

Fluides frigorigènes et mécanismes physiques en ébullition convective



Rémi Revellin



Groupe de recherche

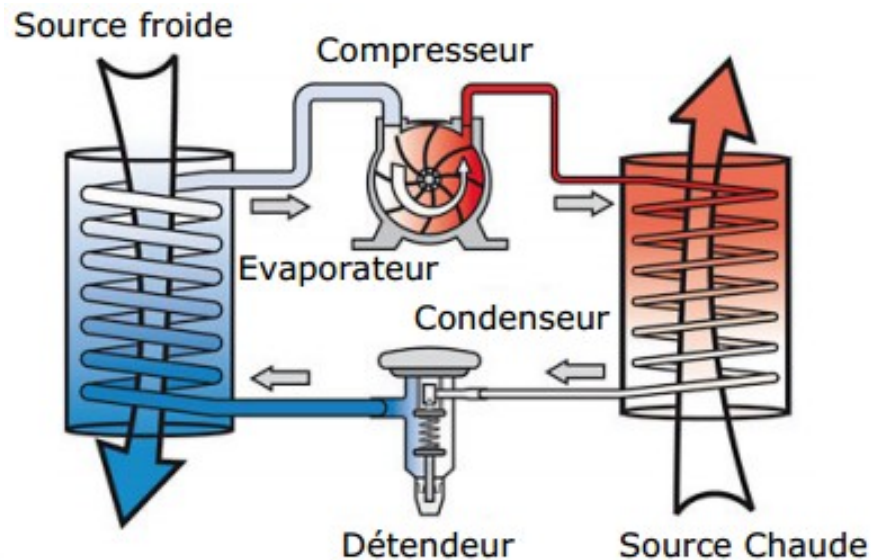
Energétique des systèmes thermiques et frigorifiques



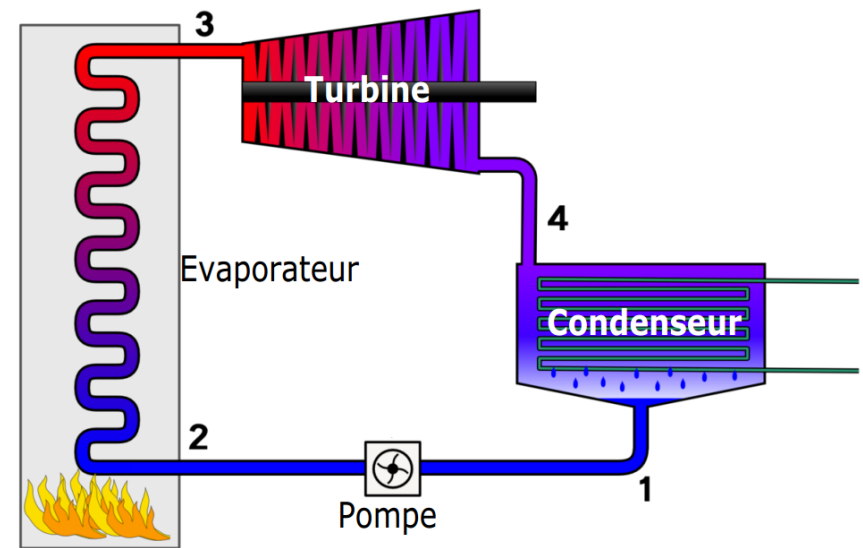
Ebullition convective ?

Ebullition convective : ébullition + effets convectifs

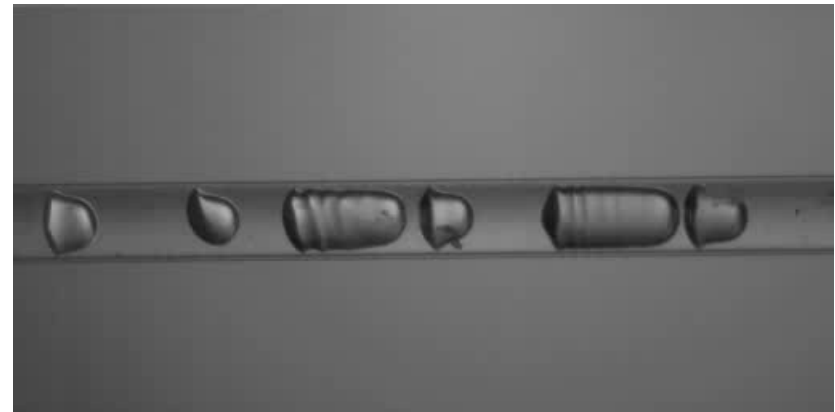
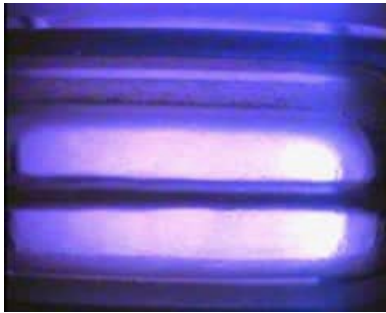
PAC, machine frigorifique



Rankine



Ebullition convective ?



Ecoulement intermittent
d'Ammoniac à 5°C dans un
tube de 14 mm horizontal

Transfert de chaleur en ébullition convective

Mécanismes du transfert de chaleur

2 mécanismes gouvernent le transfert de chaleur en ébullition convective

- L'ébullition nucléée (**NB**) \longleftrightarrow formation des bulles à la paroi
- L'ébullition convective (**CB**) \longleftrightarrow conduction et convection (film liquide)
 \swarrow évaporation à l'interface liquide-vapeur

Ces mécanismes sont liés au coefficient de transfert de chaleur (α):

- Quand **NB** est dominant, $\alpha = f(q, T_{sat})$ & $\alpha \neq f(G, x)$
- Quand **CB** est dominant, $\alpha = f(G, x)$ & $\alpha \neq f(q)$
- Quand **NB** et **CB** sont d'égale importance, $\alpha = f(G, q, x)$

+ assèchement, entrainement, capillarité, vagues interfaciales, stratification, ...

Modèles de prédictions

Prédiction du transfert de chaleur avant assèchement

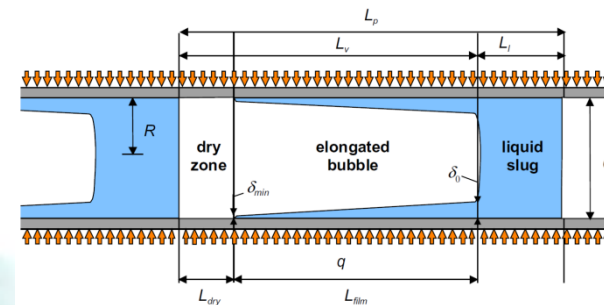
Corrélation basée sur l'ébullition en vase $\alpha_{tp} = \dot{q}^n$

Modèles asymptotiques $\alpha_{tp} = [(S \cdot \alpha_{nb})^n + (F \cdot \alpha_{cb})^n]^{\frac{1}{n}}$

Modèle d'intensification $\alpha_{tp} = \psi \cdot \alpha_{lo}$

Approche de type Nusselt $\alpha_{tp} = f(\text{Re}, \text{Bo}, \text{We})$

Approche phénoménologique



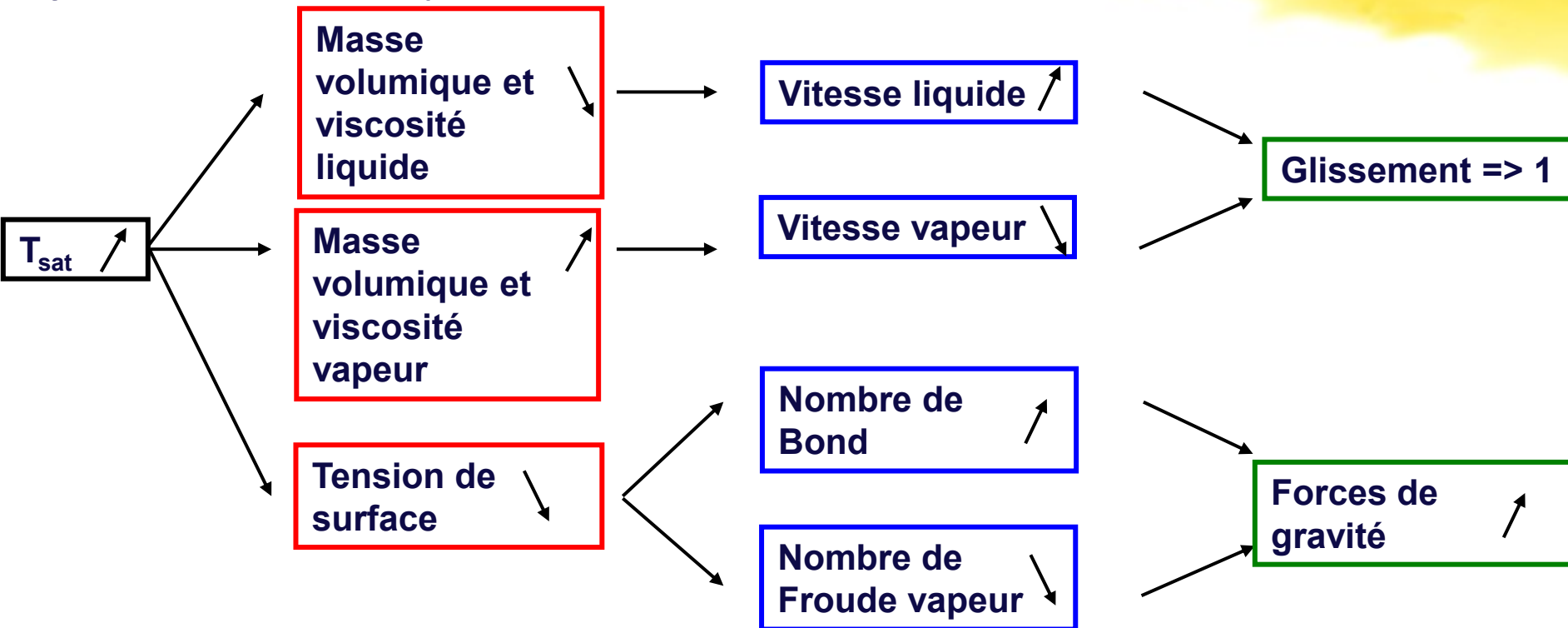
Nombres adimensionnels et propriétés

liquid Reynolds Re_l	$\frac{j_l \cdot D}{\nu_l}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}}$
vapor Reynolds Re_v	$\frac{j_v \cdot D}{\nu_v}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}}$
Weber number We_v	$\frac{\rho_v \cdot j_v^2 \cdot D}{\sigma}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{surface tension}}$
Prandtl number Pr_l	$\frac{\mu_l \cdot C_{pl}}{\lambda_l}$	$\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{heat diffusivity}}$
Nusselt number Nu	$\frac{q_w}{\lambda_l \cdot (T_w - T_k)}$	$\frac{\text{convection}}{\text{conduction}}$
Jakob number Ja	$\frac{C_{pl} \cdot (T_w - T_{sat})}{h_{l,v}}$	$\frac{\text{sensible heat}}{\text{latent heat}}$
Boiling number Bo	$\frac{q_w}{G \cdot h_{l,v}}$	$\frac{\text{wall heat flux}}{\text{phase change heat flux}}$
Froude number Fr_l	$\frac{j_l^2}{D \cdot g}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{gravitational forces}}$

Masse volumique, viscosité, tension de surface, enthalpie, chaleur spécifique

Exemples d'activités scientifiques au CETHIL

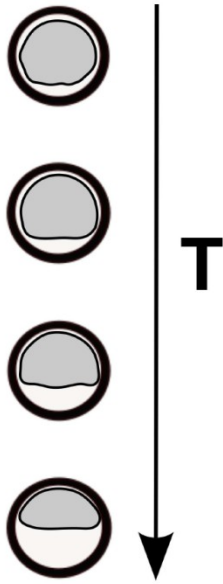
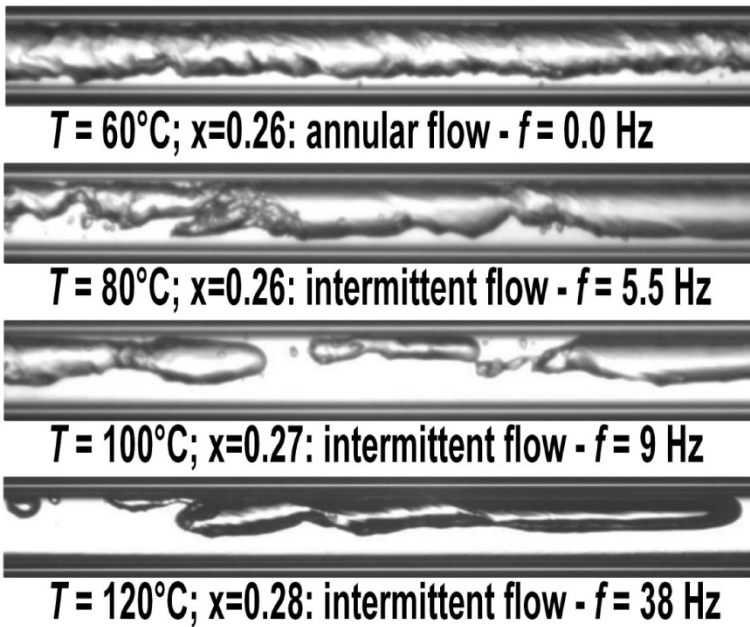
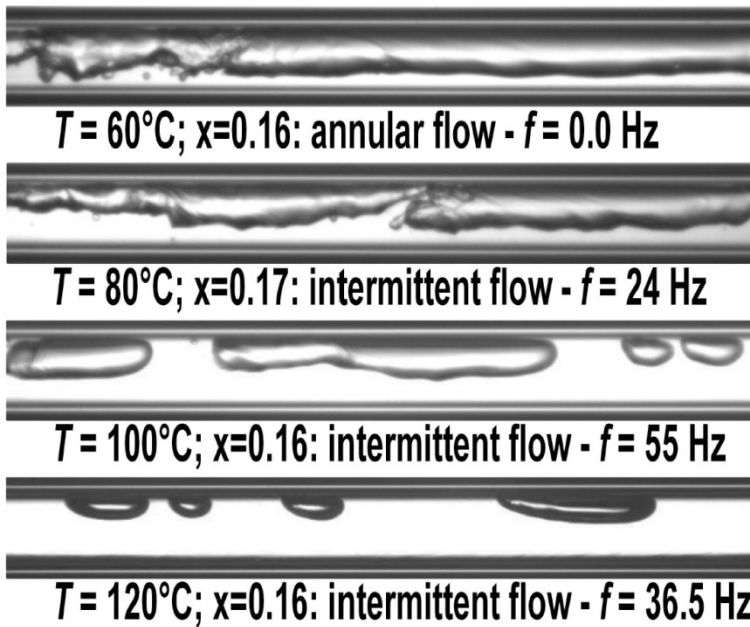
Influence de la température de saturation



Ces propriétés ont une influence sur les interactions liquide-vapeur et par conséquent sur les régimes d'écoulement et les mécanismes de transfert de chaleur et de chutes de pression

Ebullition convective à haute température

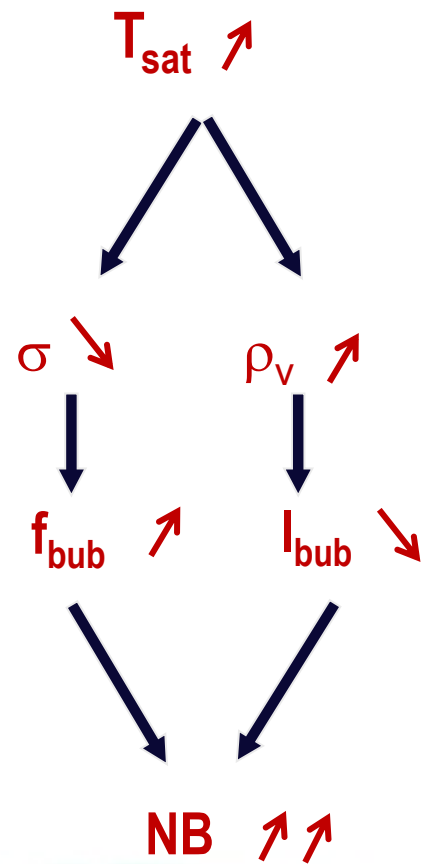
Thèse R. Charnay



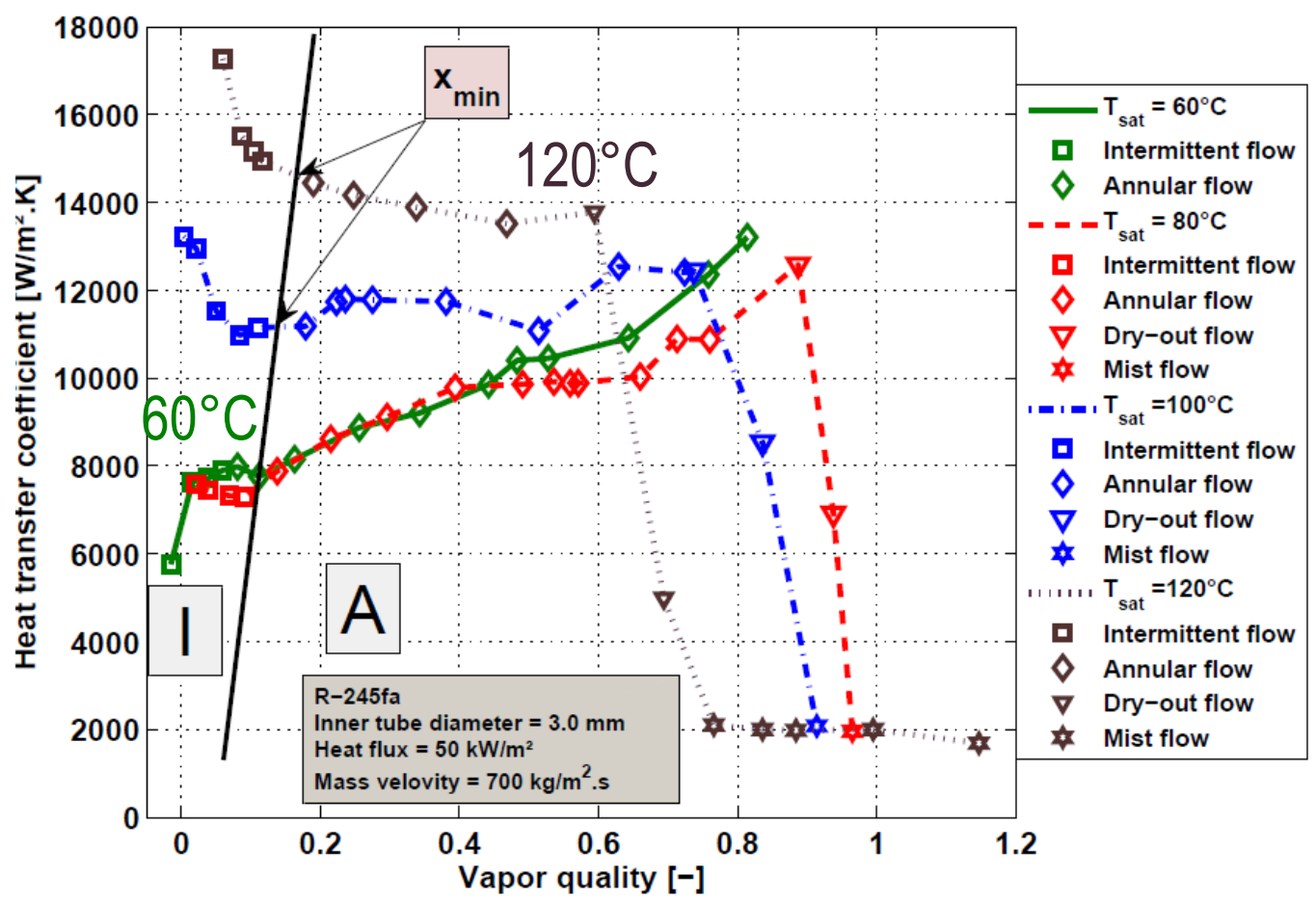
Ebullition convective à haute température

Thèse R. Charnay

Intermittent



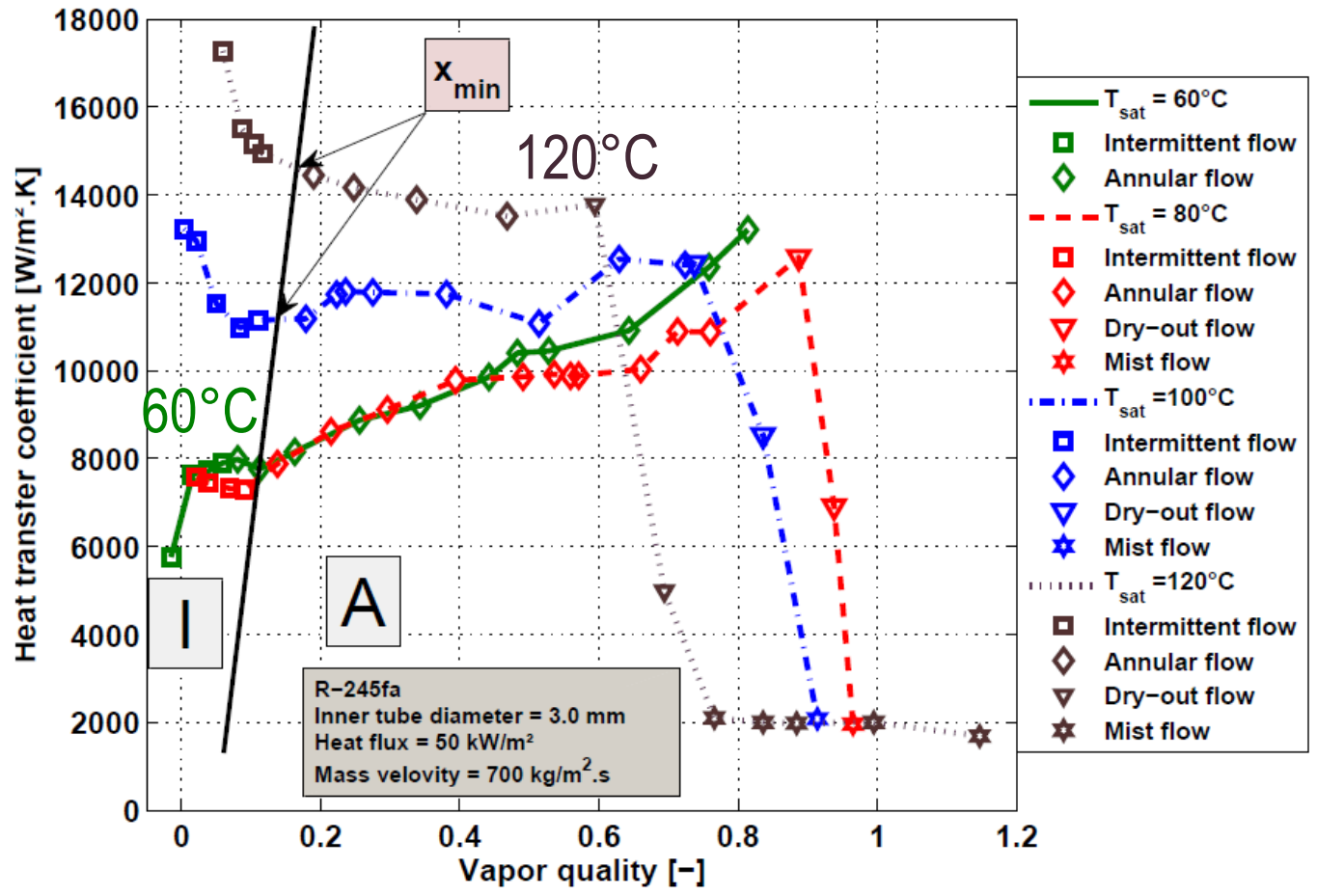
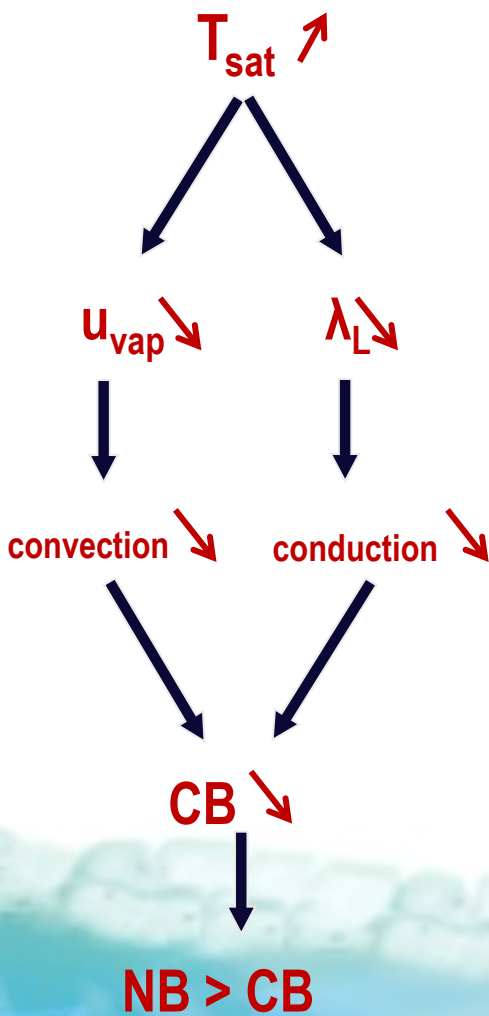
Régime dominant



Ebullition convective à haute température

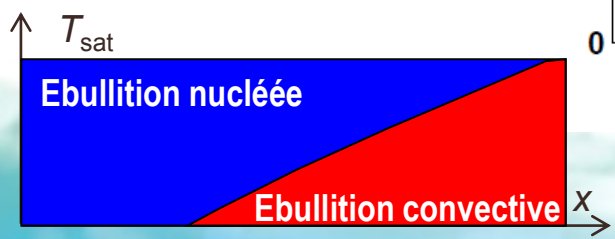
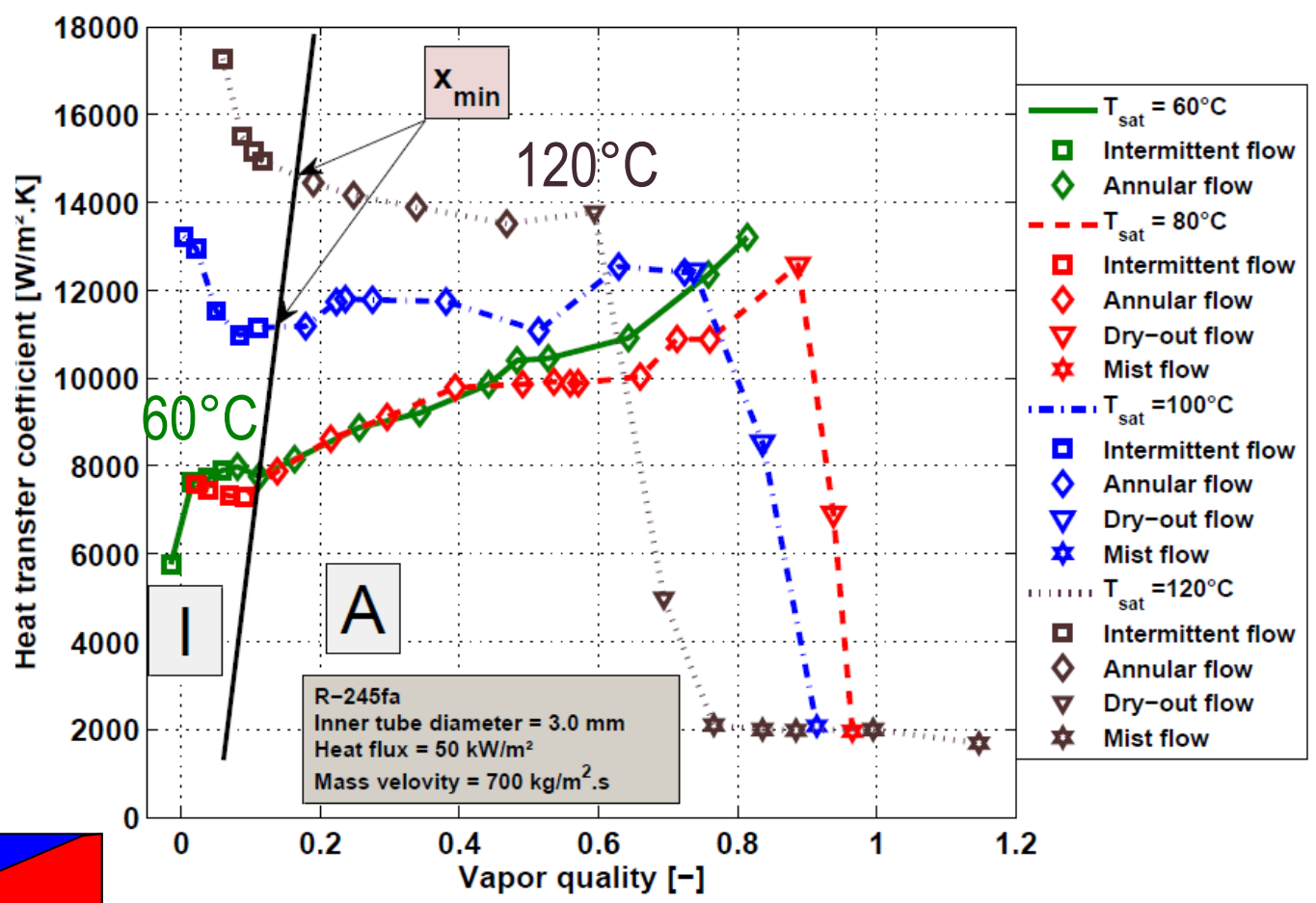
Thèse R. Charnay

Annulaire



Ebullition convective à haute température

Thèse R. Charnay



Chutes de pression en ébullition convective

Mécanismes des chutes de pression

$$\frac{dP}{dz} = \left(\frac{dP}{dz} \right)_f + \left(\frac{dP}{dz} \right)_g + \left(\frac{dP}{dz} \right)_a$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_f = -\frac{1}{A_t} \left(\frac{dF_v}{dz} + \frac{dF_l}{dz} \right)$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_g = -\left(\rho_l \frac{A_l}{A_t} + \rho_v \frac{A_v}{A_t} \right) g \sin \theta = -(\alpha \rho_v + (1-\alpha) \rho_l) g \sin \theta$$

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_a = -\frac{1}{A_t} \frac{d}{dz} (u_l \dot{m}_l + u_v \dot{m}_v) = -G^2 \frac{d}{dz} \left(\frac{v_v \cdot x^2}{\alpha} + \frac{v_l \cdot (1-x)^2}{1-\alpha} \right)$$

Modèles de chutes de pression par frottement

- **Modèle homogène**
- **Modèle à phases séparées**
 - Φ_L^2, Φ_V^2 based method

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \frac{2 f_{\text{tp}} G^2}{d_h \rho_{\text{tp}}}$$

$$\rho_{\text{tp}} = \left(\frac{x}{\rho_V} + \frac{1-x}{\rho_L}\right)^{-1}$$

- Φ_{LO}^2, Φ_{VO}^2 based method

$$f_{\text{tp}} = \dots$$

$$f_{\text{tp}} = \frac{0.079}{\text{Re}_{\text{tp}}^{0.25}} \text{ for } \text{Re}_{\text{tp}} > 2000$$

- **Approche phénoménologique**

$$\text{Re}_{\text{tp}} = \frac{G d_h}{\mu_{\text{tp}}}$$

MacAdams et al., Cicchiti et al., Dukler et al.

Modèles de chutes de pression par frottement

- Modèle homogène
- **Modèle à phases séparées**
 - Φ_L^2, Φ_V^2 based method
 - Φ_{LO}^2, Φ_{VO}^2 based method
- Approche phénoménologique

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \frac{2 f_{tp} G^2}{d_h \rho_{tp}}$$

Paramètres $f(Re_L, Re_V)$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_L \Phi_L^2$$

$$\Phi_L^2 = 1 + \frac{C}{X} + \frac{1}{X^2}$$

$$X = \left[\frac{\left(\frac{dP}{dz}\right)_L}{\left(\frac{dP}{dz}\right)_V} \right]^{0.5}$$

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_L = \frac{2 f_L G^2 (1-x)^2}{d_h \rho_L}$$

$$f_L = \frac{0.079}{Re_L^{0.25}}$$

$$Re_L = \frac{G d_h (1-x)}{\mu_L}$$

Modèles de chutes de pression par frottement

- Modèle homogène

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \frac{2 f_{tp} G^2}{d_h \rho_{tp}}$$

- **Modèle à phases séparées**

- Φ_L^2, Φ_V^2 based method

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_L \Phi_L^2$$

- **Φ_{LO}^2, Φ_{VO}^2 based method**

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{LO} \Phi_{LO}^2 \rightarrow \text{Nombreuses définitions}$$

- Approche phénoménologique

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{LO} = \frac{2 f_{LO} G^2}{d_h \rho_L}$$

$$f_{LO} = \frac{0.079}{Re_{LO}^{0.25}} \text{ for } Re_{LO} > 2000$$

$$f_{LO} = \frac{16}{Re_{LO}} \text{ for } Re_{LO} < 2000$$

$$Re_{LO} = \frac{G d_h}{\mu_L}$$

Modèles de chutes de pression par frottement

- Modèle homogène

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \frac{2 f_{\text{tp}} G^2}{d_h \rho_{\text{tp}}}$$

- Modèle à phases séparées

– Φ_L^2, Φ_V^2 based method

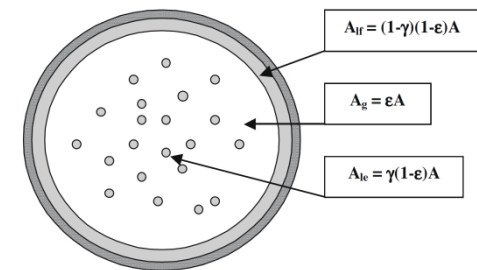
$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_L \Phi_L^2$$

– Φ_{LO}^2, Φ_{VO}^2 based method

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{frict}} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{LO} \Phi_{LO}^2$$

- Approche phénoménologique

Cioncolini et al. (2009) écoulement annulaire



Nombres adimensionnels et propriétés

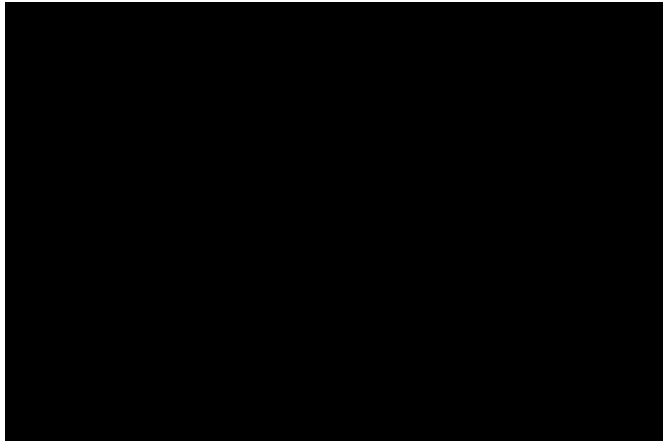
liquid Reynolds Re_l	$\frac{j_l \cdot D}{\nu_l}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}}$
vapor Reynolds Re_v	$\frac{j_v \cdot D}{\nu_v}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{viscous forces}}$
Weber number We_v	$\frac{\rho_v \cdot j_v^2 \cdot D}{\sigma}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{surface tension}}$
Prandtl number Pr_l	$\frac{\mu_l \cdot C_{pl}}{\lambda_l}$	$\frac{\text{momentum diffusivity}}{\text{heat diffusivity}}$
Nusselt number Nu	$\frac{q_w}{\lambda_l \cdot (T_w - T_k)}$	$\frac{\text{convection}}{\text{conduction}}$
Jakob number Ja	$\frac{C_{pl} \cdot (T_w - T_{sat})}{h_{l,v}}$	$\frac{\text{sensible heat}}{\text{latent heat}}$
Boiling number Bo	$\frac{q_w}{G \cdot h_{l,v}}$	$\frac{\text{wall heat flux}}{\text{phase change heat flux}}$
Froude number Fr_l	$\frac{j_l^2}{D \cdot g}$	$\frac{\text{inertia forces}}{\text{gravitational forces}}$

Masse volumique, viscosité, tension de surface, enthalpie, chaleur spécifique

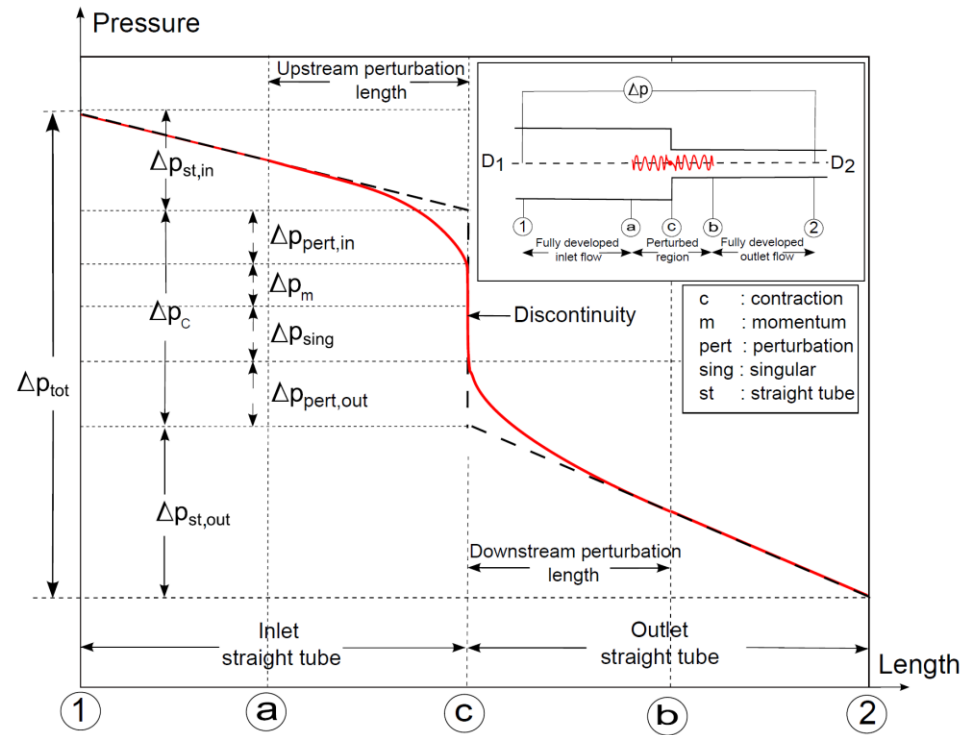
Exemples d'activités scientifiques au CETHIL



Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités



Mesure et prédiction des pertes de charges dues à la contraction

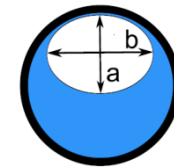
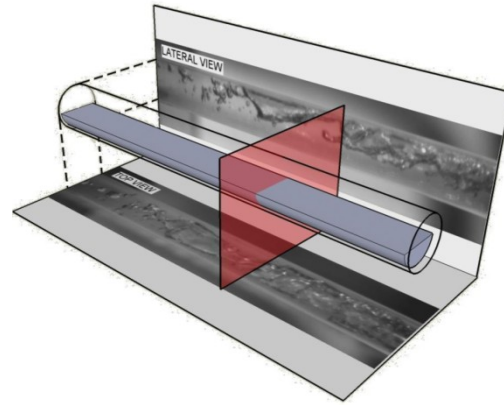
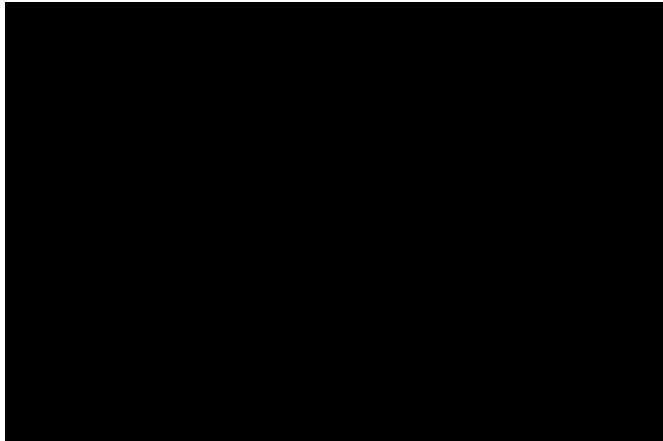


Problématique amont : Définition d'un écoulement diphasique établi ?

➔ Quelles longueurs d'établissement ?



Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités

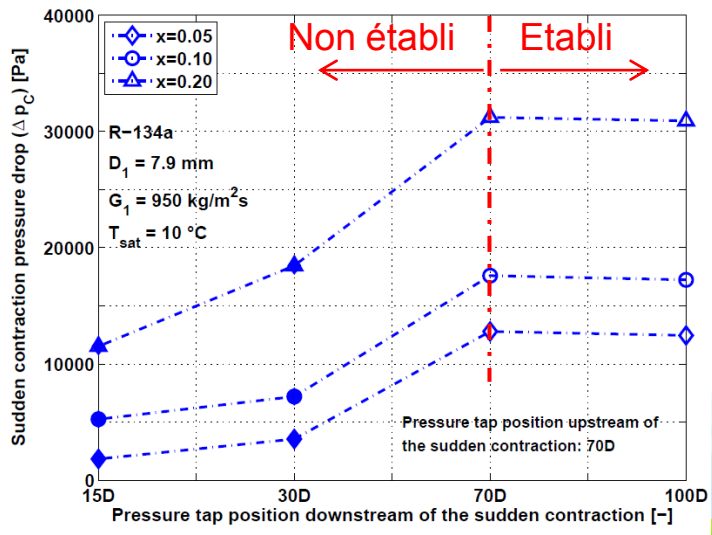


$$\varepsilon = \frac{A_v}{A_v + A_l}$$

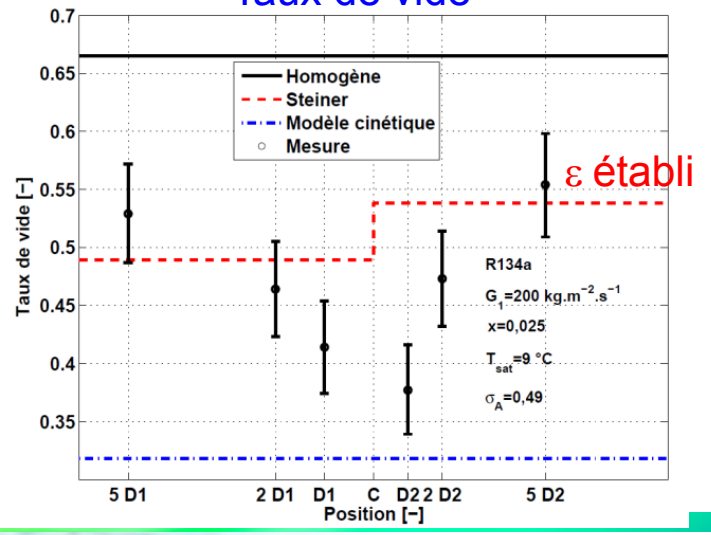
Section de passage de la vapeur

Taux de vide

Pression



Taux de vide



Conclusions

- De nombreux mécanismes physiques prédits par des modèles basés sur des nombres adimensionnels (Re , Fr , We , ...)
- Nombres sans dimension fonction des propriétés thermophysiques
 - masse volumique
 - viscosité
 - tension de surface
 - conductivité thermique
 - capacité calorifique à pression constante
- Des perspectives de travail encore nombreuses : orientation des canaux, régime transitoire, basse pression, haute pression, singularité, ...
- Des nouveaux fluides déjà testés au CETHIL (HFOs) et des mélanges dans quelques mois (eau-éthanol)