

Efficacité énergétique des systèmes thermiques et frigorifiques : priorités de recherche dans le domaine du diphasique



Groupe : Energétique des Systèmes Thermiques et Frigorifiques

Rémi Revellin

Efficacité énergétique

➤ Efficacité **énergétique** =
$$\frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie fournie}}$$

Uniquement basé sur le 1^{er} principe

Energies du même type ou de types différents

Aucune référence à la qualité de l'énergie au sens du 2^d principe

➤ Rendement **exergétique** : revient à associer **quantité** et **qualité** de l'énergie et de ses diverses formes ou types.

Les processus spontanés tendent à détruire de l'exergie : c'est une conséquence du 2^d principe (transferts de chaleur, de matière, de quantité de mouvement, ...)

Etude exergétique  Etude des résistances aux transferts
Objet de la journée : diphase

Systemes thermiques et frigorifiques étudiés

Générateurs
thermiques

Dithermes
(PAC)

Trithermes
(PAC
absorption)

Moteurs
thermiques

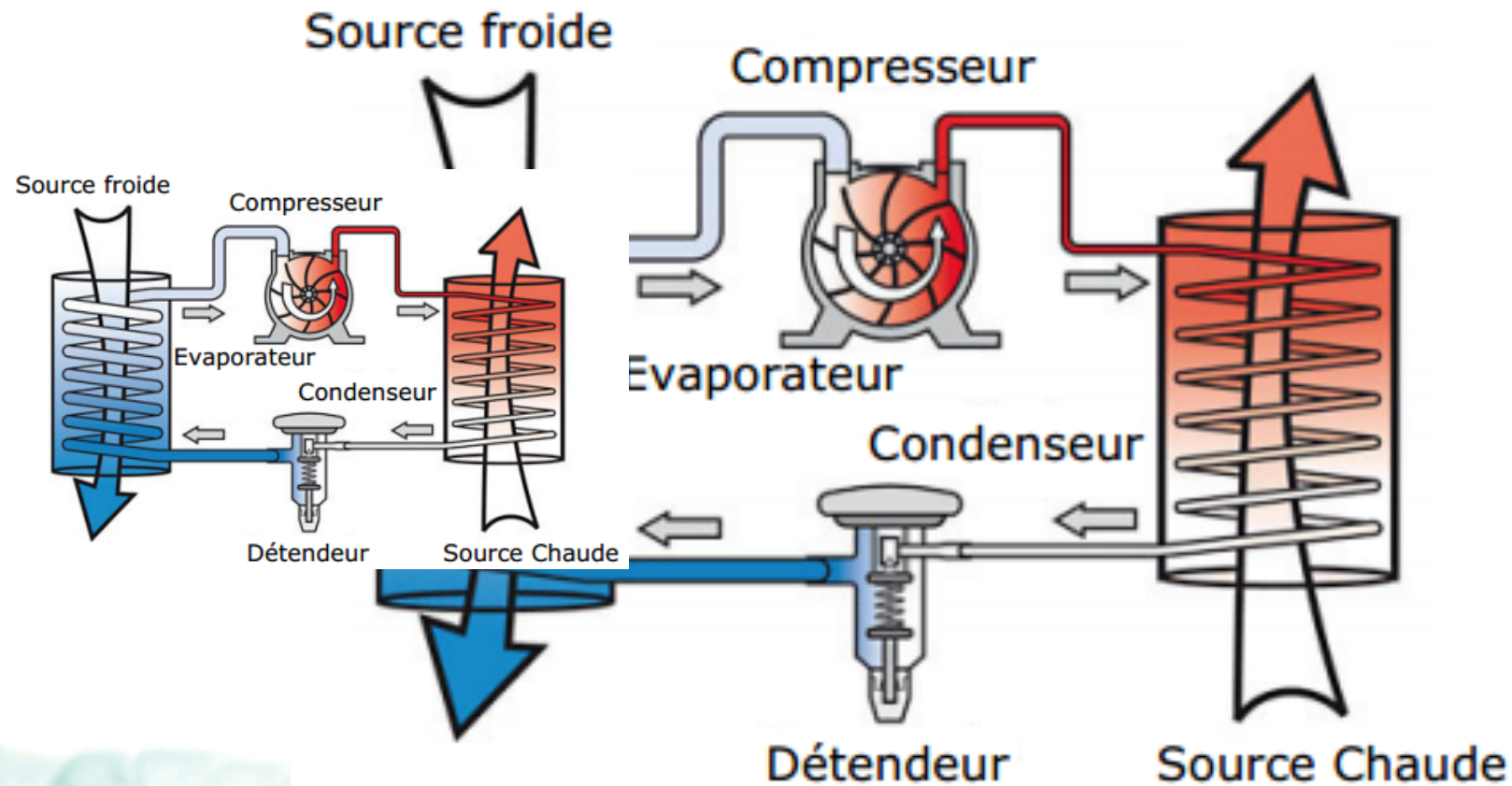
Cycles de
Rankine

Choix de ces 3 systèmes guidé par

- leur impact industriel
- la prise en compte de chgt de φ dans le cycle
- l'historique des thèmes traités au CETHIL

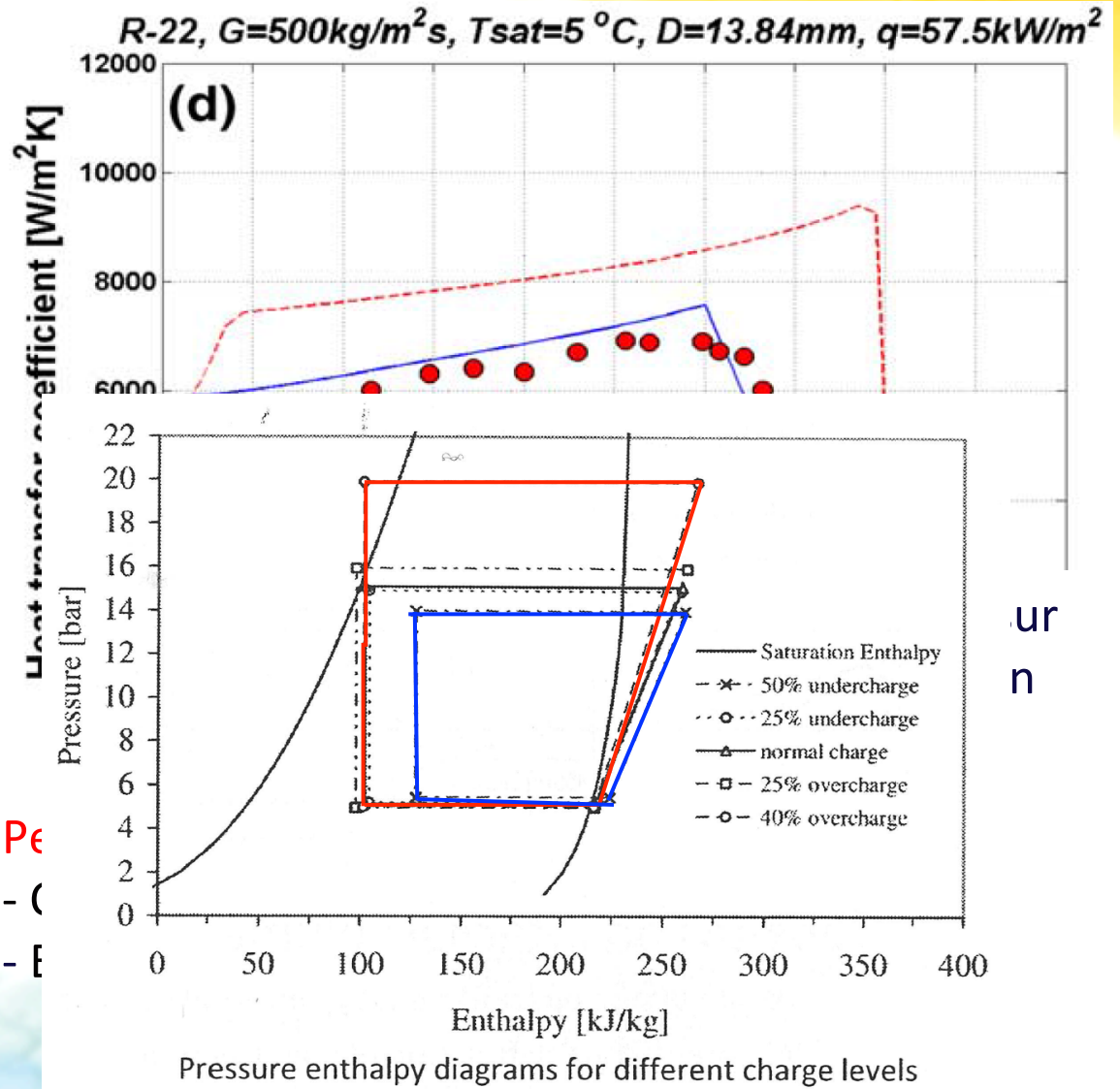
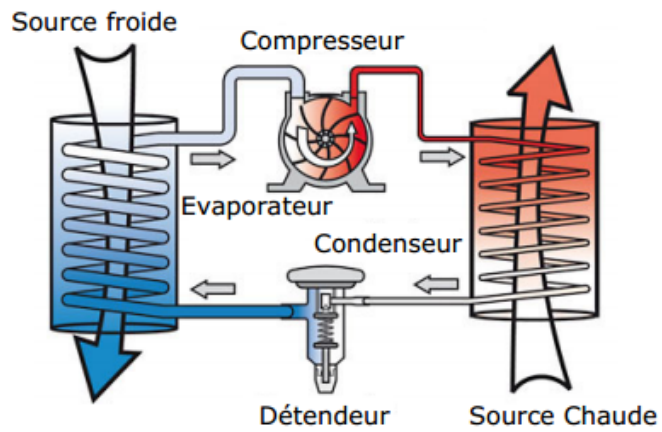
Objectif : identifier les priorités de recherche dans le domaine diphasique
inhérentes à ces 3 machines

Pompe à chaleur



Pompe à chaleur

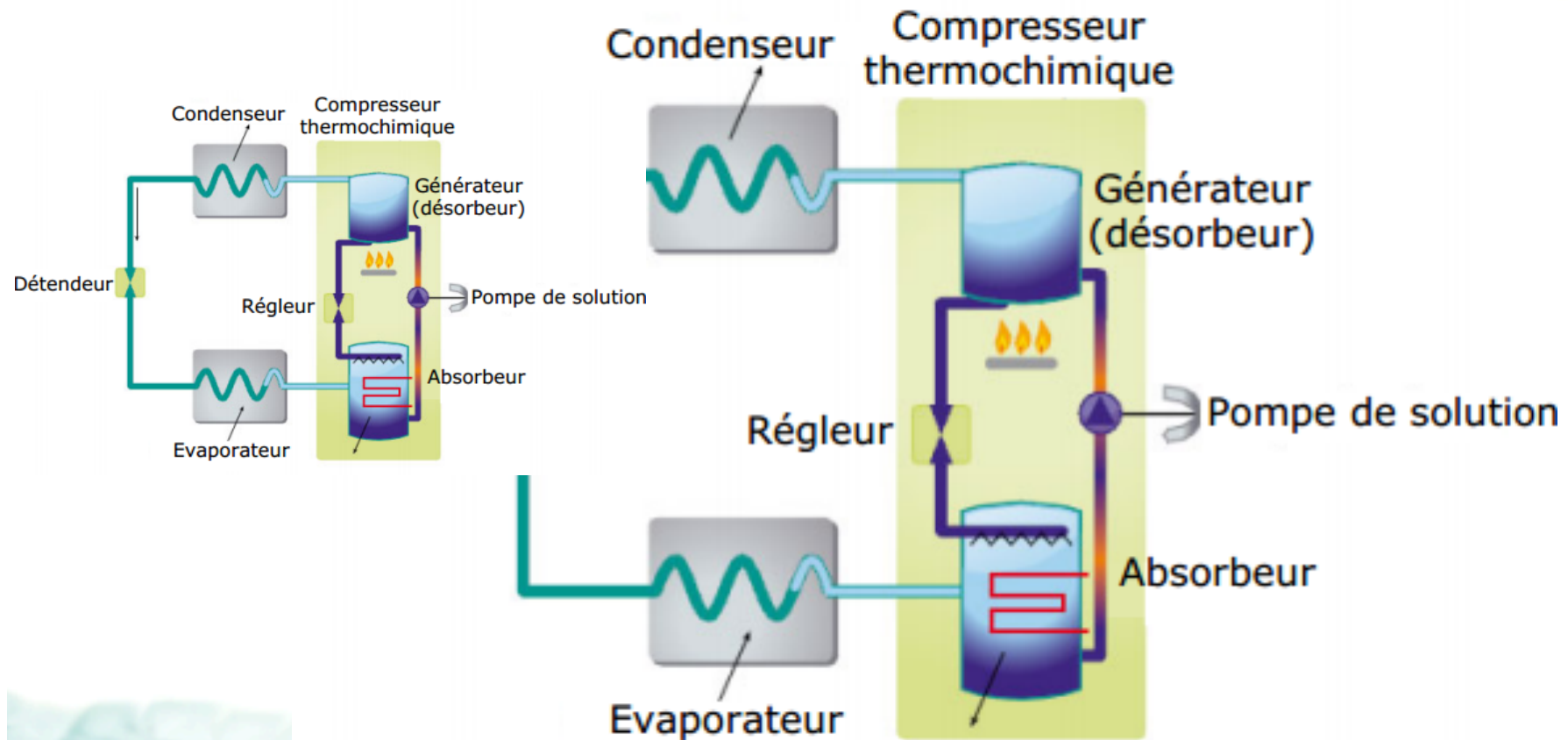
COA (ou COP) et η_{ex} peuvent être pénalisés



ur
n

Pe
- ()
- E

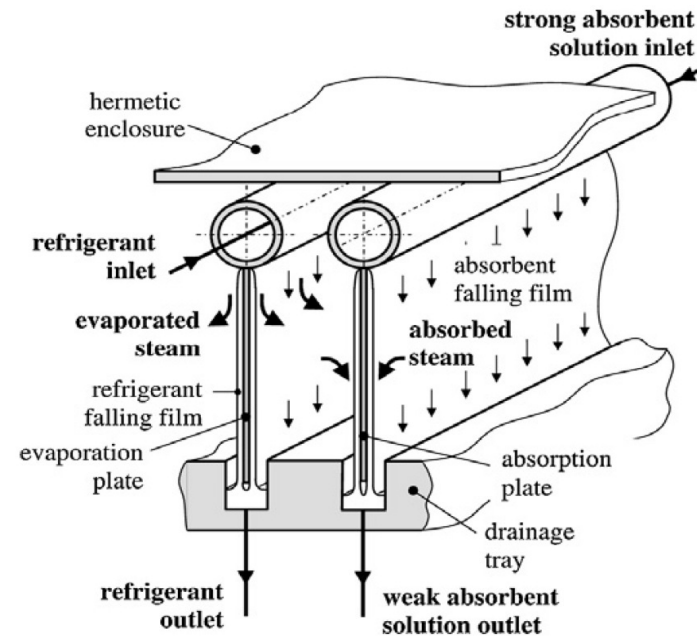
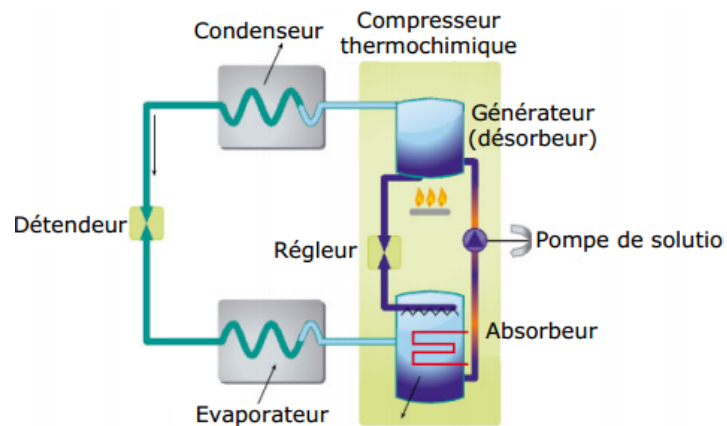
PAC Absorption



PAC Absorption

Très pénalisant

COA (ou COP) et η_{ex} peuvent être pénalisés



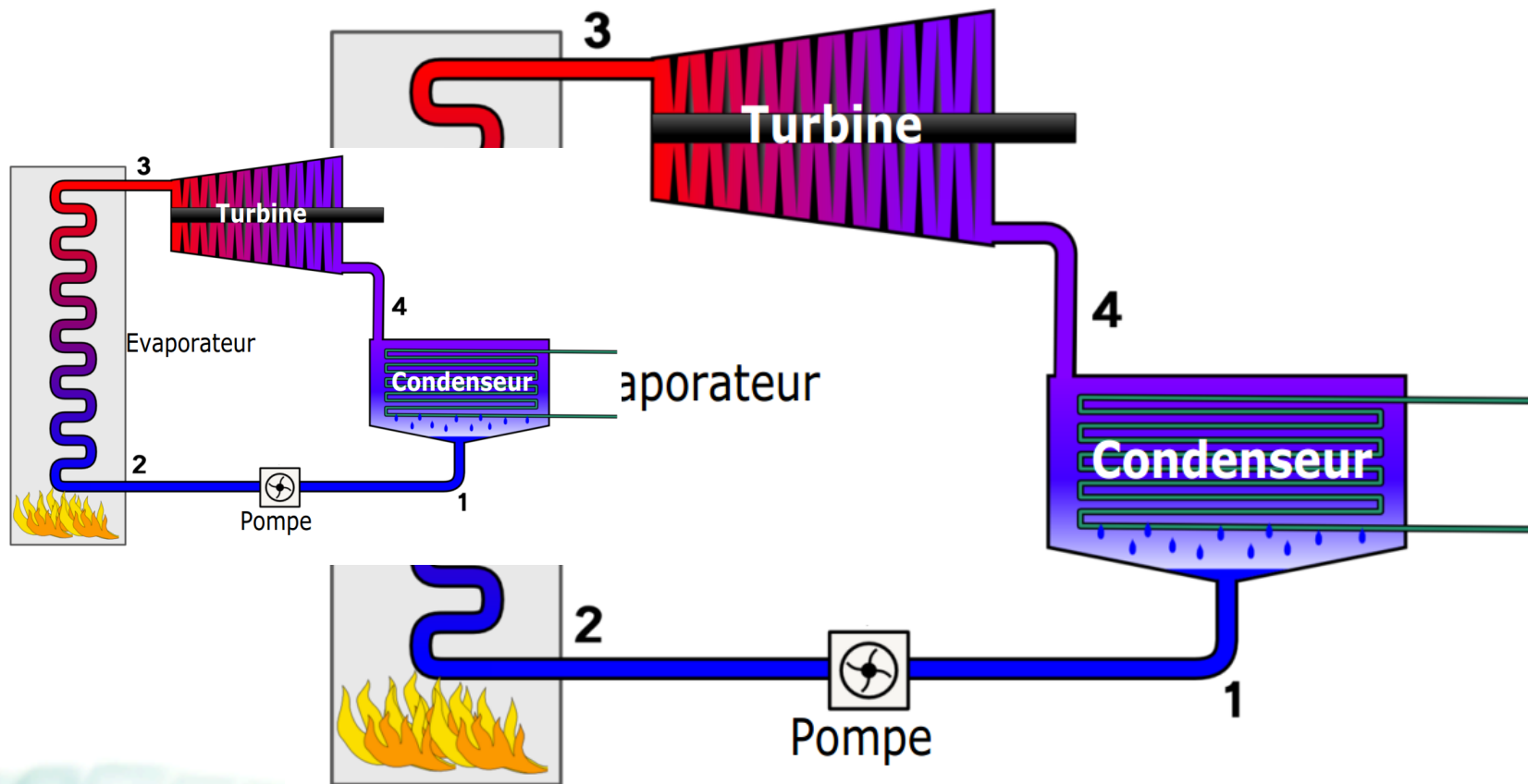
Evapo-absorbeur
(Zinet et al. 2012)

- Compresseur thermo-chimique :
 - Absorbeur (h et h_m)
 - Générateur : installation d'un séparateur (NH_3 - H_2O)

Peu pénalisant

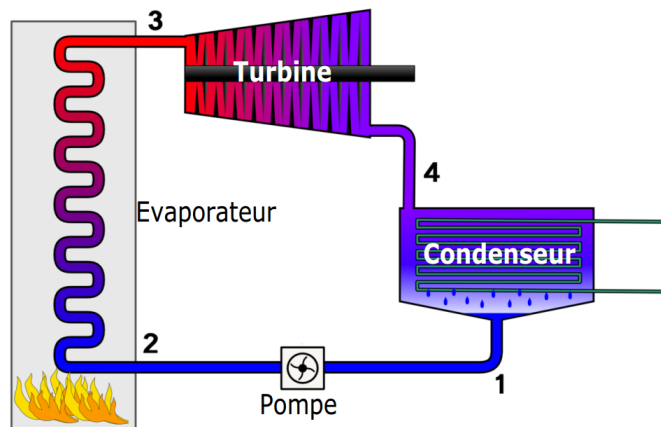
h en condensation, en évaporation et au générateur

Cycle de Rankine



Cycle de Rankine

η et η_{ex} peuvent être pénalisés



Très pénalisant

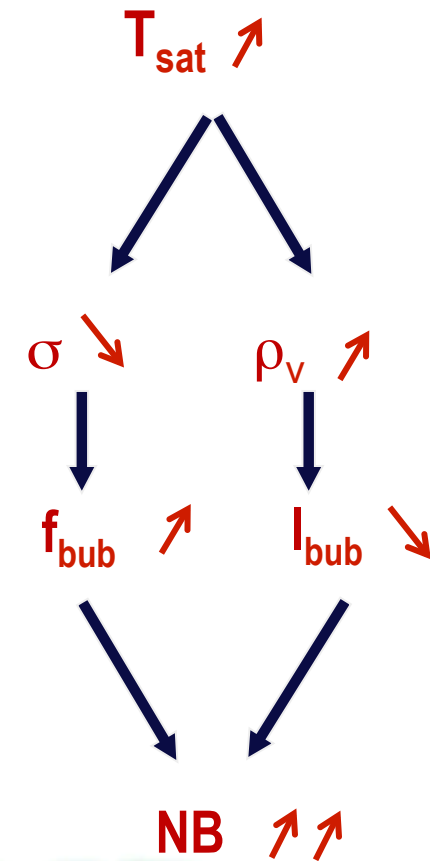
- Condenseur : Δp
- Evaporateur : h dans la zone asséchée
- Cavitation pompe : diminution du travail de la turbine (sous-refroidissement augmente)

Pénalisant

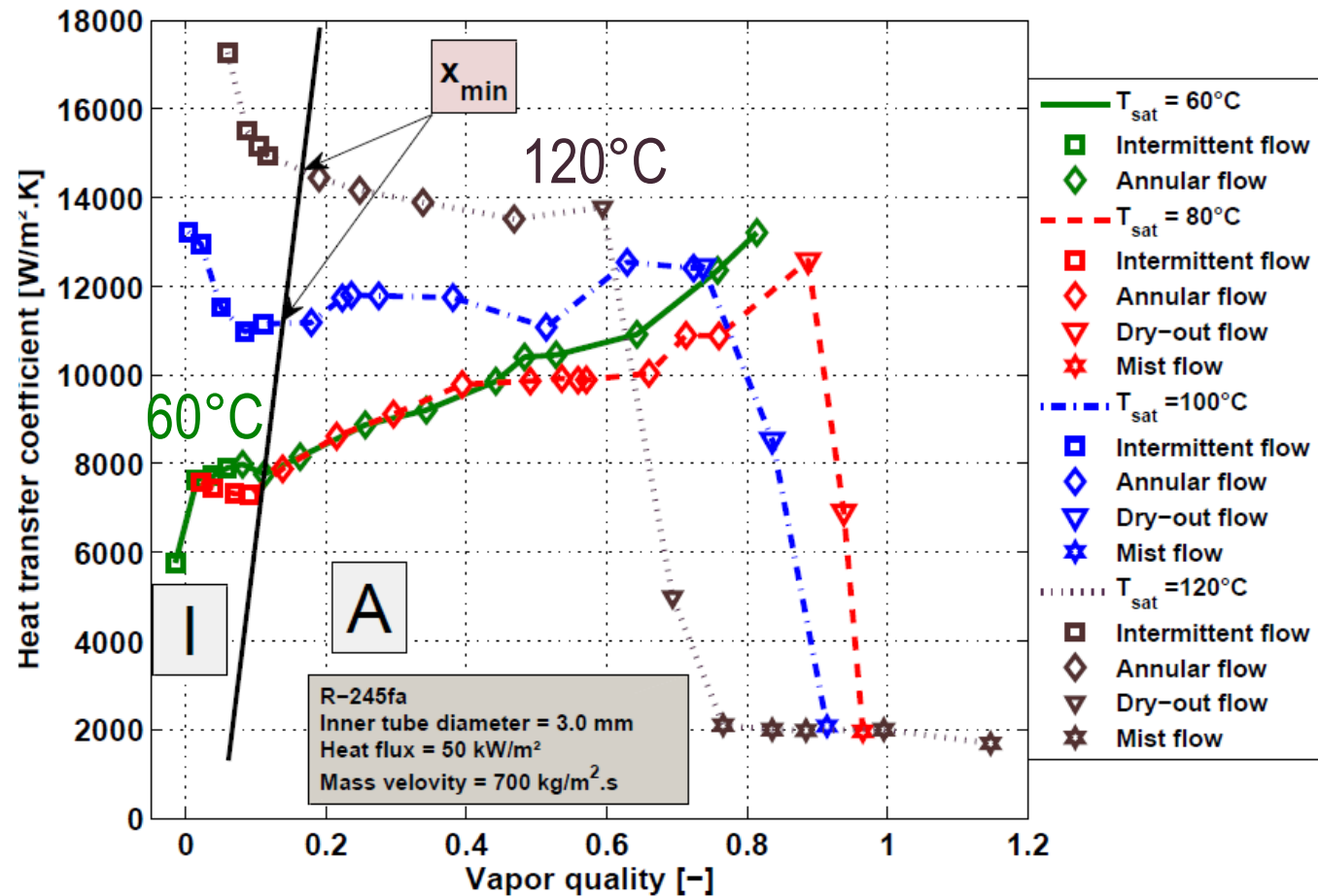
- Charge mal évaluée dans évaporateur et condenseur : ε
- Evaporateur et condenseur : h

Cycle de Rankine

Intermittent

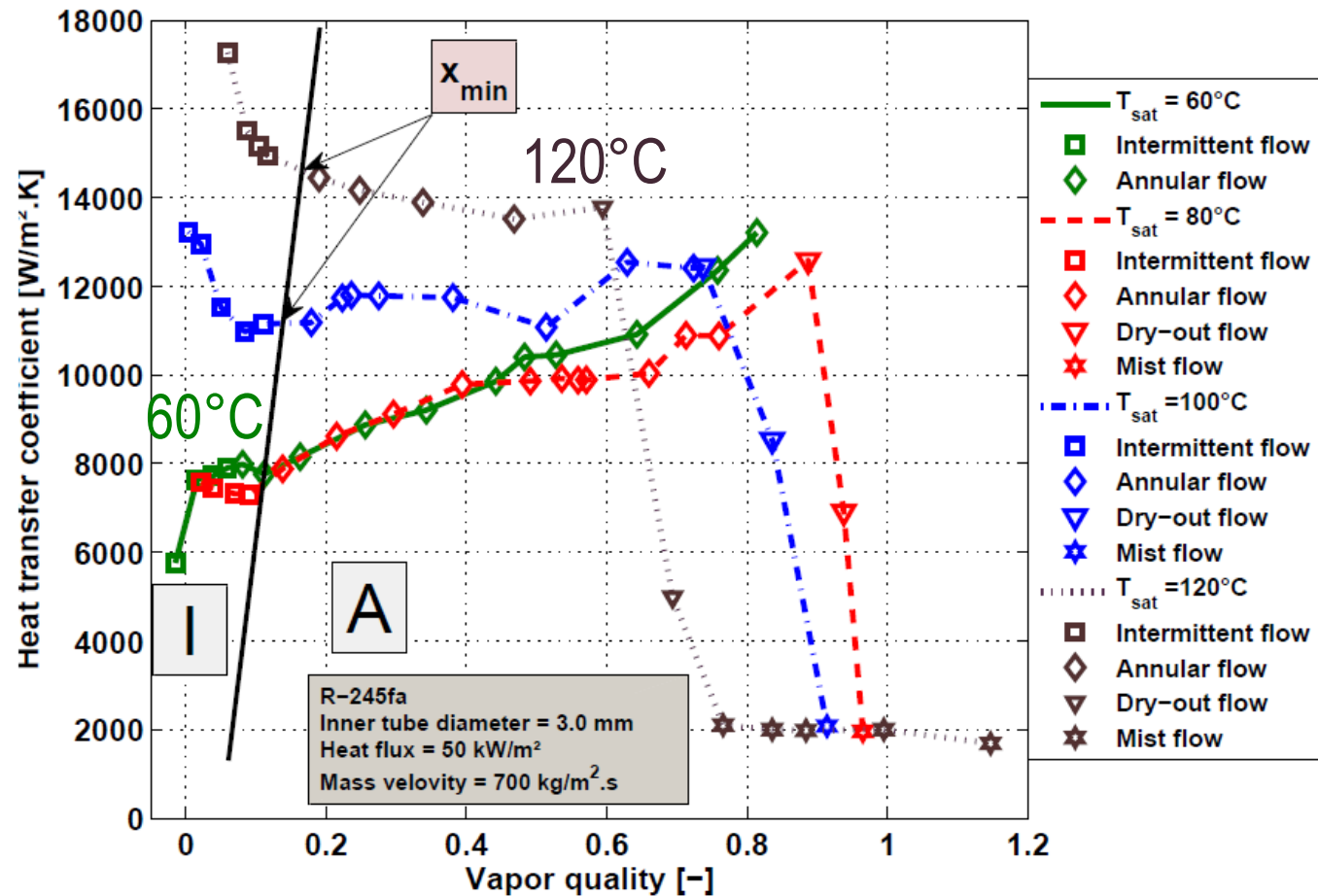
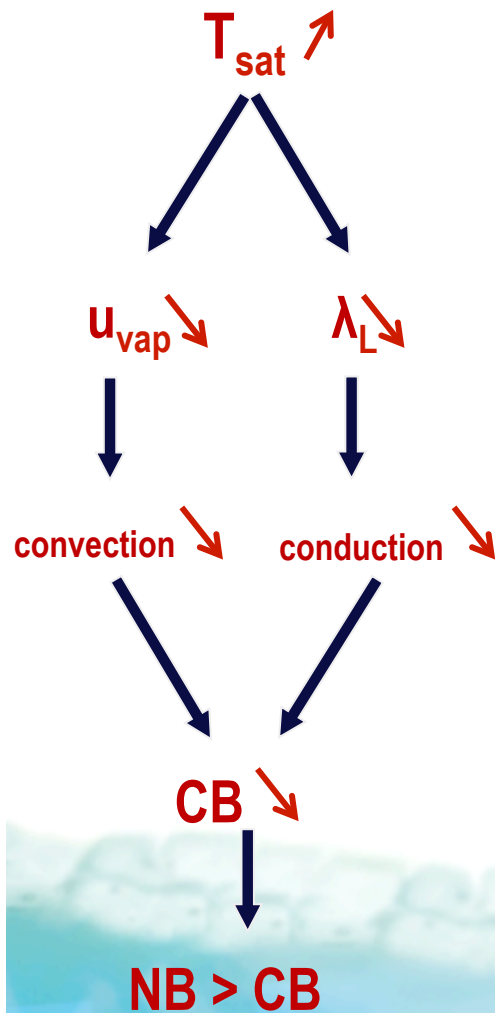


Régime dominant

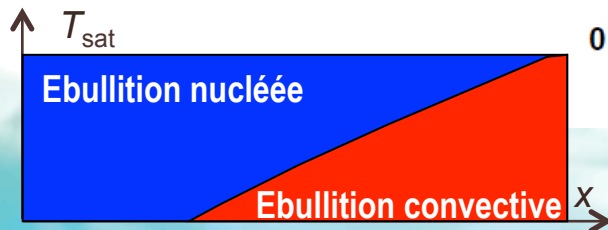
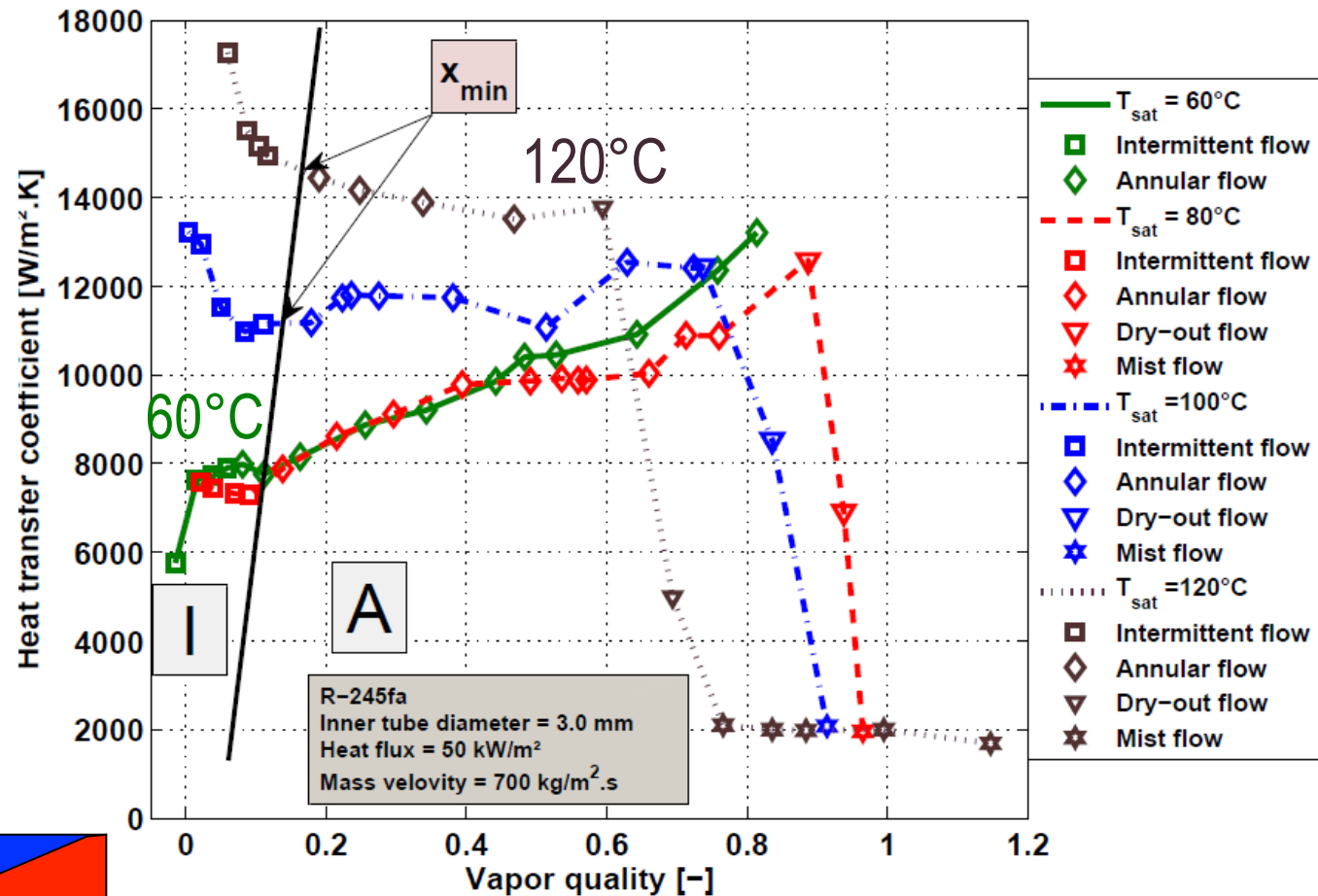


Cycle de Rankine

Annulaire



Cycle de Rankine



Synthèse



Priorités de recherche dans le domaine diphasique

Réponse à un **besoin** : production de chaud, de froid et d'électricité

Contraintes Techno/Ind.

- HFO, fluides naturels mélanges
- Présence d'huile, d'air
- Gravité, orientation
 - Confinement, singularités
- Structuration parois
- Régimes transitoires
- Températures

Systèmes : Rankine, PAC, PAC absorption, PAC éjection

Composants : évaporateur, condenseur, détendeur, (évapo)absorbeur, séparateur, éjecteur

Phénomènes macro : évaporation, ébullition, givrage, sorption, condensation, cavitation

Phénomènes locaux : métastabilité, mouillabilité, capillarité, diffusion, advection, compressibilité, interactions moléculaires, assèchement, entrainement, turbulence, instabilités, ...

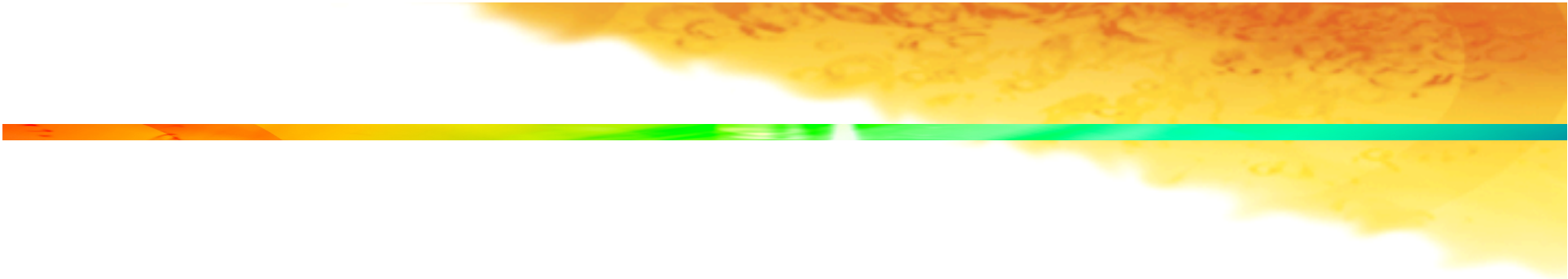
Phénomènes micro : échelle atomique

Disciplines

Thermique (avec ou sans chgt de φ), **thermodynamique** (éq. et hors éq.),
mécanique des fluides

Conclusions

- Systèmes actifs très répandus
- Une vue globale est nécessaire et complémentaire à une analyse locale pour éviter les fausses bonnes pistes
- Verrous scientifiques en diphasique très nombreux (givrage, sorption, ébullition, condensation, cavitation)
- Accroître les performances et l'efficacité énergétique des systèmes nécessite aussi de prendre en compte des écoulements avec changement de phase vapeur-solide ou vapeur-liquide-solide



Priorités de recherche dans le domaine diphasique à l'é

Transfert de chaleur avec chgt de phase

- Ebullition nucléée / ébullition convective
- Zone asséchée / entrainement gouttelettes
- Fluides naturels / HFO
- Transitoire
- Présence d'air

Transferts couplés de chaleur et de matière

- Mélanges de fluides (ébullition et condensation)
- Givrage ($\lambda(t)$, $\rho(t)$, $\delta(t)$ et D_{AB})
- Evapo-absorbeur

Métastabilité

- Surfusion (solidification)
- Sous-refroidissement (sublimation)
- Surchauffe (ébullition)
- Cavitation
- Conditions d'apparition du 1^{er} nucléus

Interactions fluide-surface

- Mouillabilité
- Structuration

Effet de la gravité

- Ecoulements diphasiques : stratification, orientation canal, transition micro-mini-macro
- Givrage plaques verticales : inhomogénéité

Confinement

- Givrage entre 2 plaques parallèles ou ailettes
- Ecoulements 2φ en microcanaux

Singularités

- Longueurs d'établissement écoulements 2φ
- Définition écoulement 2φ établi
- Evolution du taux de vide

Taux de vide

- Différence théorie/machine
- Microcanaux
- Entrainement, huile

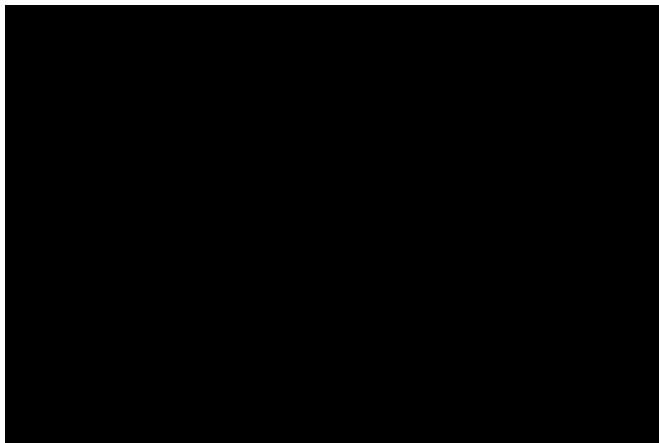
Pertes de charge

- Condensation basse pression
- Evapo-absorbeur

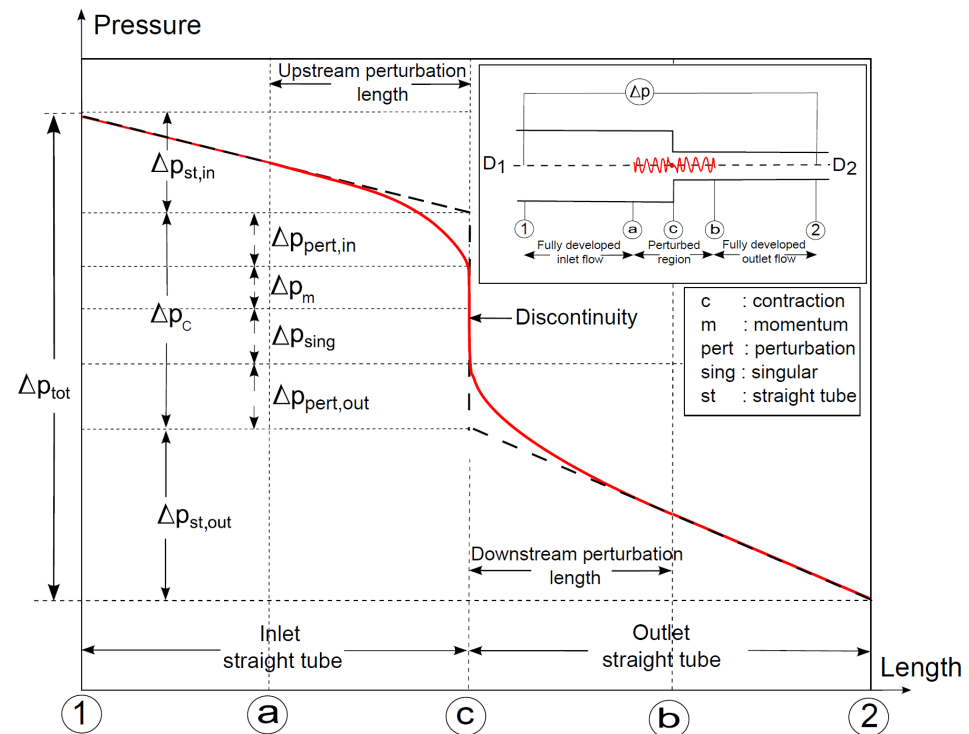
Turbulence, instabilités, flux critique...



Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités



Mesure et prédiction des pertes de charges dues à la contraction



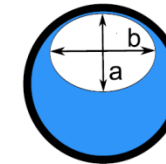
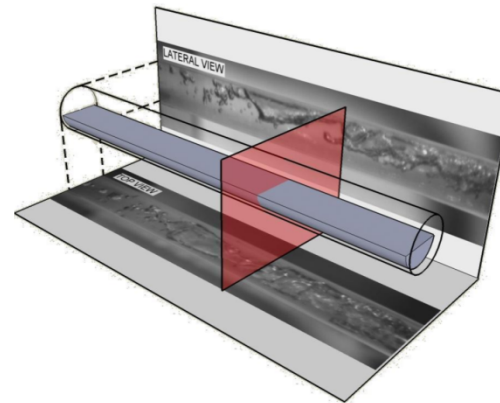
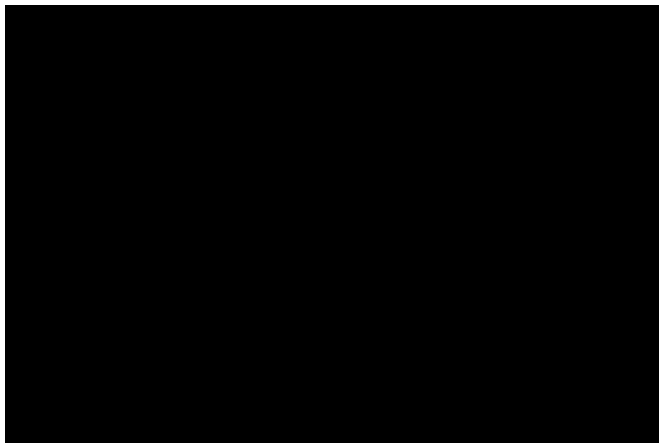
Problématique amont : Définition d'un écoulement diphasique établi ?



Quelles longueurs d'établissement ?



Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités

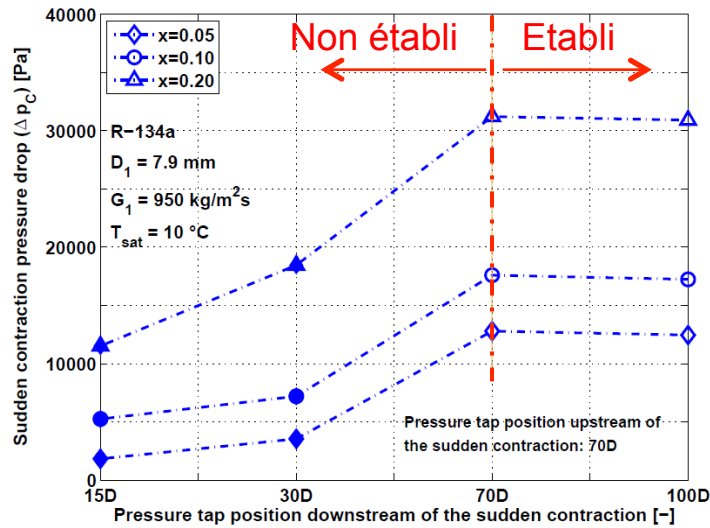


Section de passage de la vapeur

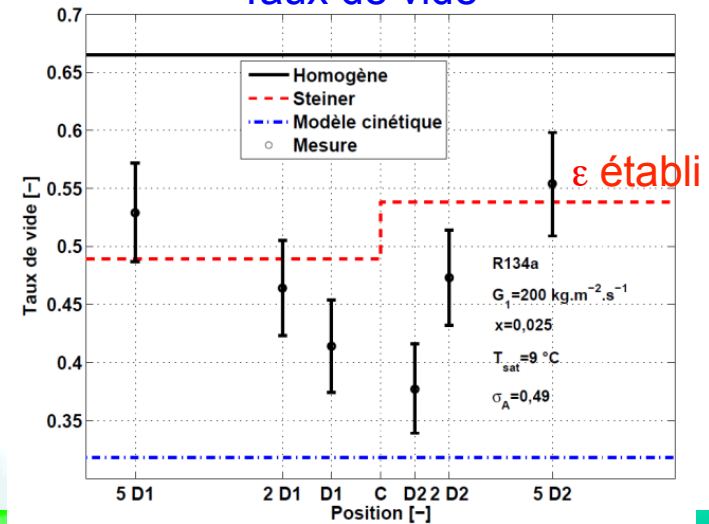
$$\varepsilon = \frac{A_v}{A_v + A_l}$$

Taux de vide

Pression



Taux de vide





Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités

Simulations numériques

Code Gerris (VOF)
Bulle de Taylor ascendante

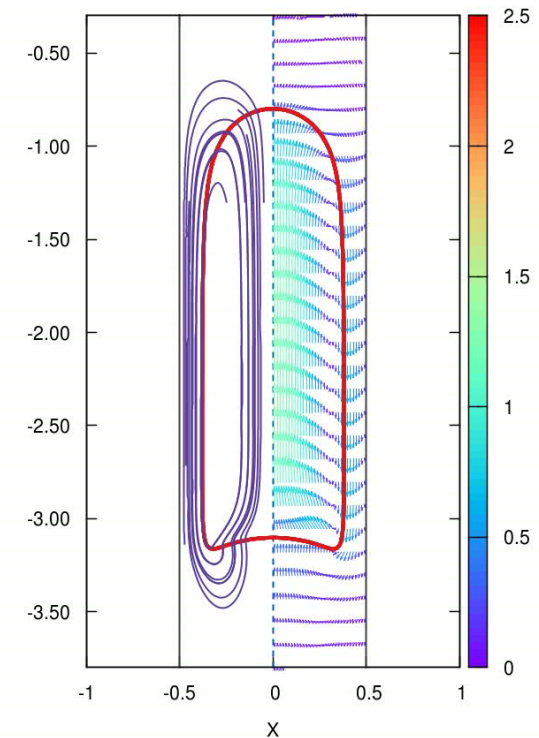
- Continuité $\nabla \mathbf{u} = 0$

- Quantité de mouvement

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right) + \rho \mathbf{g} + \sigma \kappa \delta_s \mathbf{n}$$

- Advection de la fraction de volume $\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla (c\mathbf{u}) = 0$

Validation sur un tube droit vertical
Expérimental-corrélation-numérique





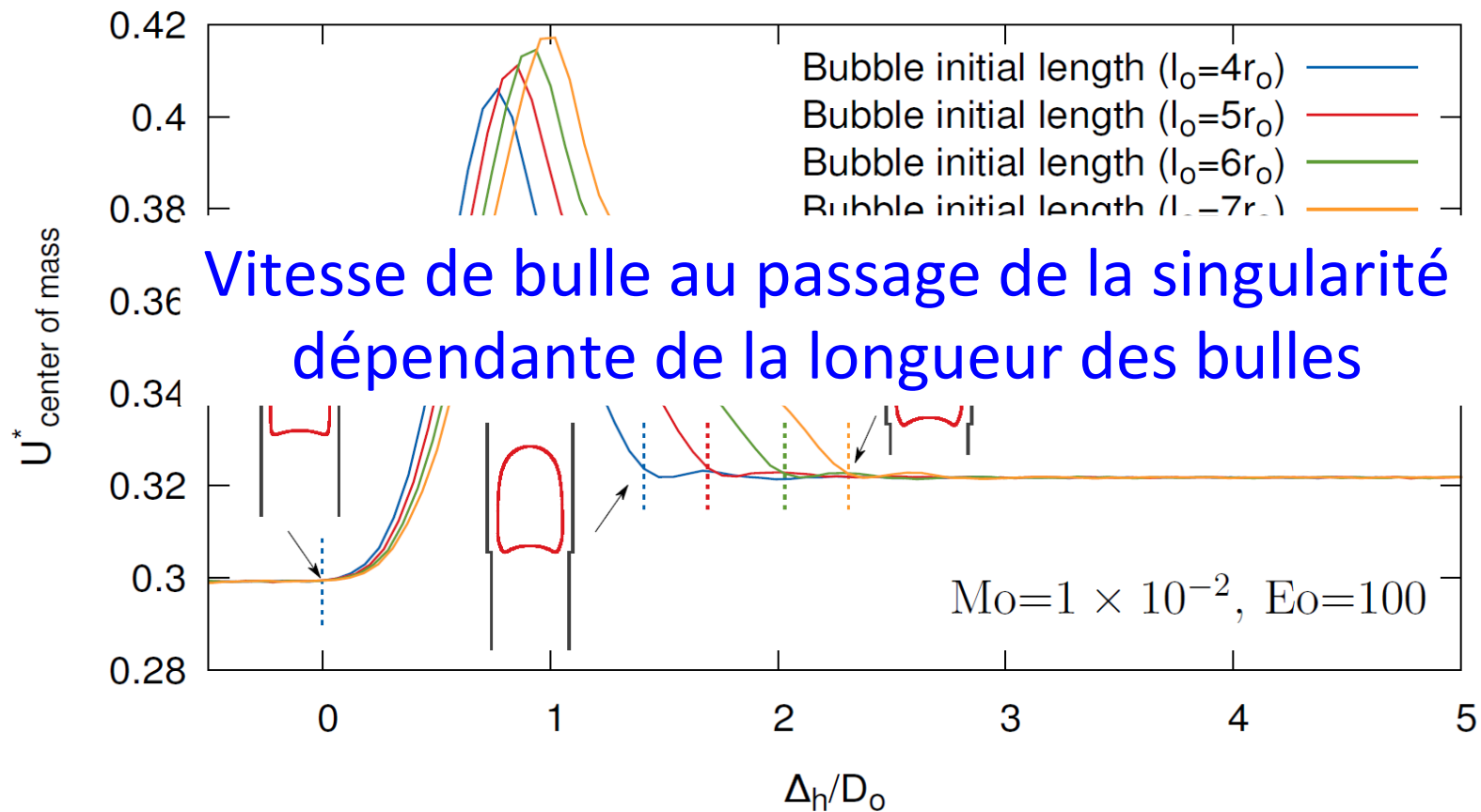
Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités

$$Mo = \frac{Eo^3}{Ga^4} = \frac{g\mu_l^4}{\rho_l\sigma^3}$$

Simulations numériques

Code Gerris (VOF)

Bulle de Taylor ascendante

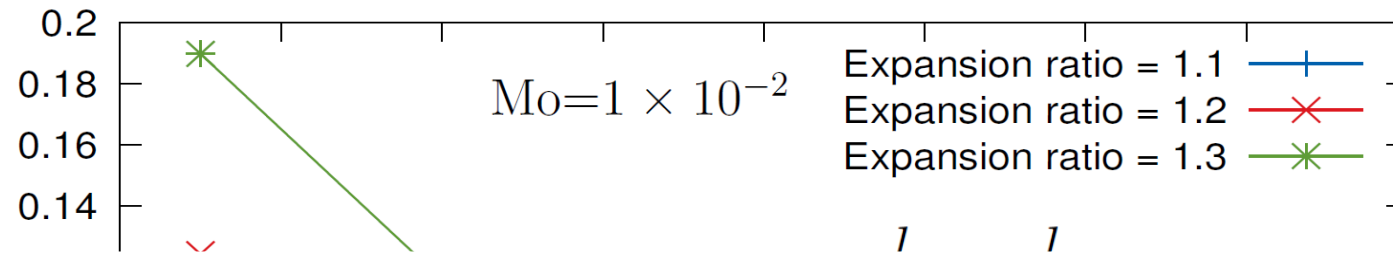




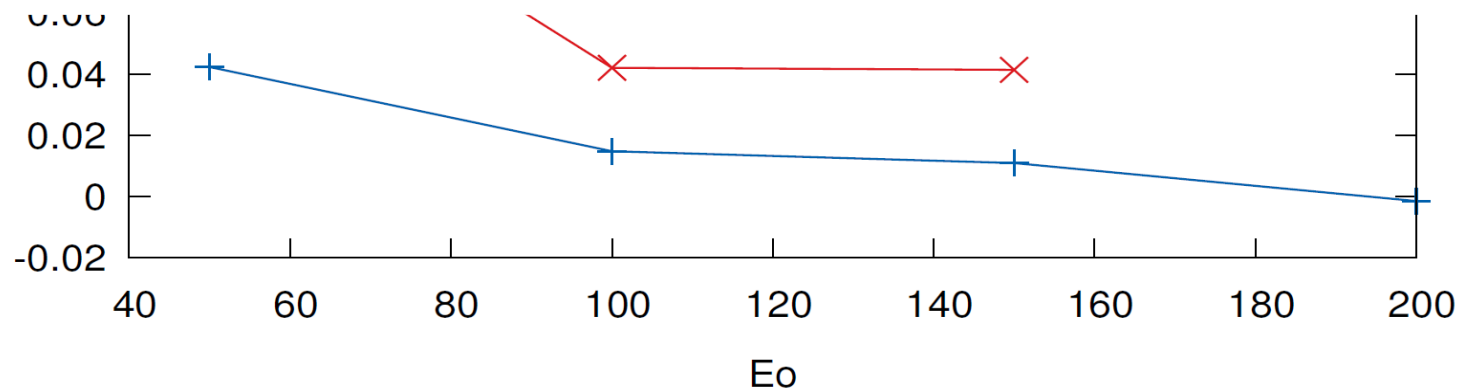
Écoulements diphasiques de frigorigènes dans les singularités

Simulations numériques

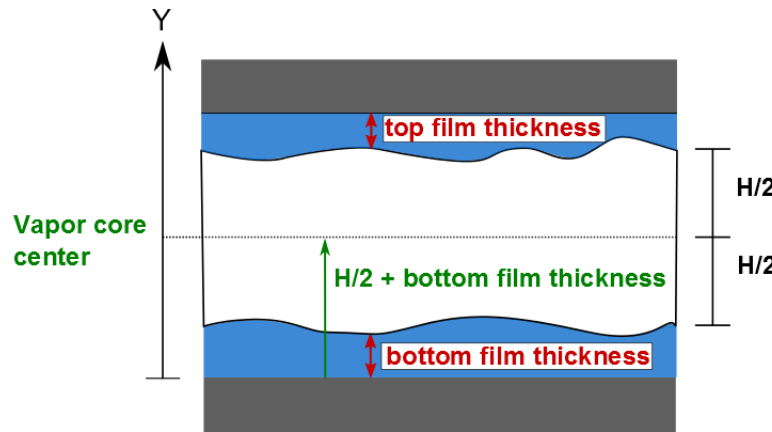
Code Gerris (VOF)
Bulle de Taylor ascendante



Temps d'établissement dû au passage de la bulle dans la singularité



Ebullition convective haute température



Excentricité $Ecc = \frac{\delta_{bottom} - \delta_{top}}{D}$

$Ecc \rightarrow 0$: centrage de la vapeur

$Ecc \rightarrow 1$: stratification

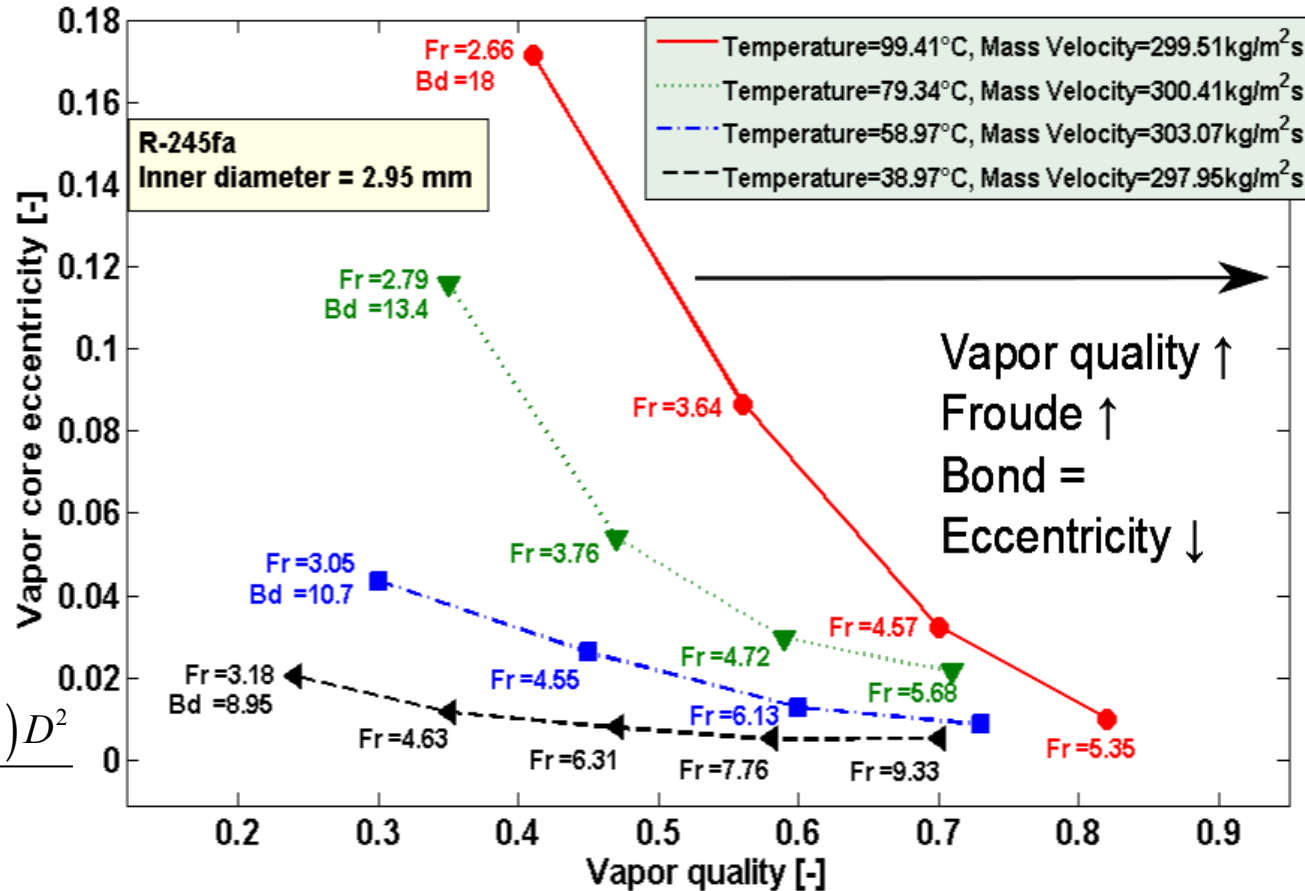
$$Bd = \frac{\text{forces de gravité}}{\text{forces de tension de surface}} = \frac{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D^2}{\sigma} \quad 9.21 < Bd < 19.27$$

$$Fr = \frac{\text{forces d'inertie}}{\text{forces de gravité}} = \frac{\frac{x \cdot G}{\sqrt{\rho_{vap}}}}{\sqrt{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D}} \quad 0.5 < Fr < 10.86$$

Ebullition convective haute température

$$Ecc = \frac{\delta_{bottom} - \delta_{top}}{D}$$

Donniacuo et al. 2015 : écoulement annulaire



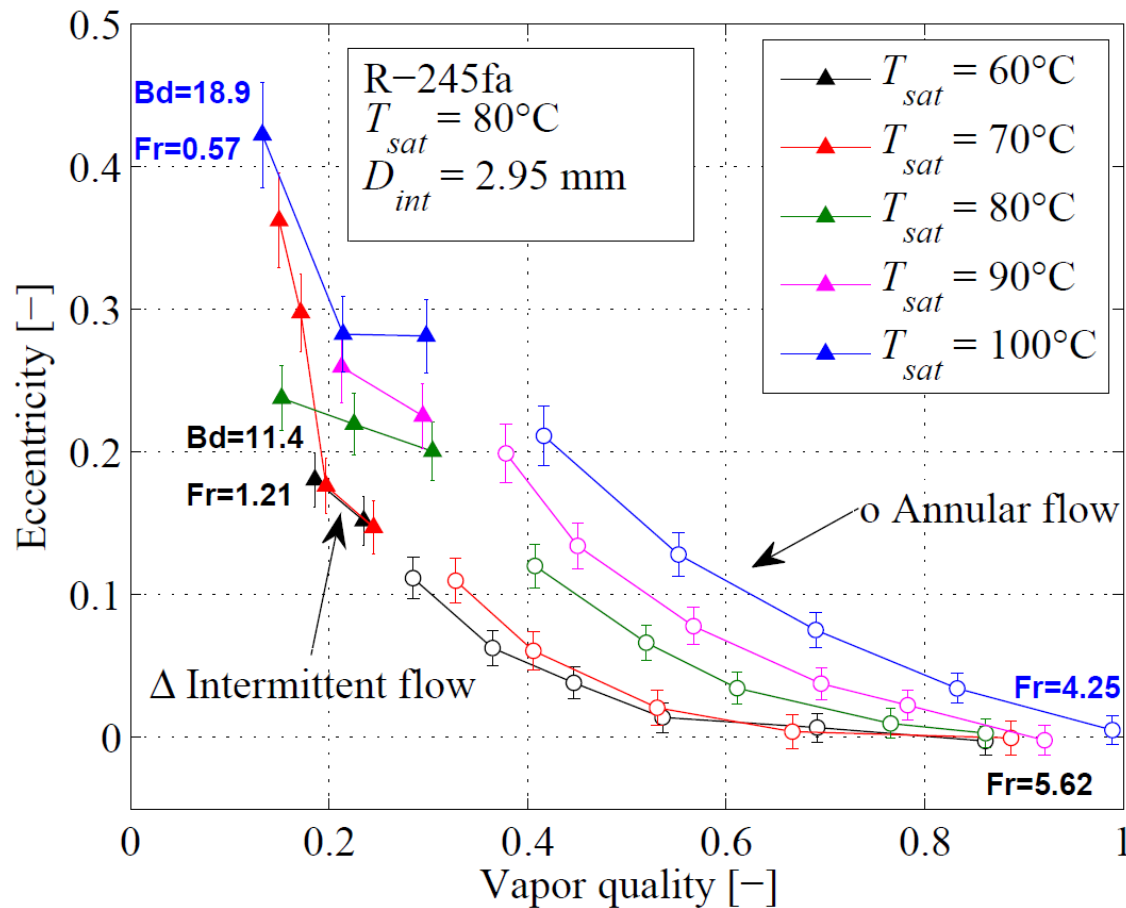
$$Bd = \frac{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D^2}{\sigma}$$

$$Fr = \frac{x \cdot G}{\sqrt{\rho_{vap} \cdot g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D}}$$

Ebullition convective haute température

$$Ecc = \frac{\delta_{bottom} - \delta_{top}}{D}$$

Nouveaux points de données en annulaire et intermittent

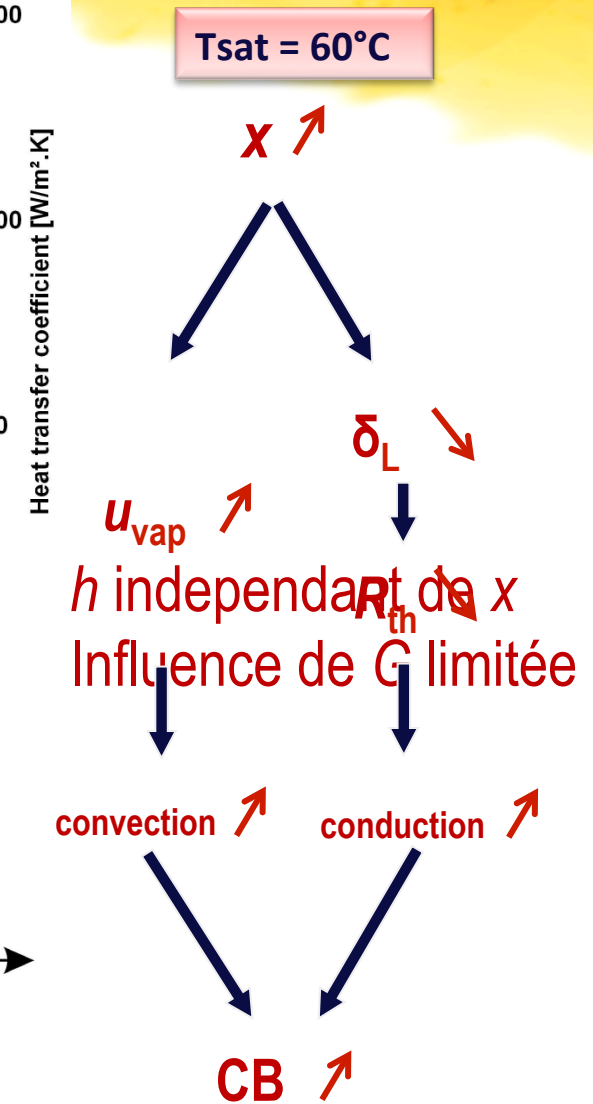
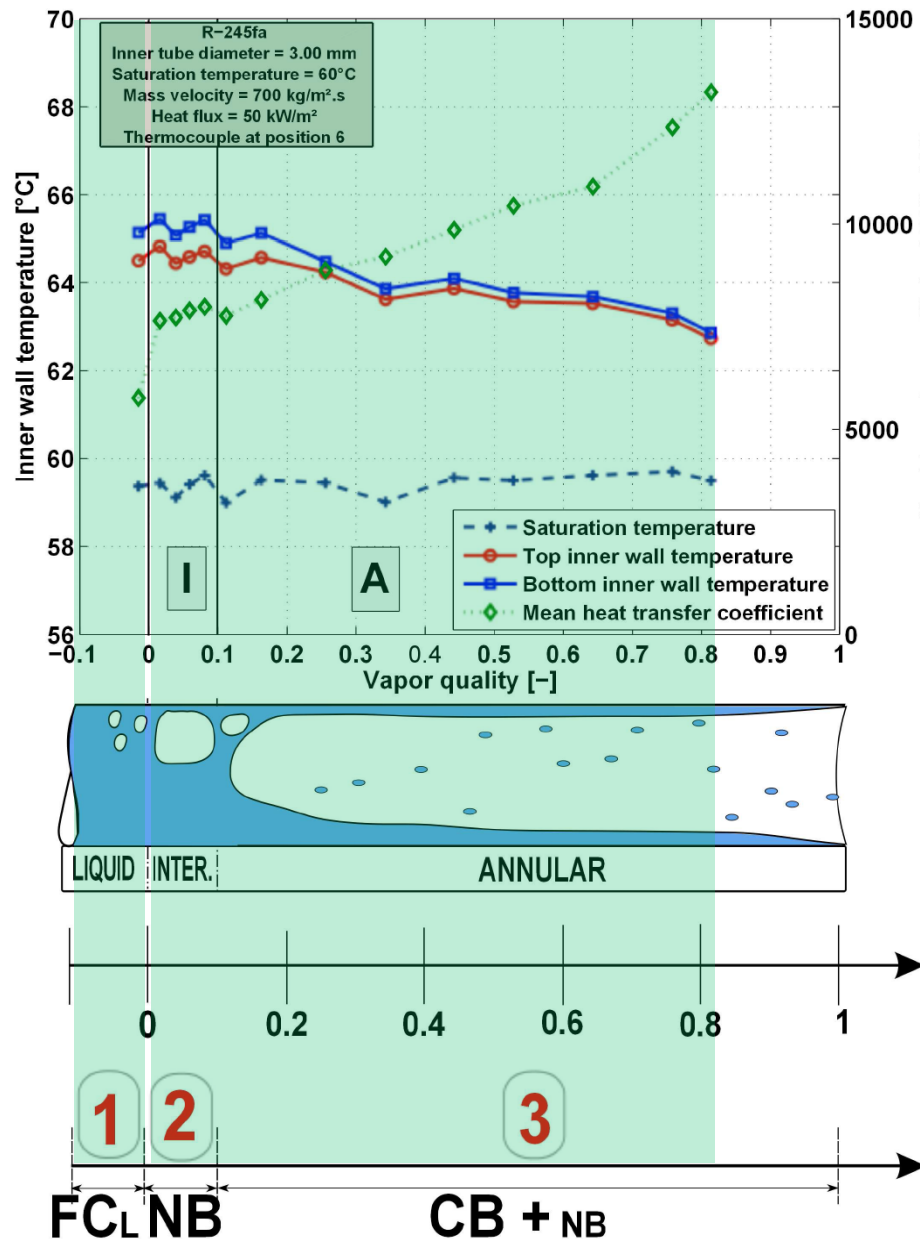


$$Bd = \frac{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D^2}{\sigma}$$

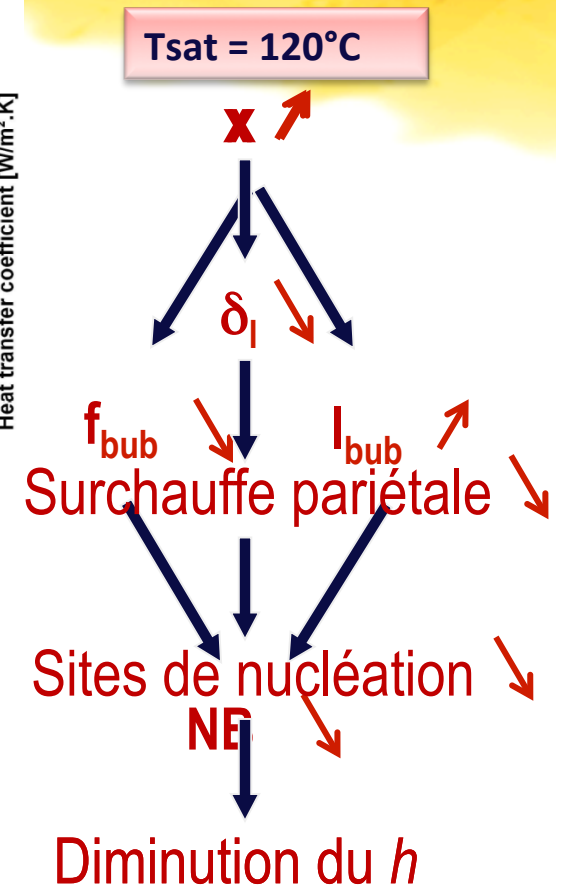
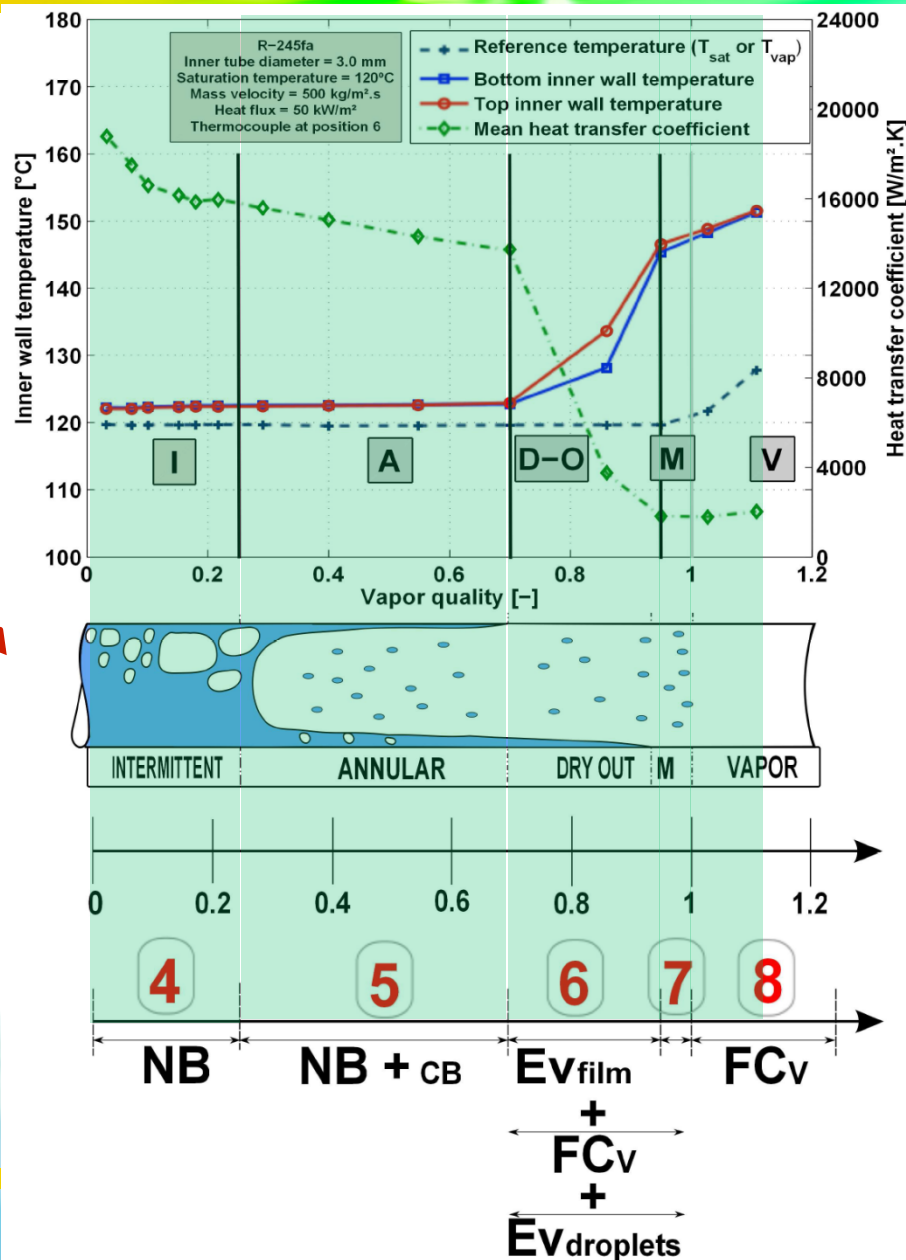
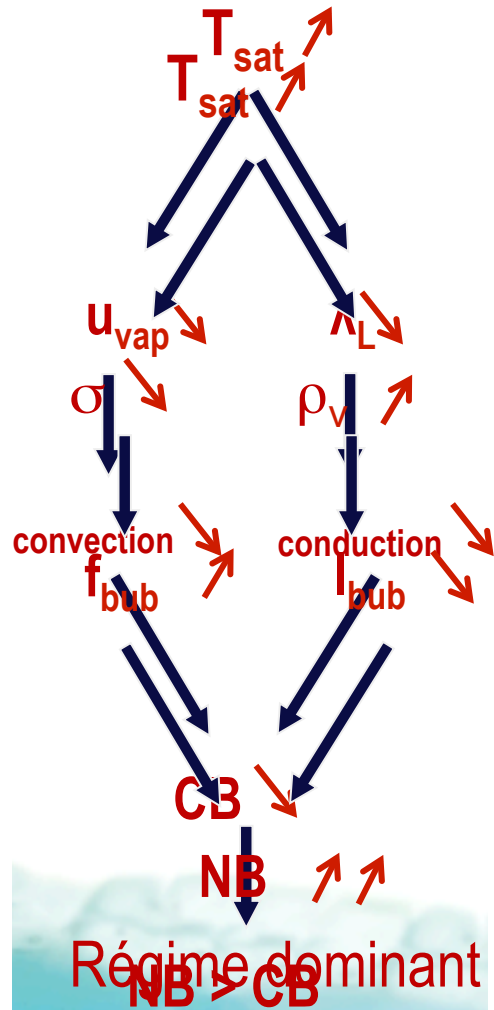
$$Fr = \frac{x \cdot G}{\sqrt{\rho_{vap}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{g \cdot (\rho_{liq} - \rho_{vap}) D}}$$

Vers des critères de transition micro-mini-macro

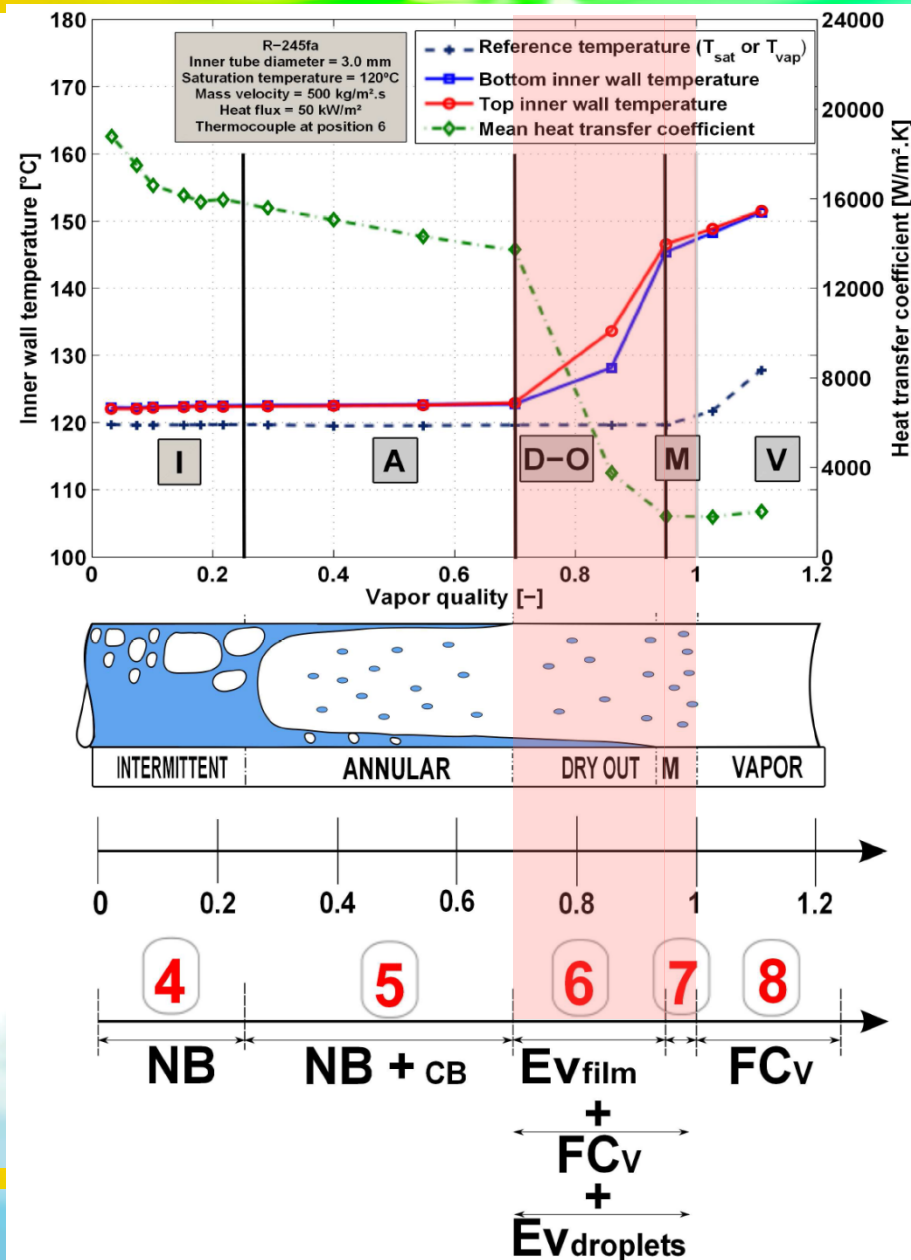
Ebullition convective haute température



Ebullition convective haute température



Ebullition convective haute température



Ebullition convective haute température

Problématiques scientifiques liées à l'assèchement et au régime à brouillard

- Stratification : compétition entre gravité et inertie (nombre de Froude), pompage du liquide
- Entrainement : arrachement et déposition des gouttelettes
- Turbulence de la phase vapeur : influence sur la vitesse des gouttelettes et la fragmentation
- Taille, dispersion et vitesse des gouttelettes
- Régimes instables : couplage entre les caractéristiques interne et externe
- Surchauffe de la paroi à flux imposé et conduction axiale et radiale
- Surchauffe de la vapeur :

thermo irréversible montre que $q=h(T_w-T_v)$

$$dx = \frac{\frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}_t} - x c_{p,v} dT_v}{h_v(p_v, T_v) - h_l(p_{sat}, T_{sat})}$$

