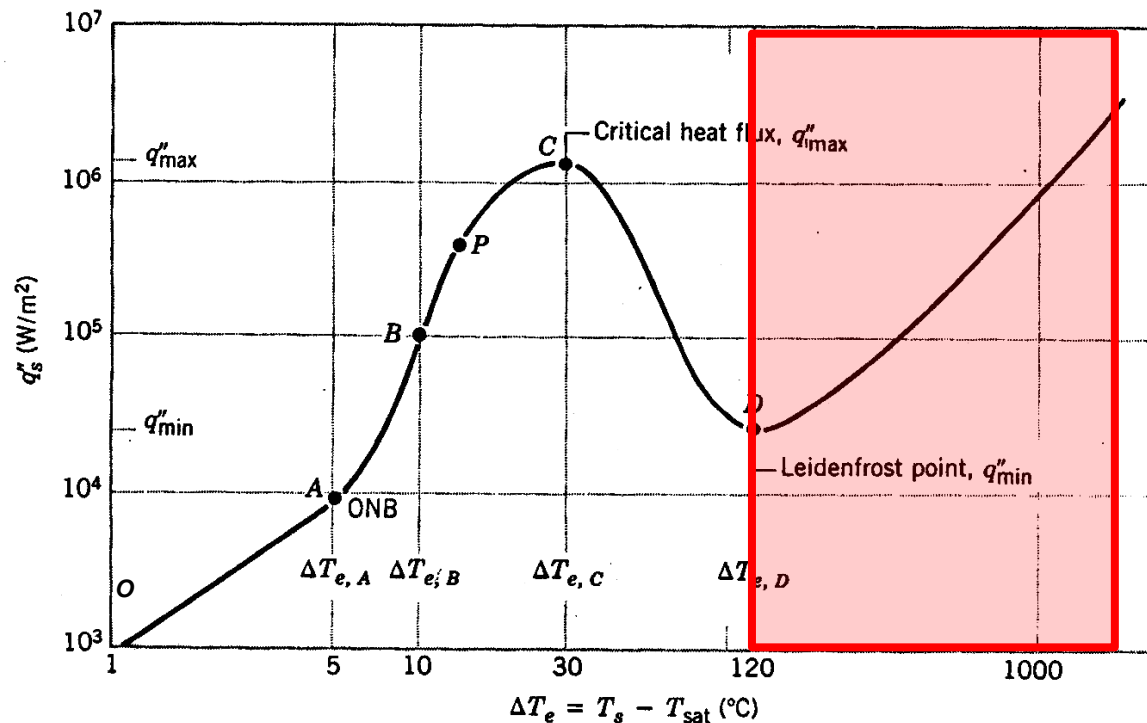


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ A T imposée:

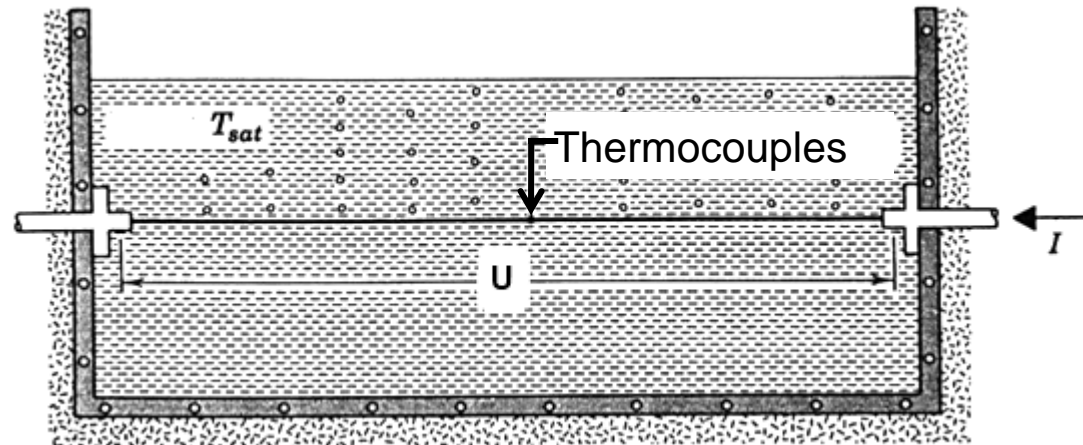
□ Zone CD:  $30^{\circ}\text{C} < \Delta T_e = T_s - T_{\text{sat}} < 120^{\circ}\text{C}$  :

- Film stable de vapeur à la surface
- $\phi \nearrow$  à cause du rayonnement et de la conduction au travers du film



# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

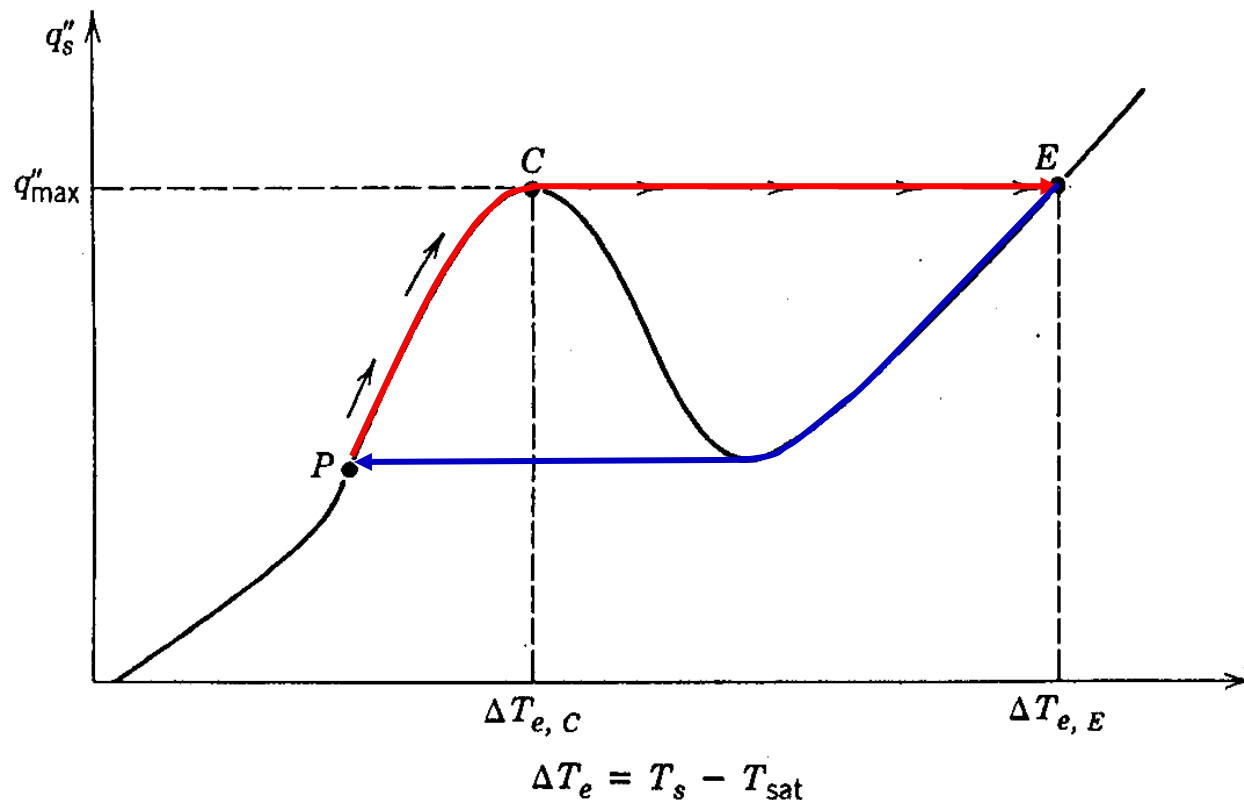
- A  $\phi$  imposé:
  - Dispositif expérimental:
    - Film chauffant
      - $\phi$  imposée
      - Mesure de  $\phi = UI/S$
    - Thermocouple
      - $T_s$



# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

- A  $\phi$  imposé:

- Après C: Une faible  $\nearrow$  de  $\phi \Rightarrow$  très rapide  $\nearrow$  de  $\Delta T_e$
- Phénomène d'hystérésis lors du refroidissement

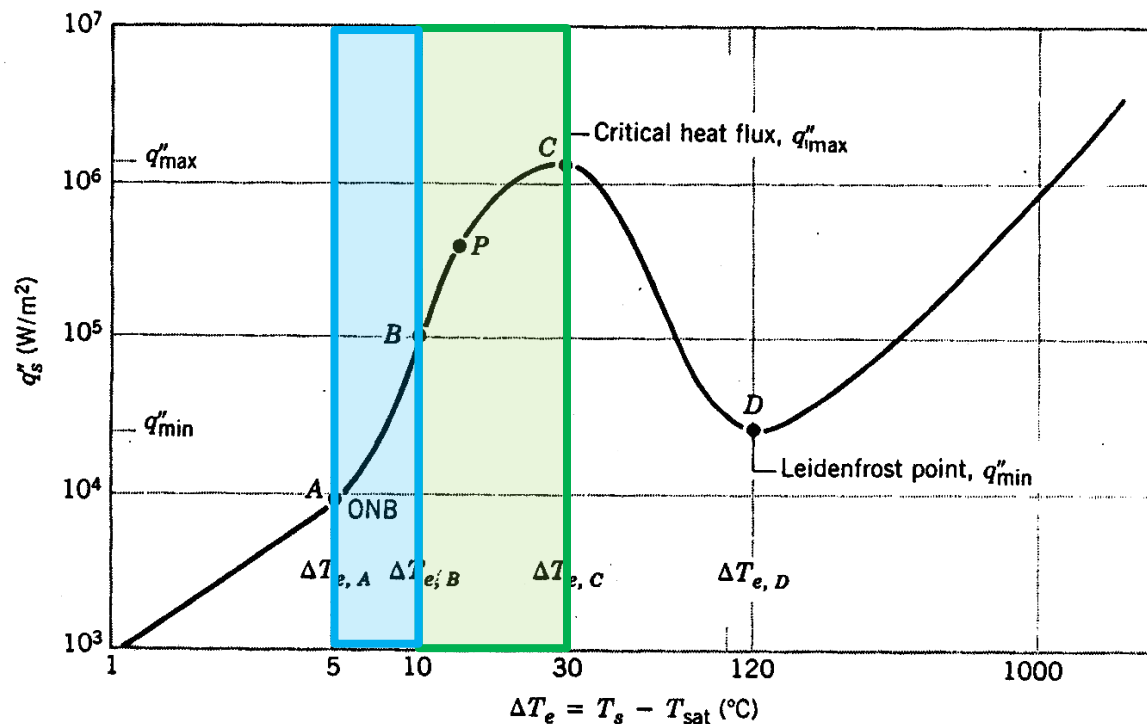


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ Formules et corrélations:

### □ Ebullition nucléée:

$$\phi = \mu_l L_v \left( \frac{g(\rho_L - \rho_v)}{\sigma} \right)^{1/2} \left( \frac{c_L \Delta T}{C_{sf} L_v \text{Pr}^n} \right)^3$$

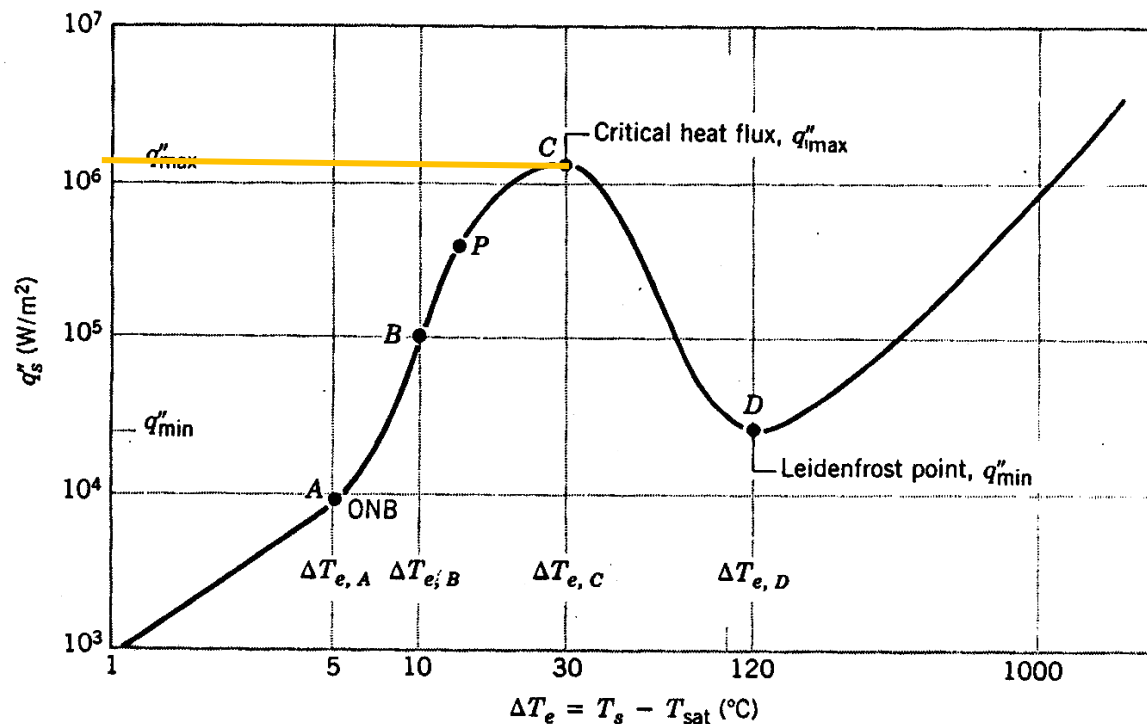


# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ Formules et corrélations:

□ Flux critique  $\phi_c = \phi_{\max}$

$$\phi_c = \frac{\pi}{24} L_v \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_L + \rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2}$$



# EBULLITION: EBULLITION EN VASE

## ■ Formules et corrélations:

- Flux critique  $\varphi_c = \varphi_{\max}$

$$\varphi_c = \frac{\pi}{24} L_v \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{1/4} \left( \frac{\rho_L + \rho_v}{\rho_L} \right)^{1/2}$$

- Il peut s'approcher par:

$$\varphi_c \cong 0.149 \cdot L_v \cdot \rho_v \left( \frac{\sigma g (\rho_L - \rho_v)}{\rho_v^2} \right)^{1/4}$$

# CONDENSATION: INTRODUCTION

- Condensation:

- ☐ Changement de phase
- ☐ Mouvement du liquide et du gaz

⇒ Convection

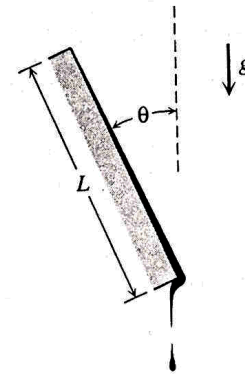
- Comme pour l'ébullition, Coefficients d'échange très importants



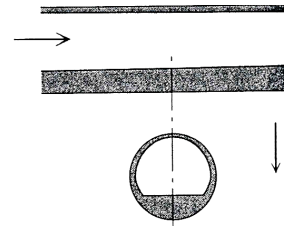
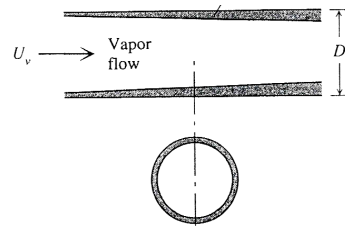
# CONDENSATION: INTRODUCTION

## ■ Configurations très variées:

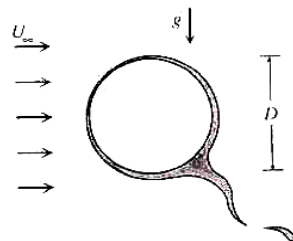
□ Convection naturelle



□ Convection forcée interne



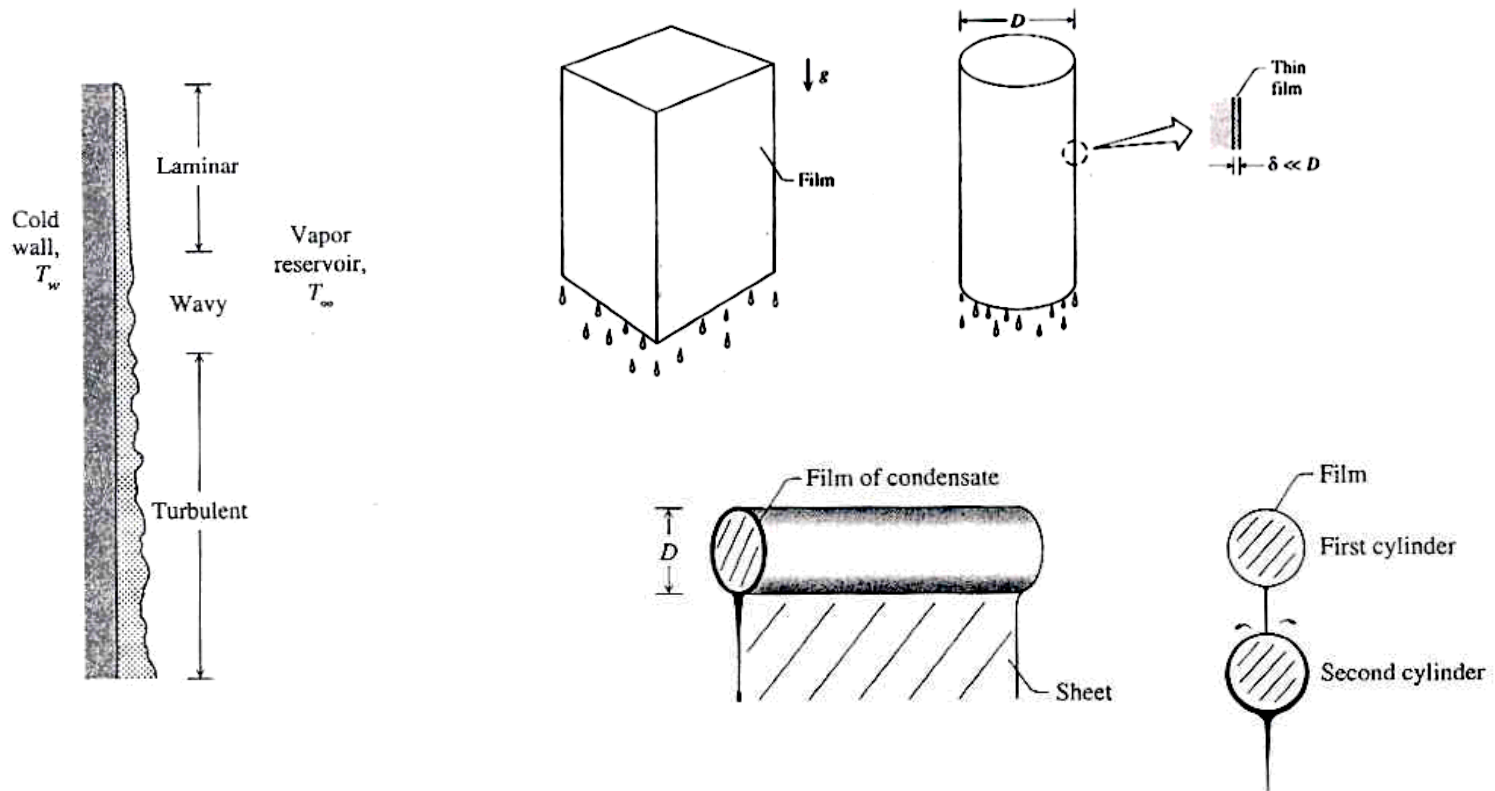
□ Convection forcée externe



# CONDENSATION: INTRODUCTION

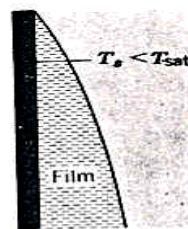
- Configurations très variées:

- Géométries:

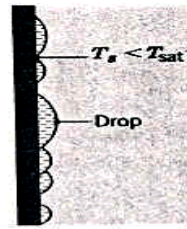


# CONDENSATION: INTRODUCTION

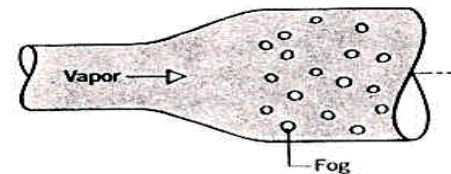
- Configurations très variées:
  - Mode de condensation:
    - En film
    - En gouttes sur une surface
    - En gouttelettes (brouillard)
    - Par contacts divers



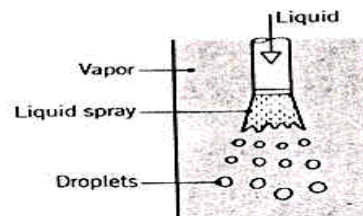
(a)



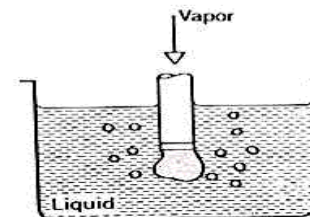
(b)



(c)

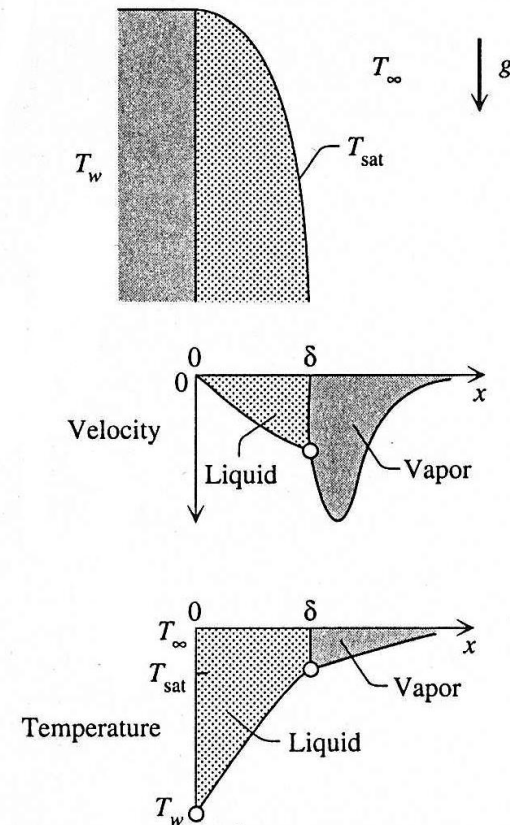
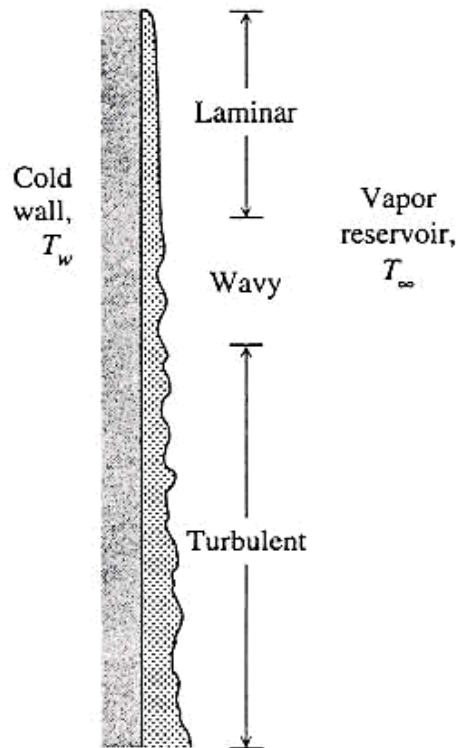


(d)



# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Généralités:



# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Hypothèses (Nusselt 1916):

- Plaque de hauteur H et de largeur b
- Film liquide laminaire
- Propriétés thermophysiques uniformes
- Vapeur entièrement à  $T_{\text{sat}}$
- Pas d'entraînement de la vapeur :  $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=\delta} = 0$
- Advection négligée (transfert de quantité de mouvement et d'énergie) dans le film
  - Transfert conductif: distribution linéaire de T

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Equation de quantité de mouvement:

### □ Simplifiée (cf. leçon 4)

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_L} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu_L}{\rho_L} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{F_x}{\rho_L}$$

### □ Pas d'advection $F_x = \rho_L g$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu_L} \frac{dP}{dx} - \frac{F_x}{\mu_L} = \frac{1}{\mu_L} \frac{dP}{dx} - \frac{\rho_L g}{\mu_L}$$

### □ Equation: $\rho_v g$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = -\frac{g}{\mu_L} (\rho_L - \rho_v)$$

### □ Conditions aux limites: $u(0) = 0$ $\left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=\delta} = 0$

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

- Equation de quantité de mouvement:

- Solution:

$$u(y) = \frac{g(\rho_L - \rho_v)\delta^2}{\mu_L} \left[ \frac{y}{\delta} - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^2 \right]$$

- Débit masse:

$$\dot{m}(x) = b \int_0^{\delta(x)} \rho_L u(y) dy$$

- En remplaçant  $u(y)$  par son expression

$$\dot{m}(x) = \frac{b \rho_L (\rho_L - \rho_v) g \delta^3(x)}{3\mu_L}$$

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Transfert de chaleur:

- Flux libéré par condensation

$$dQ = L_v \dot{m} = \frac{\lambda_L (T_{sat} - T_s) b dx}{\delta}$$

- Or  $\dot{m}(x) = \frac{b \rho_L (\rho_L - \rho_v) g \delta^3(x)}{3 \mu_L}$

- Donc  $\delta^3 d\delta = \frac{\lambda_L \mu_L (T_{sat} - T_s)}{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) L_v} dx,$

$$\Rightarrow \delta(x) = \left[ \frac{4 \lambda_L \mu_L (T_{sat} - T_s) x}{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) L_v} \right]^{1/4}$$



# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Transfert de chaleur:

### □ Coefficient d'échange

$$h_x b dx (T_{sat} - T_s) = dQ = \frac{\lambda_L b dx (T_{sat} - T_s)}{\delta} \Rightarrow h_x = \frac{\lambda_L}{\delta(x)}$$

### □ Correction:

#### ■ Prise en compte de l'advection:

$$L'_v = L_v (1 + 0,68 Ja) \quad \text{avec} \quad Ja = \frac{C_{PL} (T_{sat} - T_s)}{L_v}$$

#### ■ Donc

$$h_x = \left[ \frac{g \rho_L (\rho_L - \rho_v) \lambda_L^3 L'_v}{4 \mu_L (T_{sat} - T_s) x} \right]^{1/4}$$

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

- Extension aux régimes ondulants et turbulents:

- Diamètre hydraulique  $D_h = 4\delta$

- Nombre de Reynolds:

$$\text{Re}_\delta = \frac{\rho_L u_{\text{moyen}} D_h}{\mu_L}$$

- Or  $\dot{m} = \rho_L u_{\text{moyen}} \delta b$

- Donc

$$\text{Re}_\delta = \frac{\rho_L u_{\text{moyen}} 4\delta}{\mu_L} = \frac{4\dot{m}}{\mu_L b} = \frac{4g \rho_L (\rho_L - \rho_v) \delta^3}{3\mu_L^2}$$

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Extension aux régimes ondulants et turbulents:

□ Nombre de Reynolds:

$$\text{Re}_\delta = \frac{4g \rho_L (\rho_L - \rho_v) \delta^3}{3\mu_L^2}$$

□ Si  $\text{Re}_\delta < 30$ : laminaire

□ Si  $30 < \text{Re}_\delta < 1800$ : ondulant

$$\frac{\bar{h}_H (v_L^2 / g)^{1/3}}{\lambda_L} = \frac{\text{Re}_\delta}{1,08 \text{Re}_\delta^{1,22} - 5,2}$$

□ Si  $\text{Re}_\delta > 1800$ : turbulent

$$\frac{\bar{h}_H (v_L^2 / g)^{1/3}}{\lambda_L} = \frac{\text{Re}_\delta}{8750 + 58 \text{Pr}^{-0,5} (\text{Re}_\delta^{0,75} - 253)}$$

# CONDENSATION: FILM SUR UNE PLAQUE PLANE VERTICALE EN RÉGIME LAMINAIRE

## ■ Extension aux régimes ondulants et turbulents:

□ Si  $Re_\delta > 1800$ : turbulent

$$\frac{\bar{h}_H \left( \nu_L^2 / g \right)^{1/3}}{\lambda_L} = \frac{Re_\delta}{8750 + 58 Pr^{-0.5} (Re_\delta^{0.75} - 253)}$$

