



SOCIETE FRANCAISE DE THERMIQUE
Groupe thématique « ECHANGEURS »

Journée thématique – Jeudi 26 janvier 2023

***Échangeurs thermiques et multi-fonctionnels :
récents développements et perspectives***

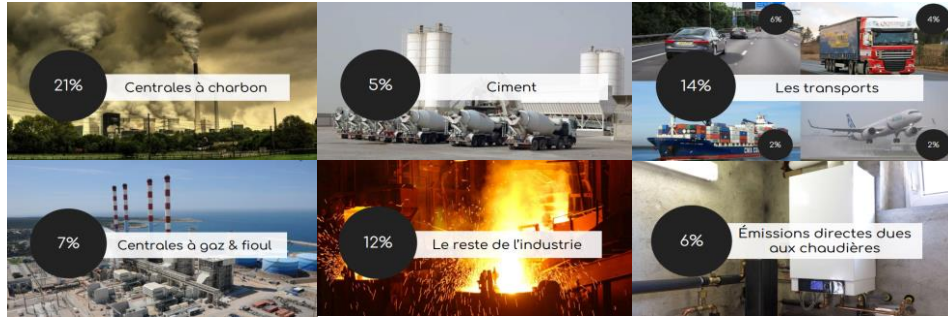


**Etude expérimentale d'un échangeur à
condensation à mini-canaux**

Nam LE, Dominique COUTON*, Matthieu FENOT, Frédéric PLOURDE

***Institut P' (UPR CNRS 3346) – Dépt. FTC – Equipe COST (Convection,
Optimisation, Systèmes Thermiques)***



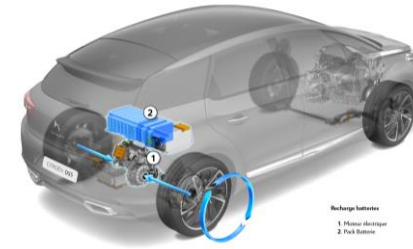


Principales sources de pollutions en France : émissions de GES par secteur (Source : ADEME 17)

L'un des enjeux de la **transition énergétique** : réduction de la consommation énergétique de tous les **procédés industriels**.

Les **échangeurs thermiques** interviennent dans de nombreux procédés.

Transfert thermique plus efficace ?



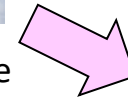
Gestion de la thermique des batteries par systèmes monophasiques et diphasiques (PSA 2019-2023)



Gestion de la condensation de vapeur d'eau dans les packs de conditionnement d'air sur échangeurs compacts (Liebherr Aerospace 2002-2022)

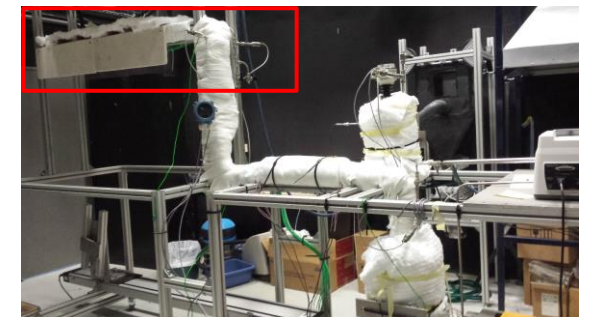


Identification d'un système permettant de refroidir un système embarqué : gestion au niveau du turboréacteur (Airbus 2015-2018)



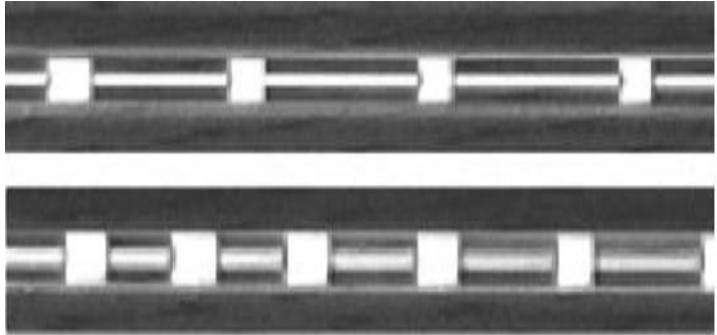
Solution : Boucle diphasique avec changement de phase de vapeur d'eau en minicanaux ...

Condenseur



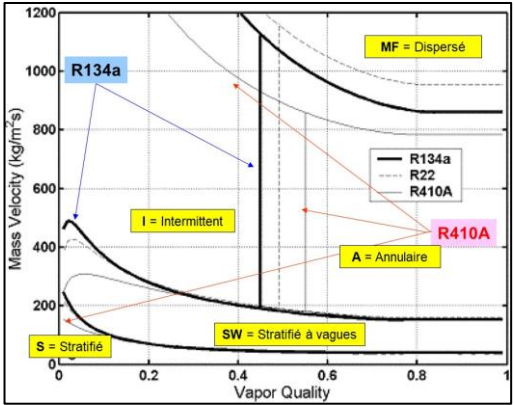
Littérature scientifique → Fluides frigorigènes ?

- ❖ Cavallini et Zecchin (1974) [1] : R11, R12, R21, R22, etc.
- ❖ Haraguchi et al. (1994) [2] : R22, R134a et R123
- ❖ Dobson et Chato (1998) [3] : R12, R22, R134a et R32/R125
- ❖ Tran et al. (2000) [4] : R12, R113 et R134a
- ❖ Cavallini et al. (2001) [6] : R22, R32, R125, R134a, etc.
- ❖ Wilson et al. (2003) [7] : R134a et R410A
- ❖ Park et al. (2011) [8] : R1234ze(E)
- ❖ Bohdal et al. (2011) [9] : R134a et R404A



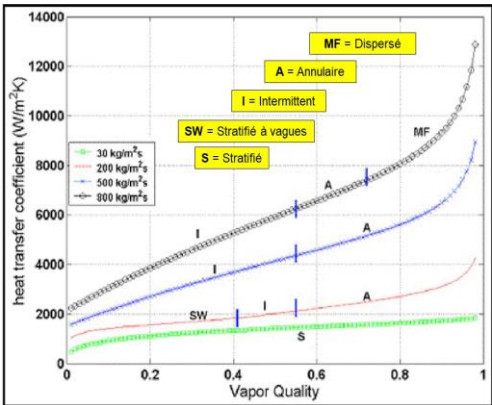
Serizawa et al. (2002)

4 - Topologie d'écoulement



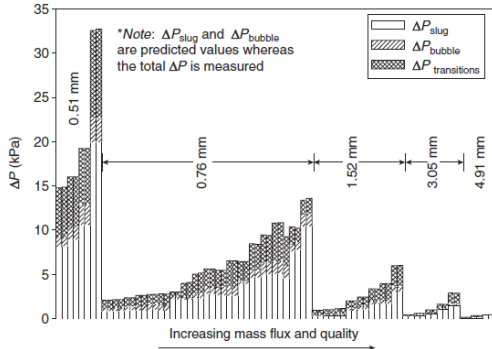
Muzzio et al. (1998)

1 - Cartographie des régimes d'écoulement



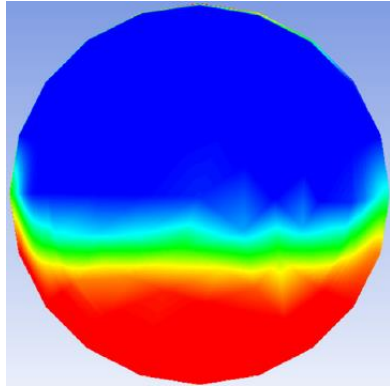
Muzzio et al. (1998)

2 - Coefficient d'échange moyen



Coleman et al. (2003)

3 - Perte de charge

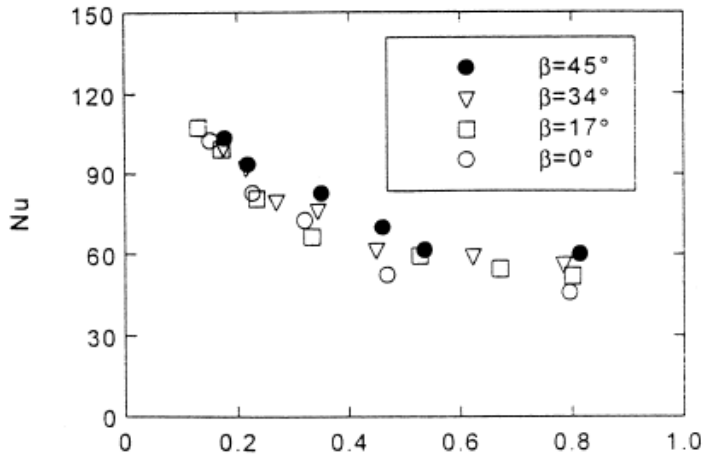


Abadi et al. (2018)

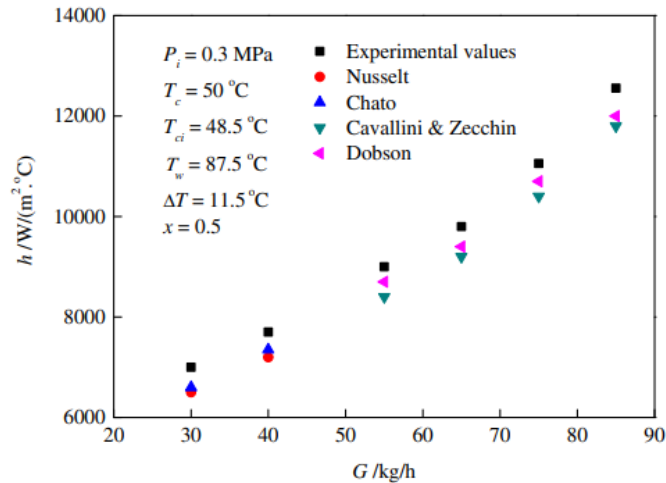
5 - Simulation numérique de la condensation dans un tube

Littérature scientifique → Eau ?

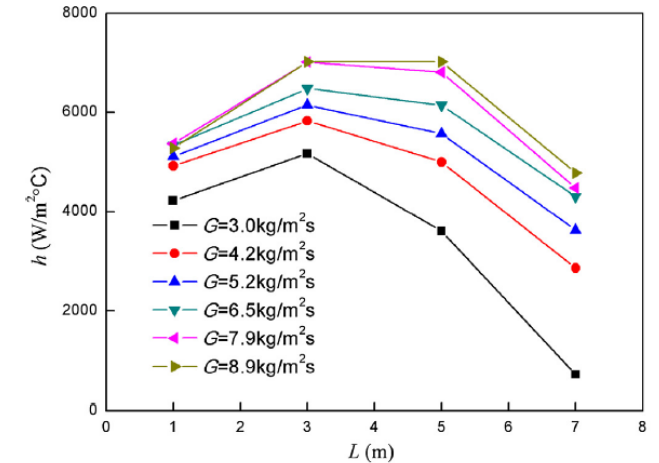
[5] Bu-Xuan WANG et Xiao-Ze DU. « Study on laminar film-wise condensation for vapor flow in an inclined small/mini-diameter tube ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 43.10 (mai 2000), p. 1859-1868.



[10] Y. Wang et al. « Heat transfer characteristics of steam condensation flow in vacuum horizontal tube ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 108 (2017), p. 128-135.



[11] Juan SHI, Gonghang ZHENG et Zhenqian CHEN. « Experimental investigation on flow condensation in horizontal tubes filled with annular metal foam ». en. In : International Journal of Heat and Mass Transfer 116 (2018), p. 920-930.



(1) $\Delta T_{s,c} = 3^\circ\text{C}$

- Ecoulement laminaire ^{1-x}
- Mini-canal : $1,94 < d < 4,98 \text{ mm}$**
- Inclinaison β
- 3 températures / échangeur : global
- $Nu = f(d, G, x, \beta)$**

- Ecoulement laminaire
- Macro-canal : $d = 18 \text{ mm}$**
- 6 températures / échangeur : global
- $h = f(G, z, \Delta T_{sat})$**

- Ecoulement avec couche métallique poreuse
- Macro-canal : $d = 9,52 \text{ mm}$**
- 4 températures locales x 9 positions longitudinales
- $h = f(G, z, \theta)$**

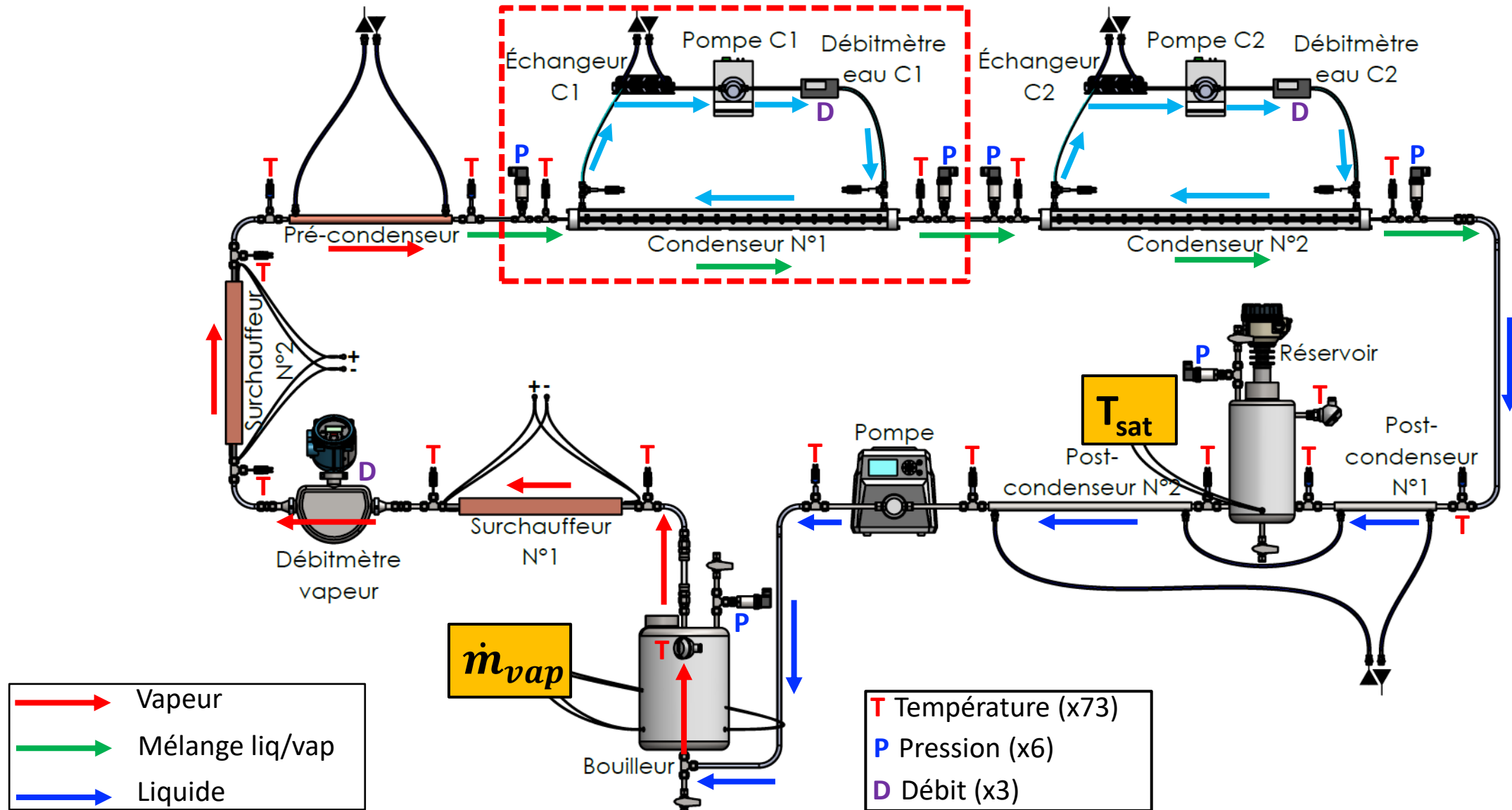
➤ **Peu d'études sur l'eau** comme fluide de travail en mini-canal

➤ Mesures généralement globales

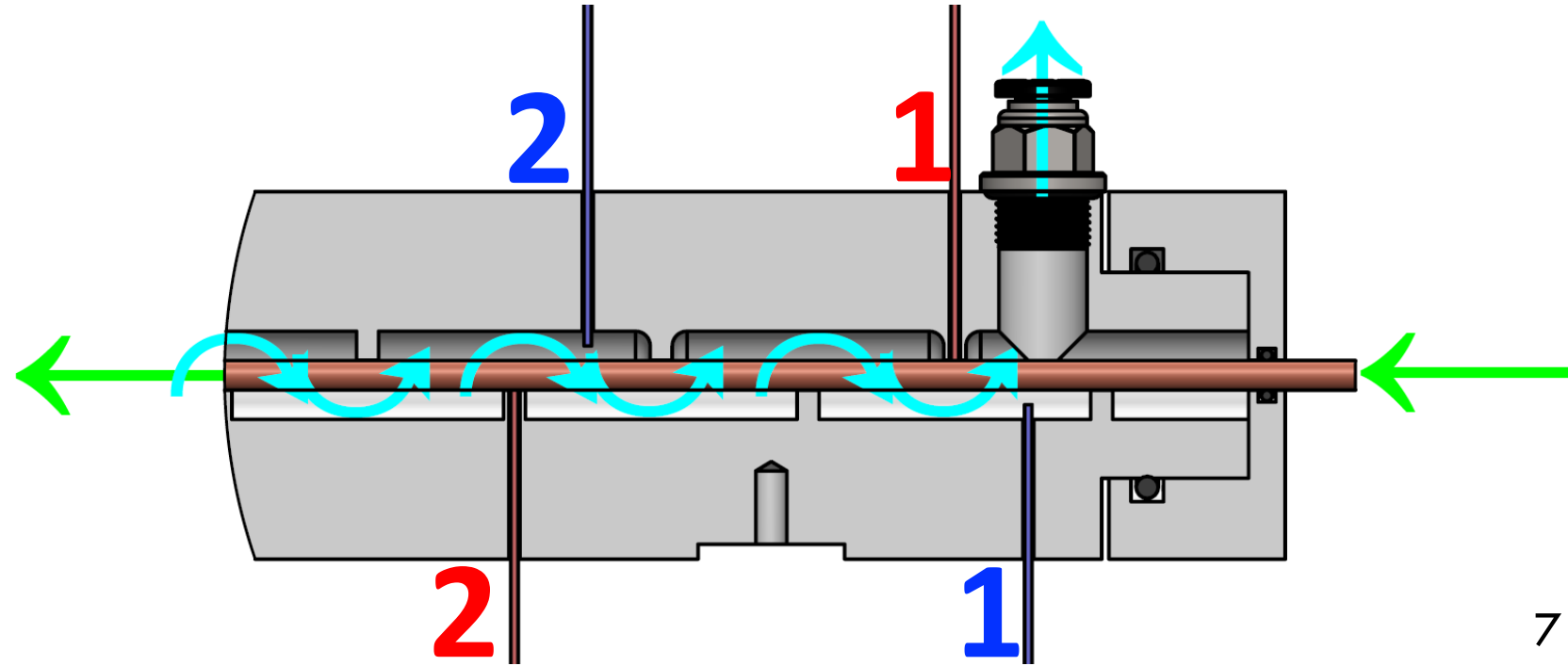
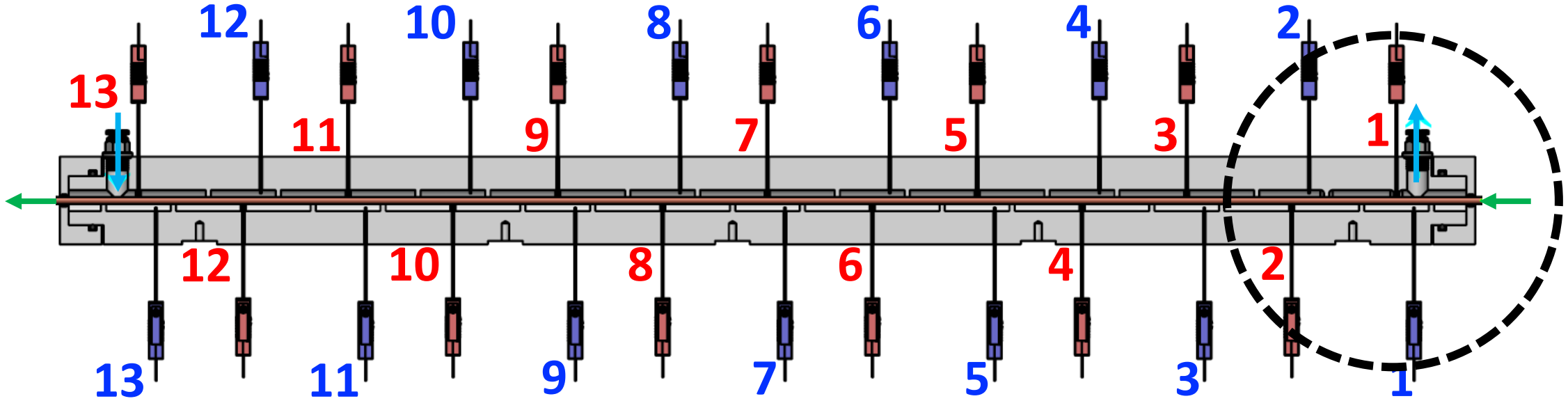
➤ Pas de travaux numériques

**Dispositif Expérimental : boucle diphasique en « mini-
canal » circulaire ...
(diamètre interne 3 mm)**

Dispositif expérimental

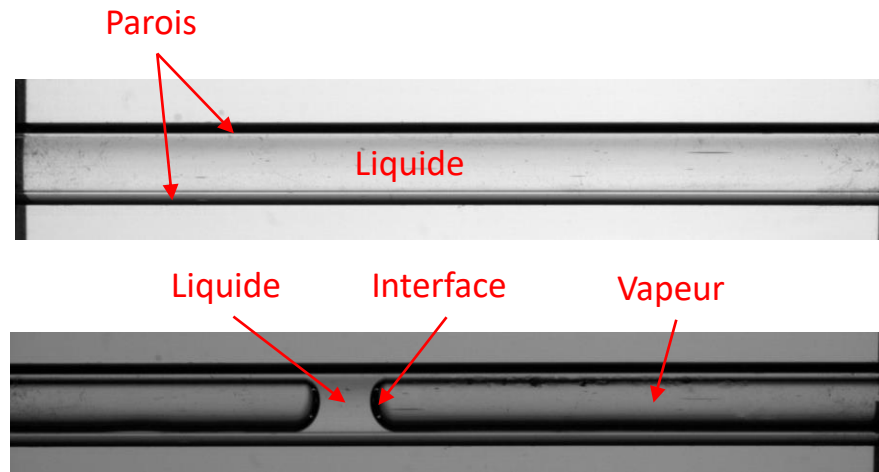
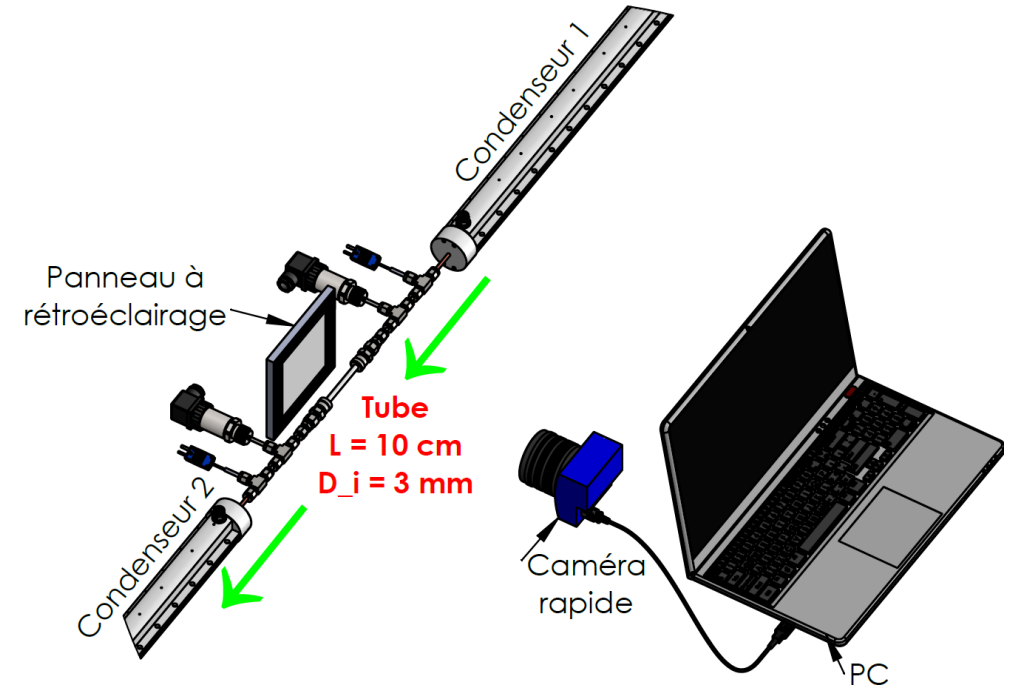
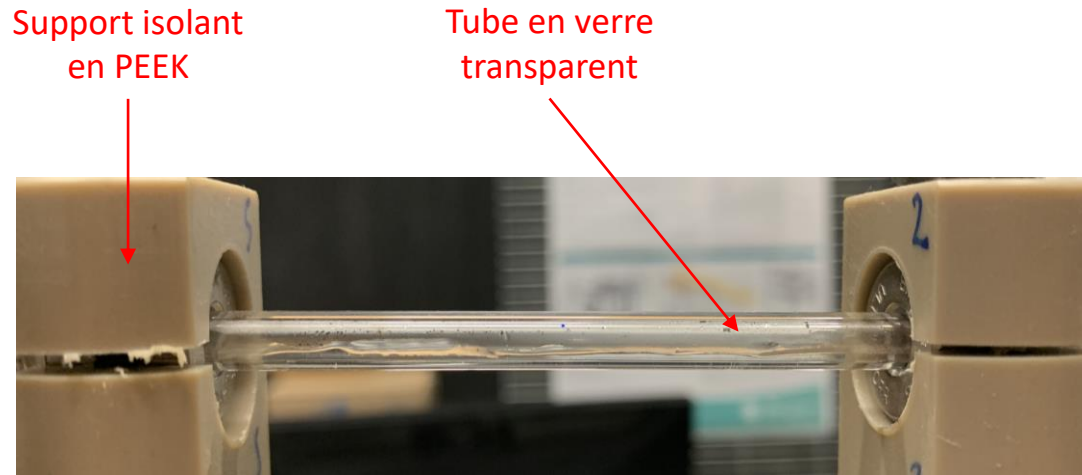


Condenseur



	Vapeur
	Eau de refroidissement

Dispositif de visualisation



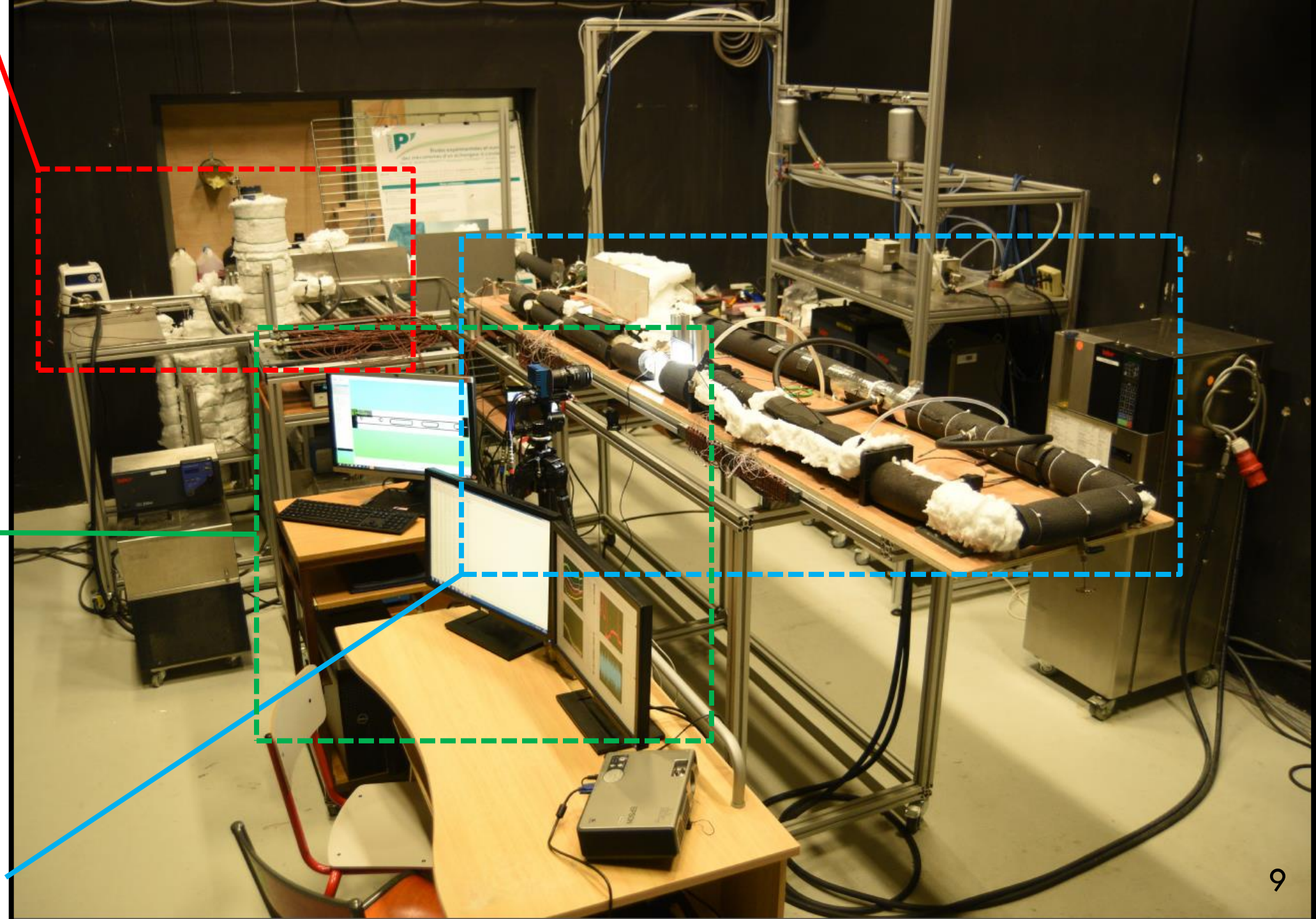
Paramètres	Valeur
Caméra	MIKROTRON EoSens 4CXP
Objectif	NIKON AF Micro Nikkor 60 mm f/2,8
Panneau LED	Phlox LedW-Backlight 100×100
ROI	2336×432 pixels
Frame rate	200 im/s

1. Approche expérimentale

Zone « évaporation »

Visualisation et acquisition des données

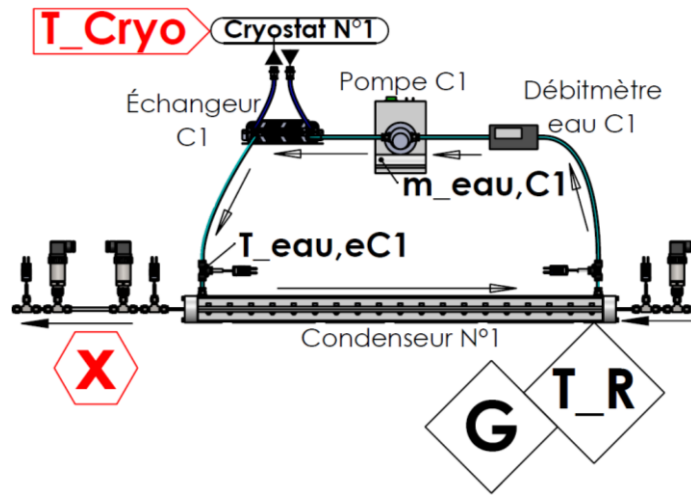
Zone « condensation »



IDENTIFICATION DES TOPOLOGIES D'ÉCOULEMENTS EN CONDENSATION

❖ **Visualisation expérimentale**

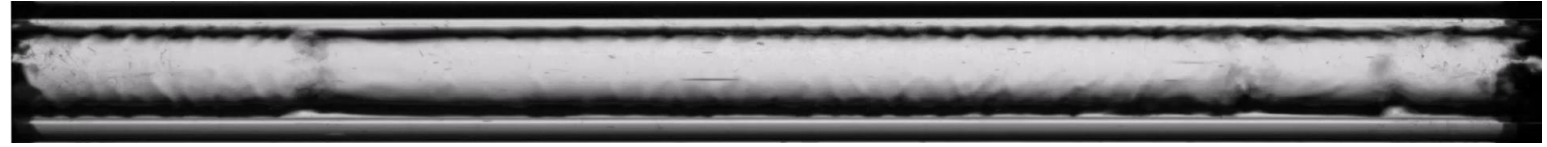
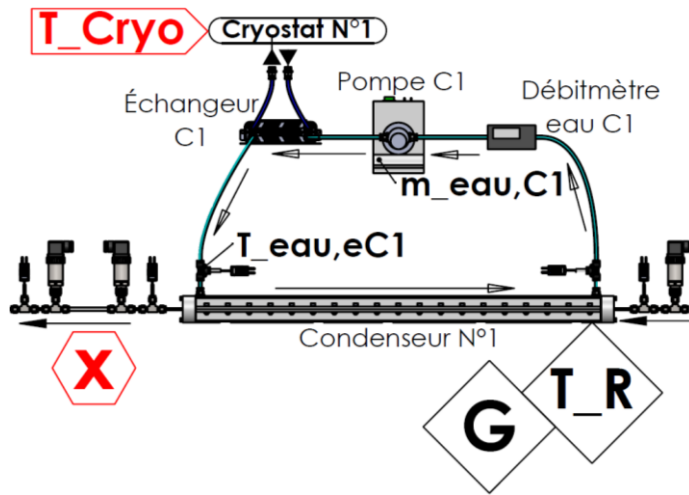
Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$



$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$

Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$

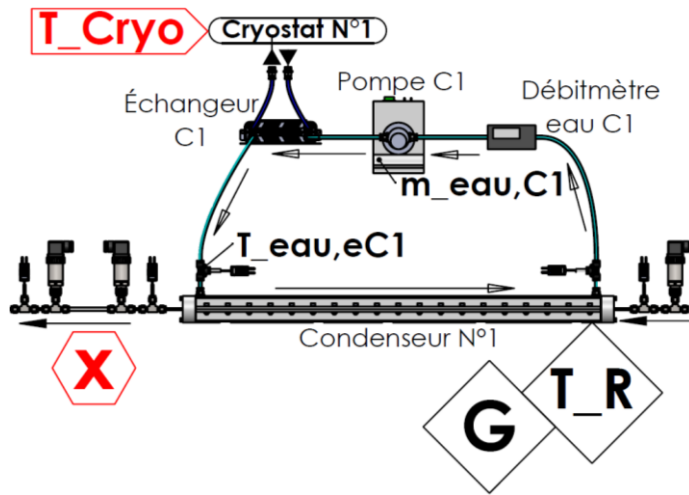


$x = 0,37$

$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

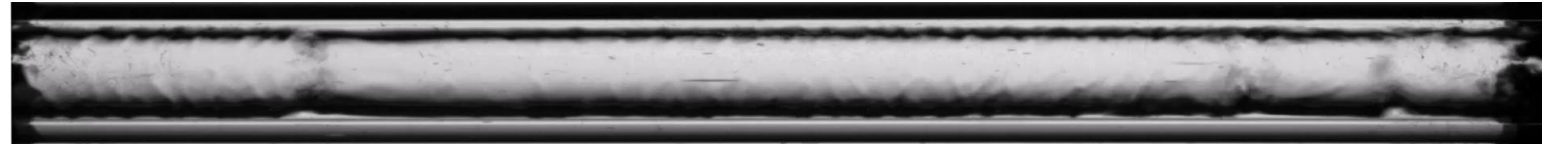
- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$

Phase stationnaire : $0,07 \leq x \leq 0,37$

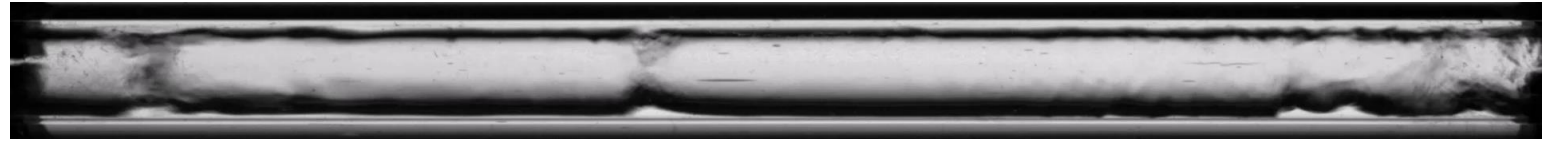


$$x = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

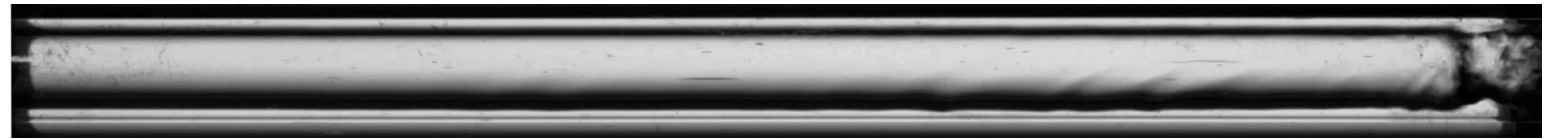
- $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$
- $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\dot{m}_{\text{eau}} = 200 \text{ mL/min}$
- $T_{\text{Cryo}} = 60 \rightarrow 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- $x = 0,37 \rightarrow 0$



$x = 0,37$



$x = 0,25$



$x = 0,15$



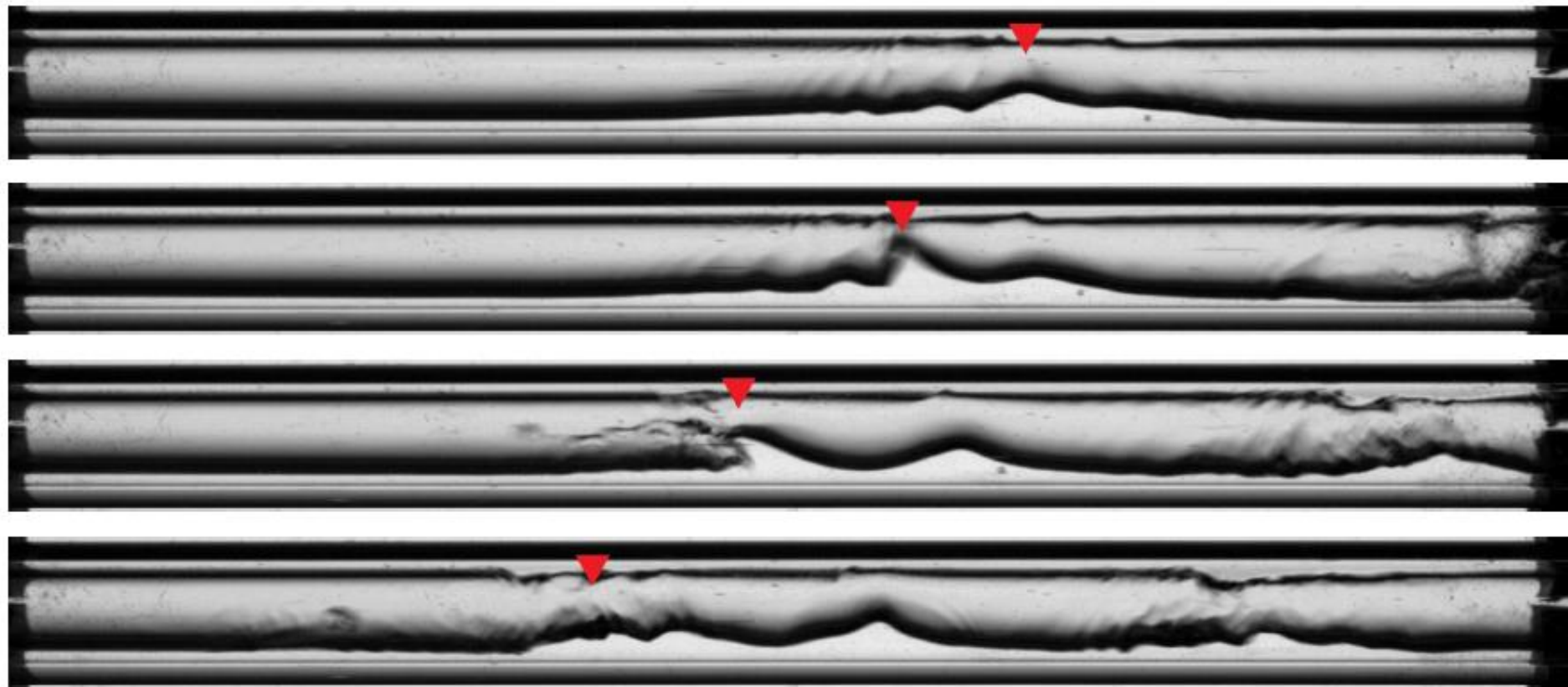
$x = 0,07$

- Apparition des vagues entraînées par la vapeur.
- Plus le titre diminue, plus l'épaisseur du film liquide est importante.

Phase stationnaire : $x = 0,07$

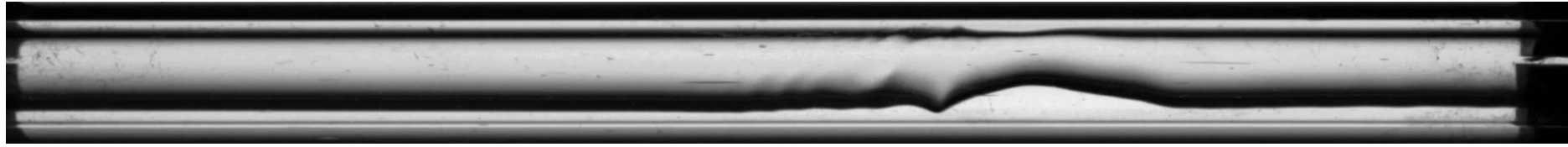
Phase stationnaire : $x = 0,07$

$x = 0,07$

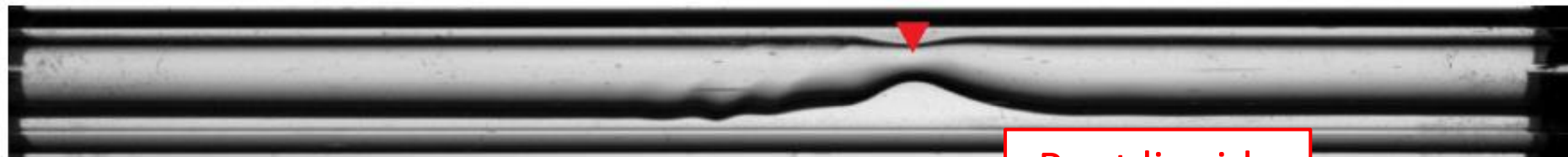


Prédominance des forces de cisaillement

Phase stationnaire : $x = 0,06$



$x = 0,06$



t_0

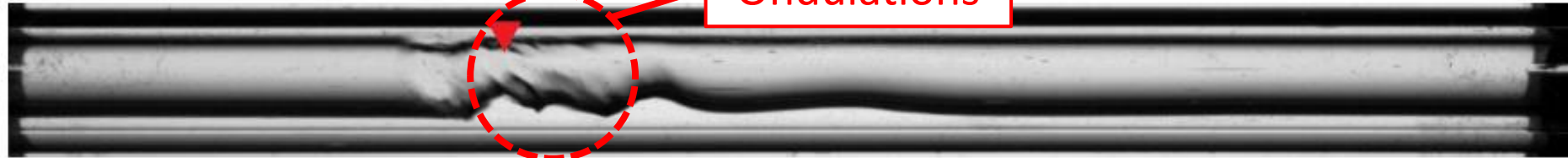


Pont liquide

$t_0 + 5$ ms



$t_0 + 10$ ms

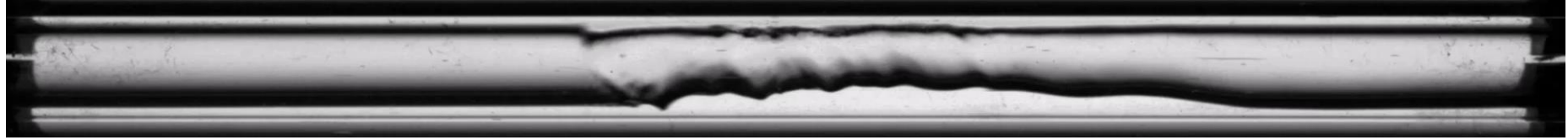


Ondulations

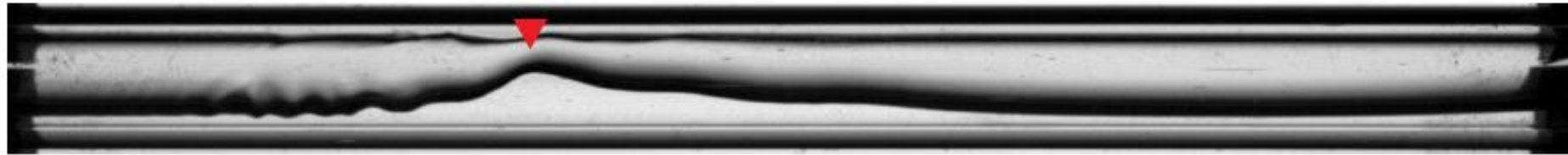
$t_0 + 15$ ms

Compétition entre le cisaillement et la capillarité

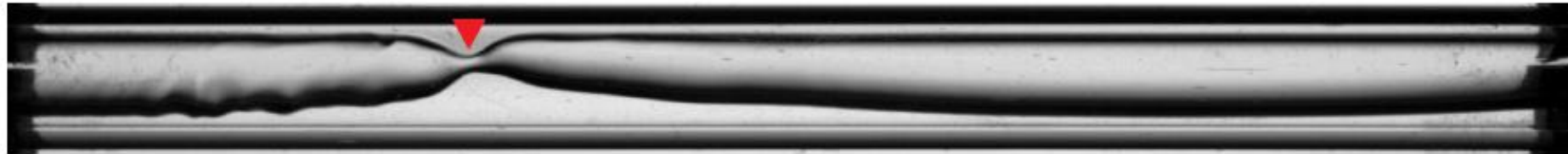
Phase stationnaire : $x = 0,05$



$x = 0,05$



t_0



$t_0 + 5$ ms



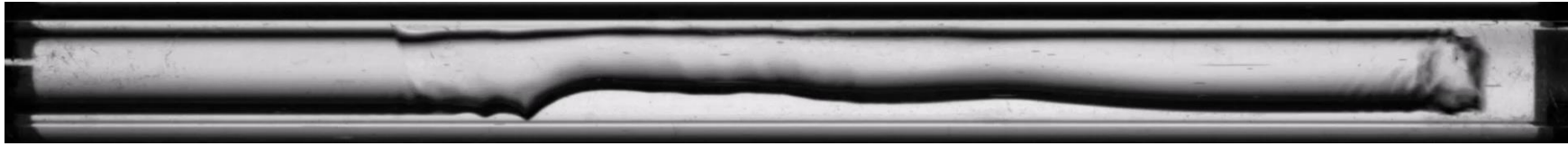
$t_0 + 10$ ms



$t_0 + 15$ ms

Prédominance des forces de capillarité

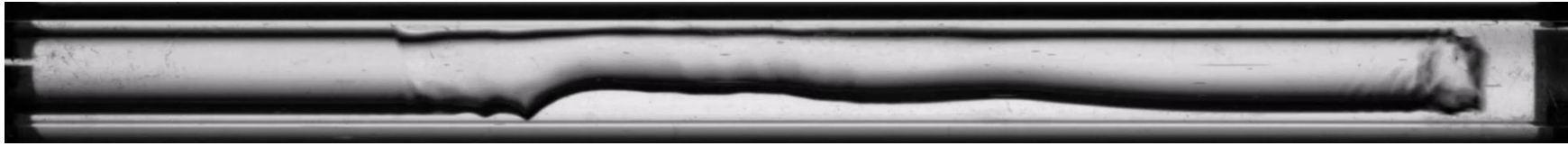
Phase stationnaire : $x < 0,05$



$x = 0,02$

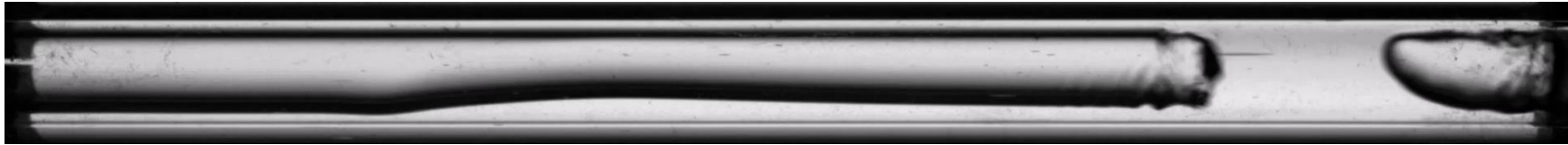
Formation d'un bouchon

Phase stationnaire : $x < 0,05$



$x = 0,02$

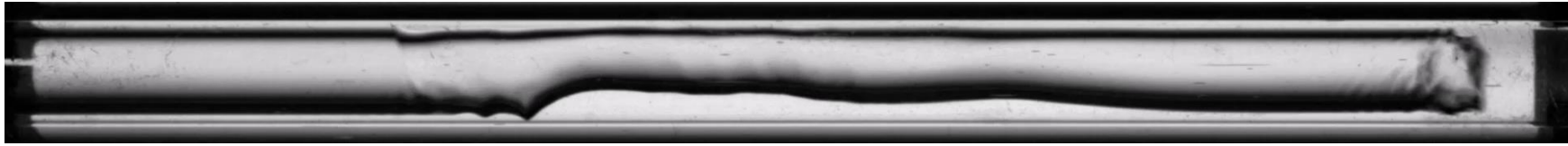
Formation d'un bouchon



$x = 0,01$

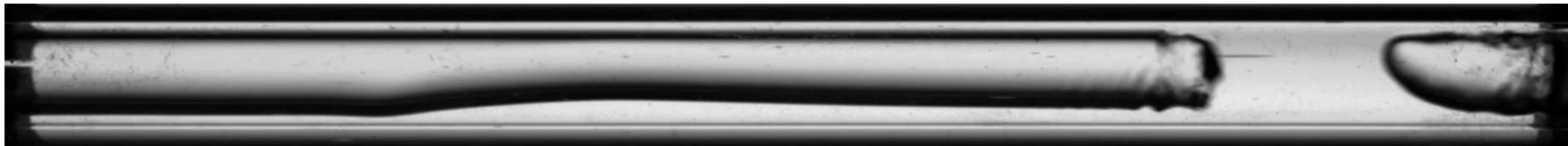
Formation d'une bulle

Phase stationnaire : $x < 0,05$



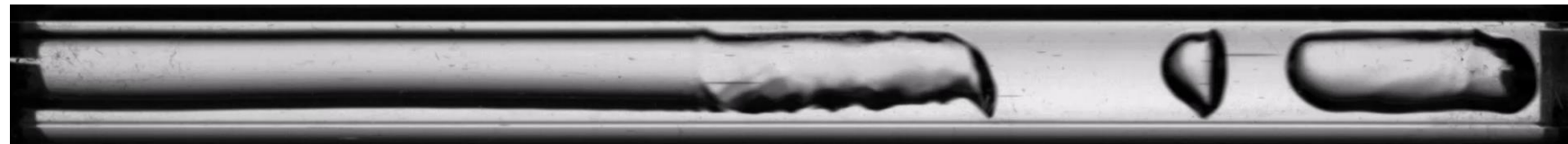
$x = 0,02$

Formation d'un bouchon



$x = 0,01$

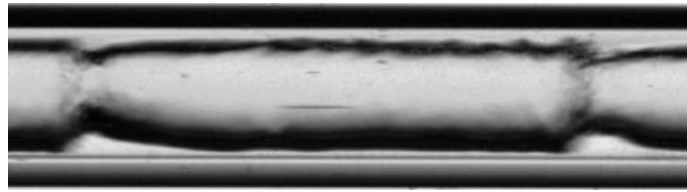
Formation d'une bulle



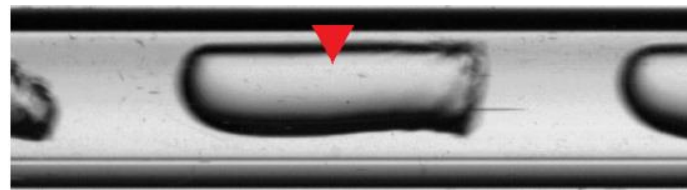
$x = 0,01$

Coexistence des écoulements à poches, à bouchons et à bulles

Cartographie des topologies de l'écoulement



Écoulement annulaire



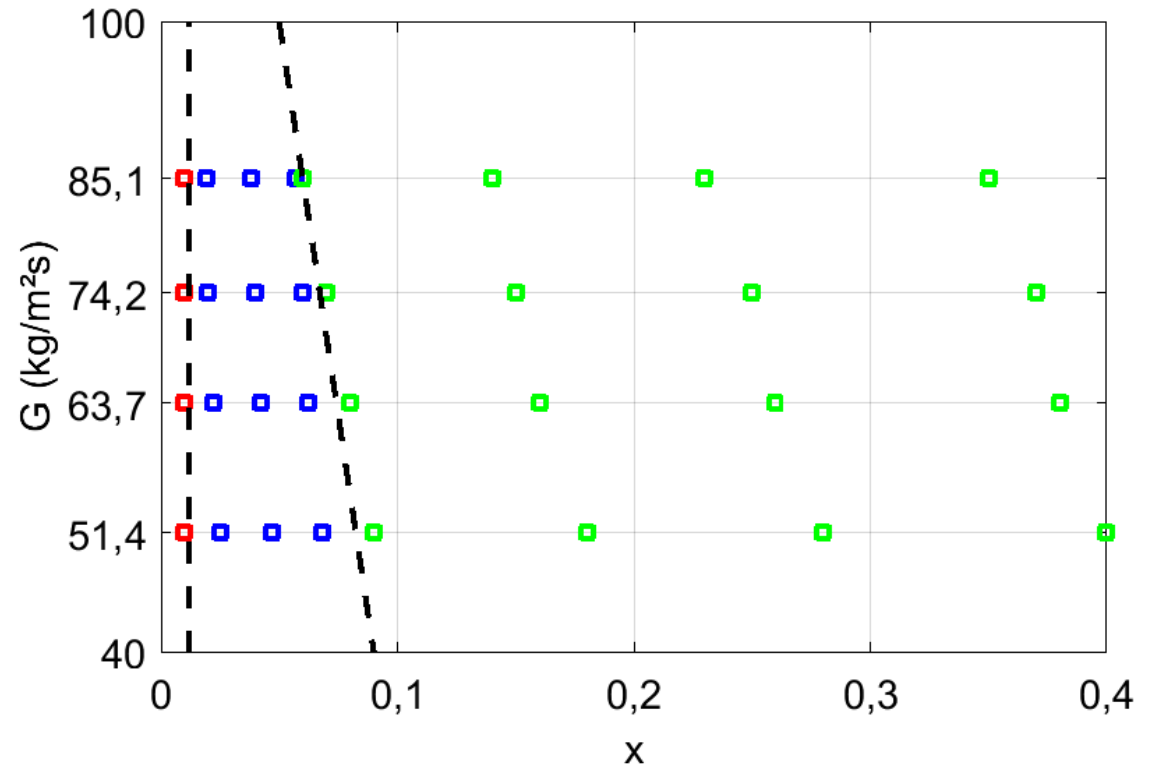
Écoulement à poches



Écoulement à bouchons



Écoulement à bulles

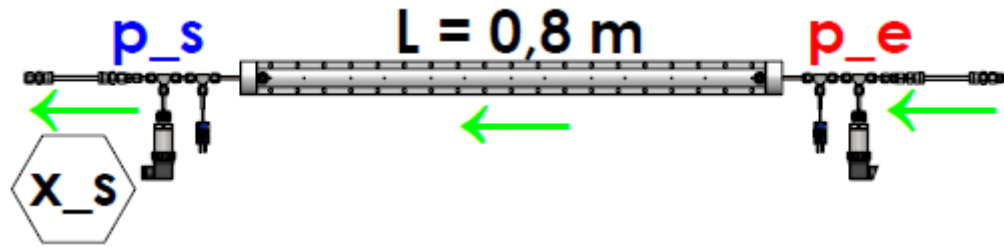


- Topologies de l'écoulement : annulaire, à poches, à bouchons et à bulles.
- Plus le débit de vapeur augmente, la transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches a lieu à un titre de vapeur moins élevé.

QUANTIFICATION DES PERFORMANCES

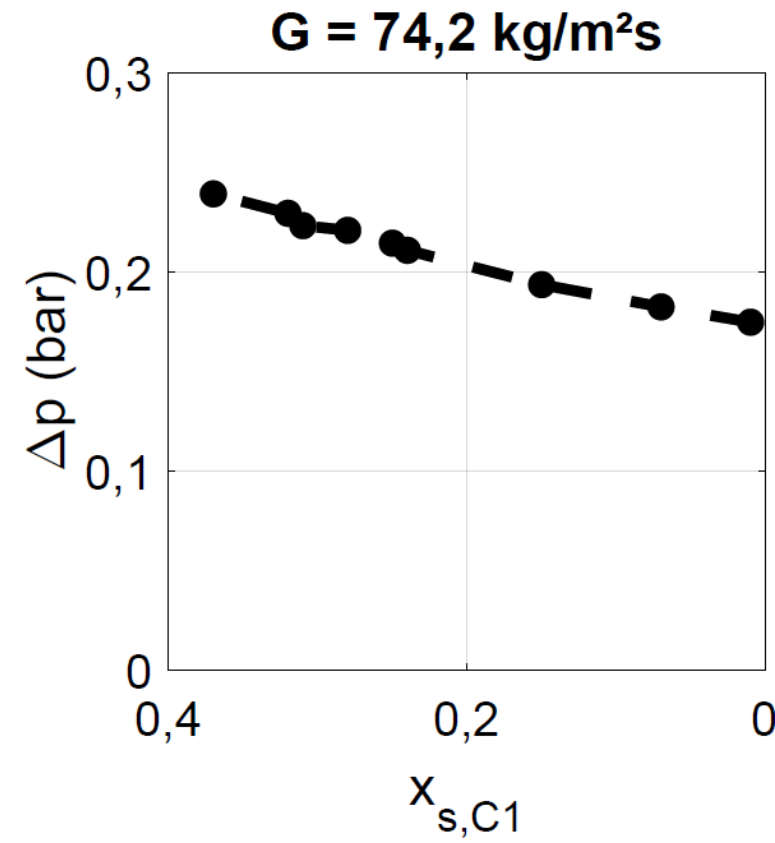
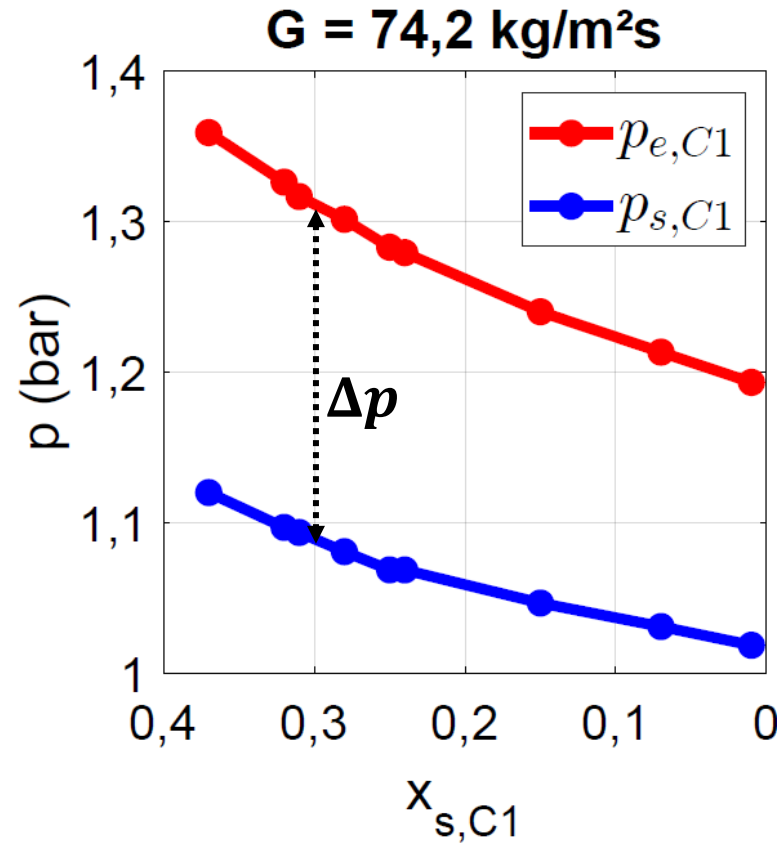
- ❖ Pertes de charge globales Δp
- ❖ Coefficient d'échange local h

Pertes de charge – Cas de référence

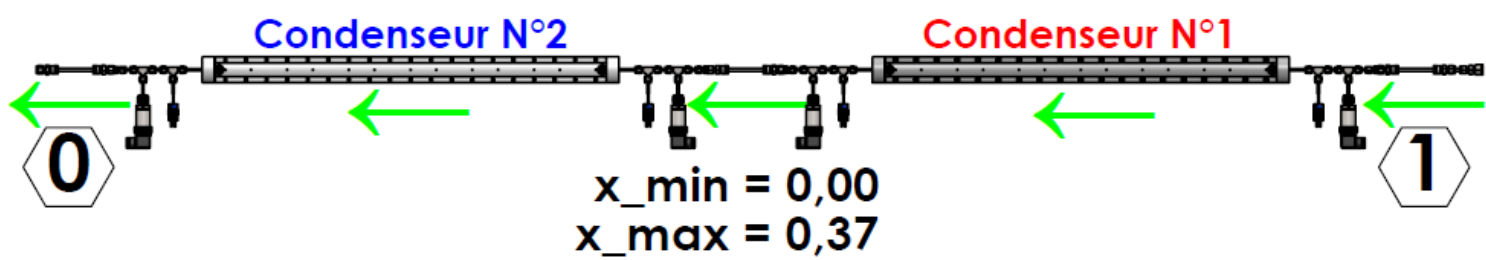


$$\Delta p = p_e - p_s$$

$$X = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{eau}} c_{p,\text{eau}} (T_{\text{eau},s} - T_{\text{eau},e})}{\dot{m}_{\text{vap}} L_{\text{vap}}}$$

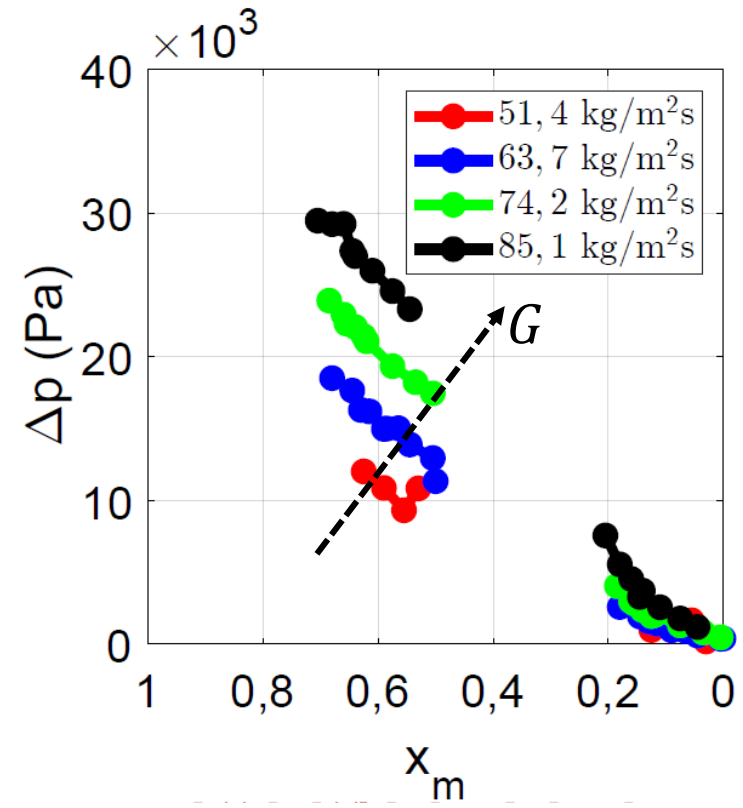
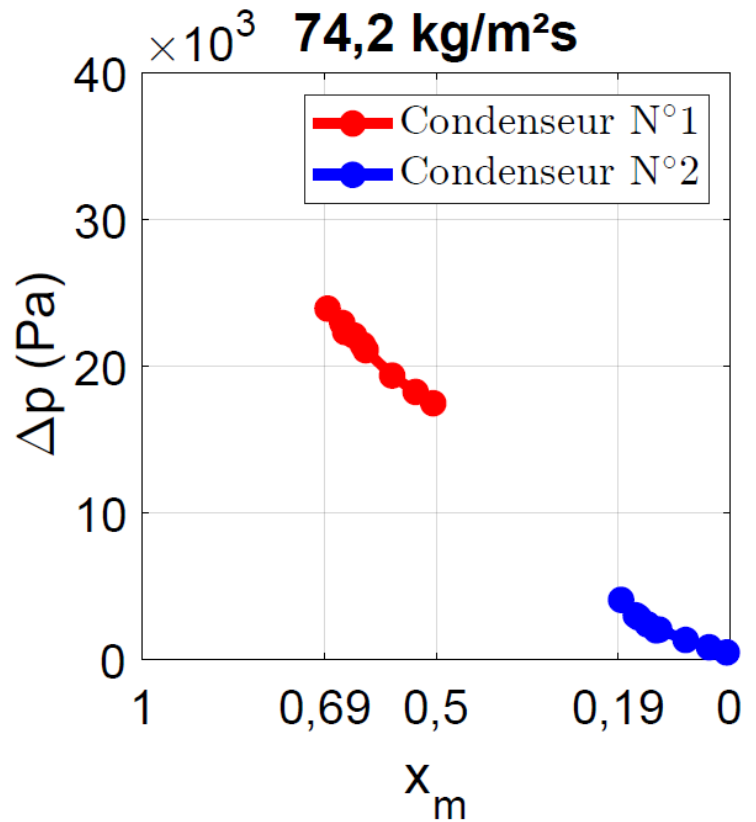


Pertes de charge – Cas de référence



$$\Delta p = p_e - p_s$$

$$x_m = \frac{1}{2} (x_e + x_s)$$



Confrontation aux corrélations empiriques

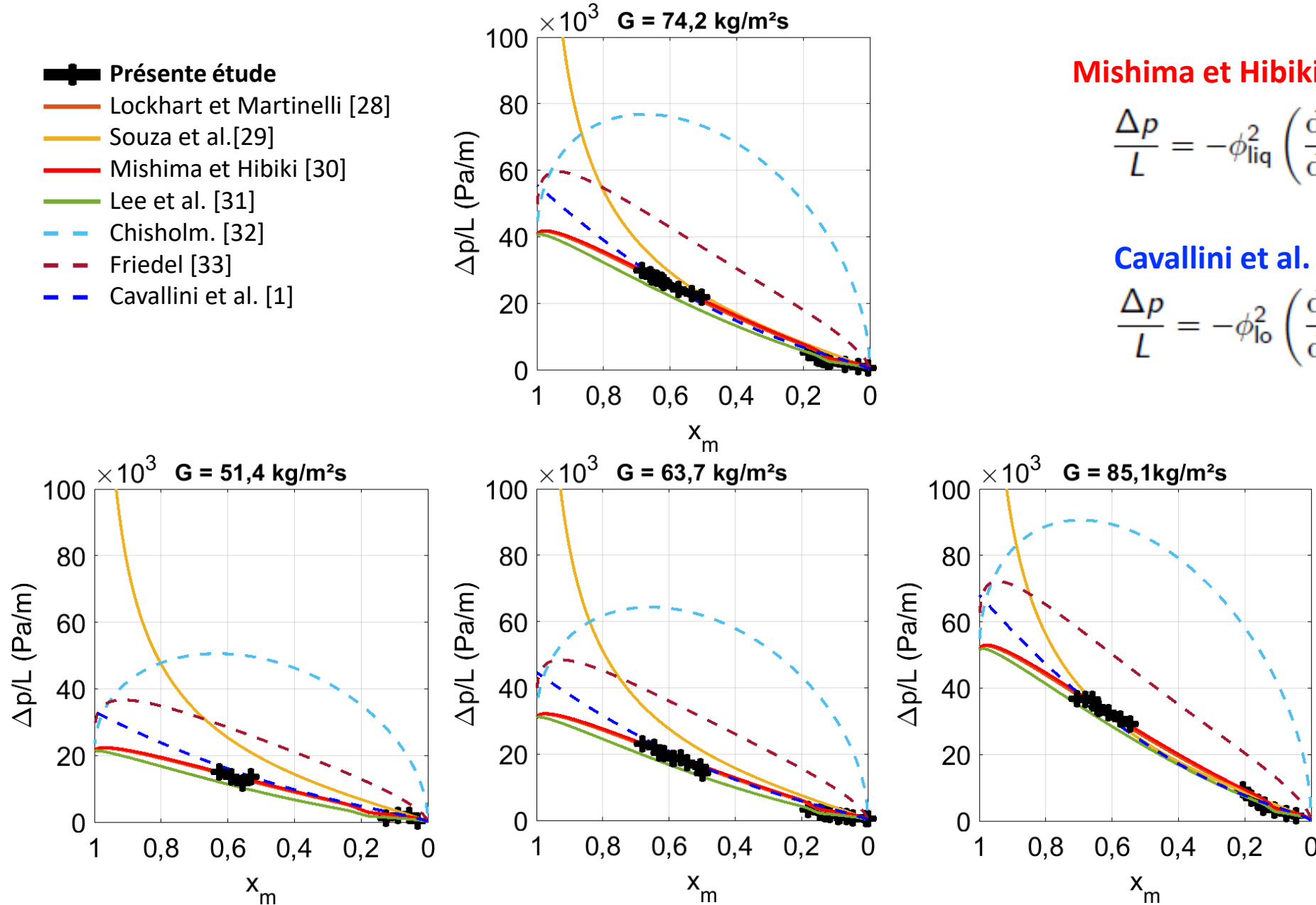
- Présente étude
- Lockhart et Martinelli [28]
- Souza et al. [29]
- Mishima et Hibiki [30]
- Lee et al. [31]
- - Chisholm. [32]
- - Friedel [33]
- - Cavallini et al. [1]

Mishima et Hibiki [30]

$$\frac{\Delta p}{L} = -\phi_{liq}^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{liq}$$

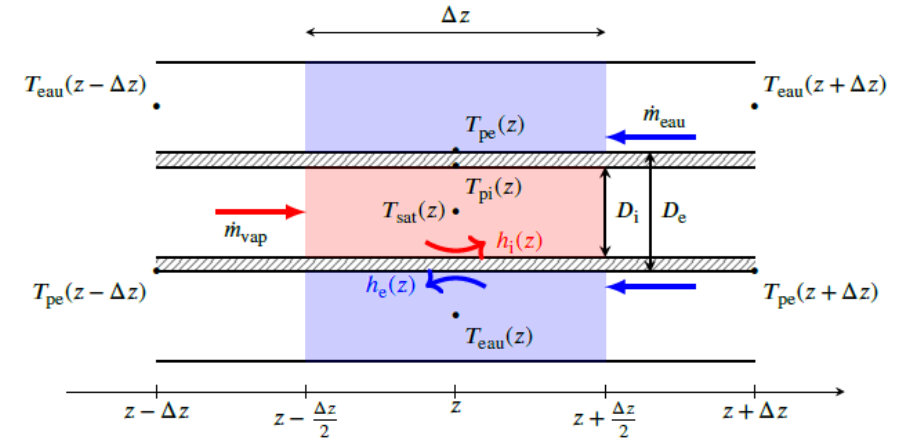
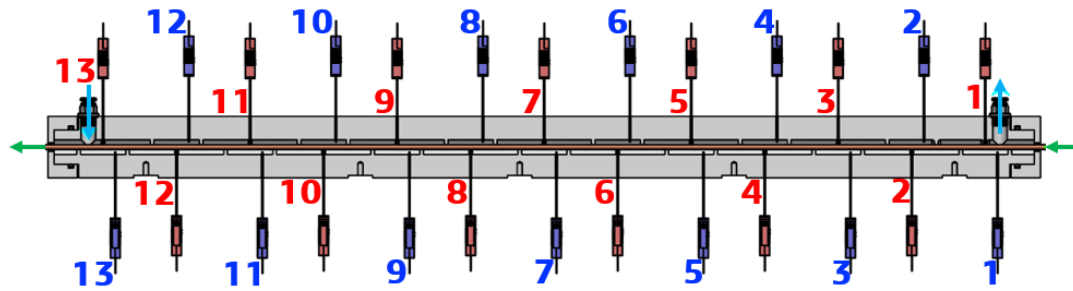
Cavallini et al. [34]

$$\frac{\Delta p}{L} = -\phi_{lo}^2 \left(\frac{dp}{dz} \right)_{lo}$$

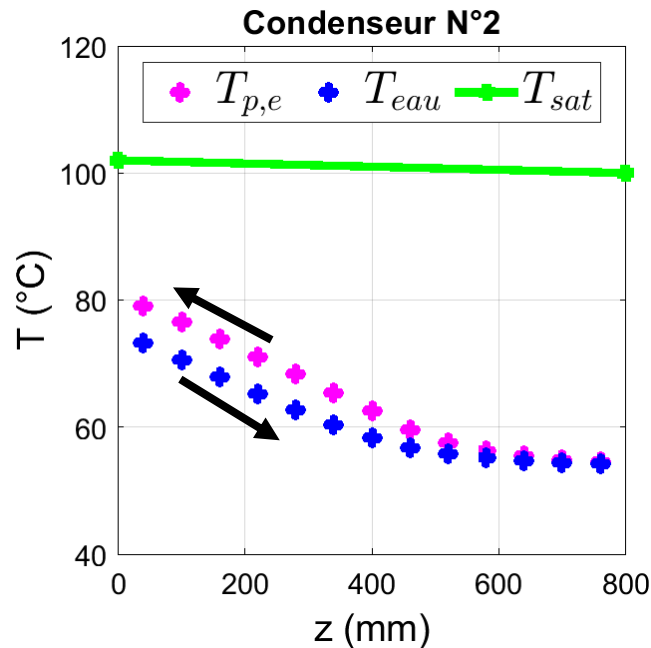
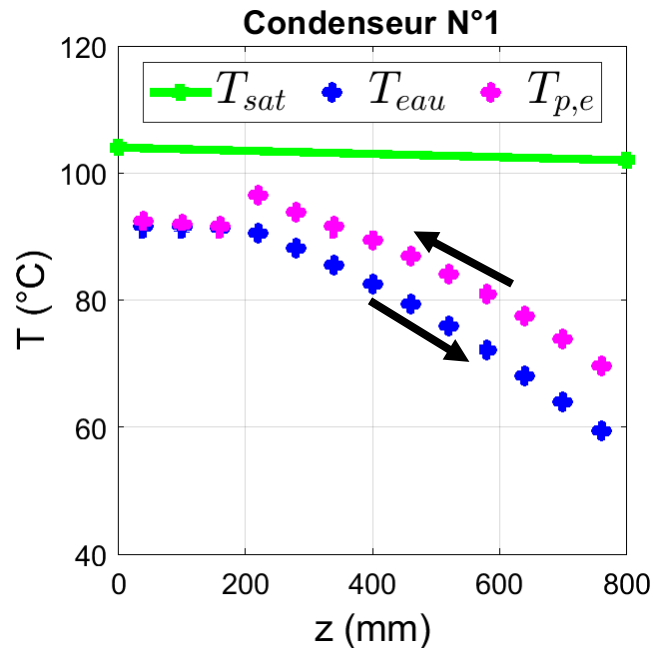


Coefficient d'échange local – Cas de référence

Cas de référence : $G = 74,2 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $T_R = 100 \text{ }^\circ\text{C}$



Modèle d'analyse



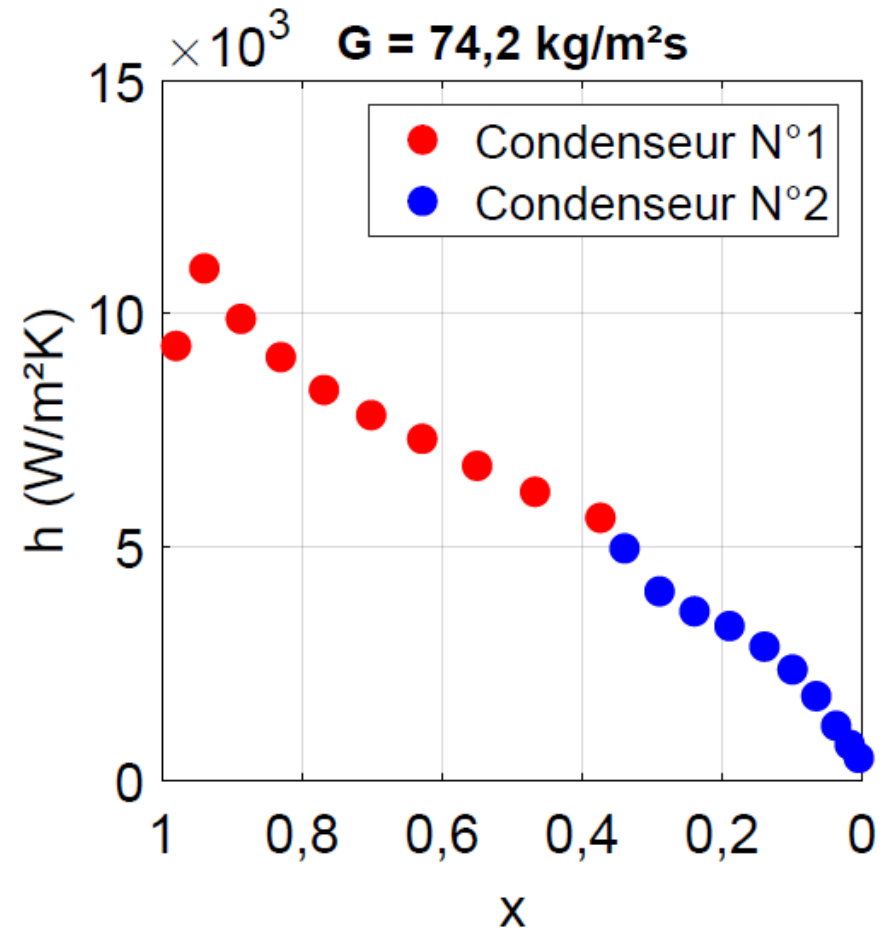
$$\dot{Q}_e(z) = \dot{m}_e c_{p,e} \left[T_e(z - \frac{\Delta z}{2}) - T_e(z + \frac{\Delta z}{2}) \right]$$

$$h_i(z) = \frac{\dot{Q}_e(z)}{\pi D_i \Delta z [T_{sat}(z) - T_{pi}(z)]}$$

$$x(z) = x(z - \frac{\Delta z}{2}) - \frac{\dot{Q}_e(z)}{2\dot{m}_v L_v}$$

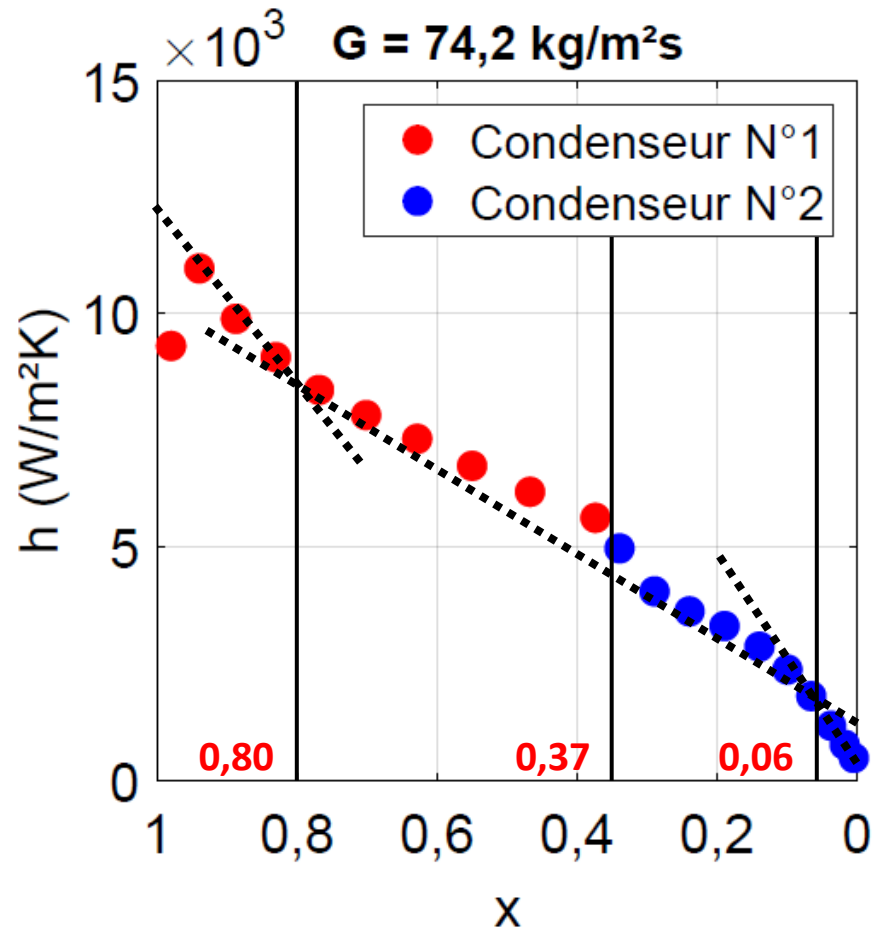
Coefficient d'échange local – Cas de référence

Incertitudes < 10%



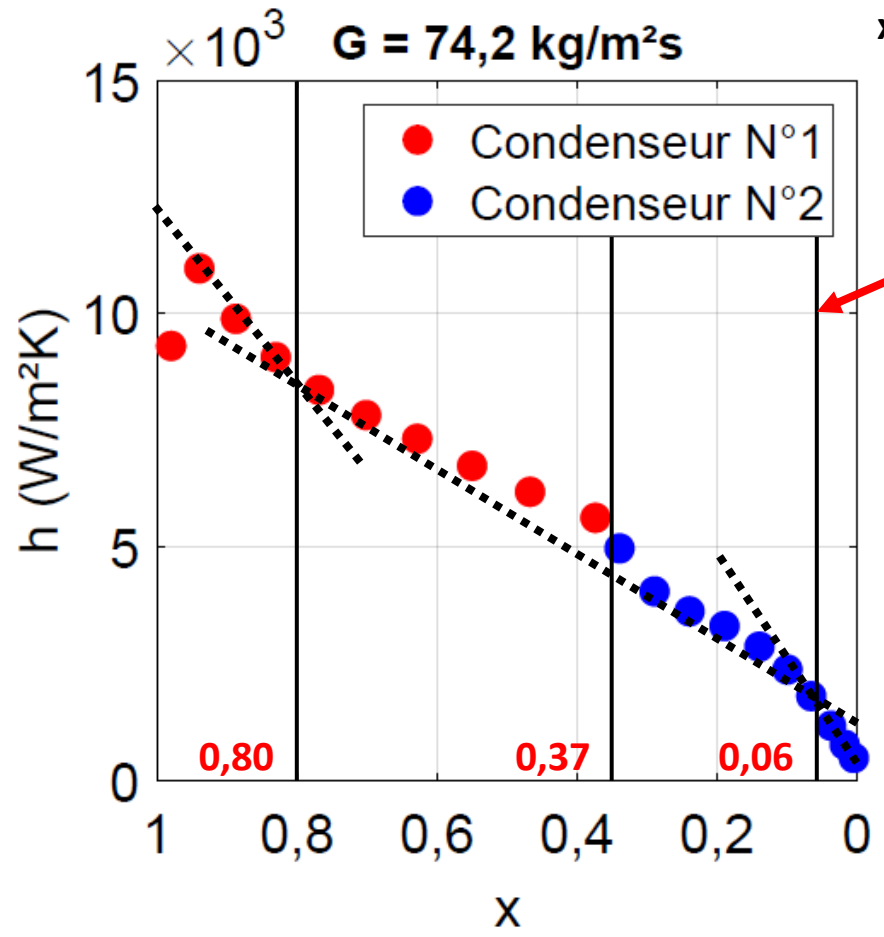
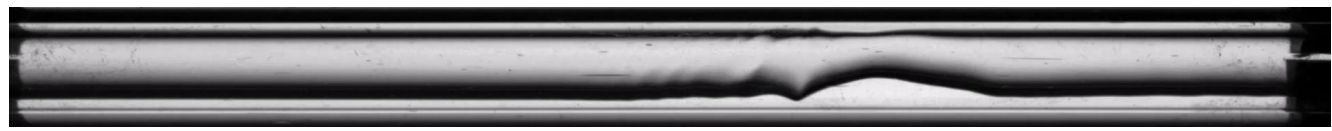
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



Coefficient d'échange – Cas de référence

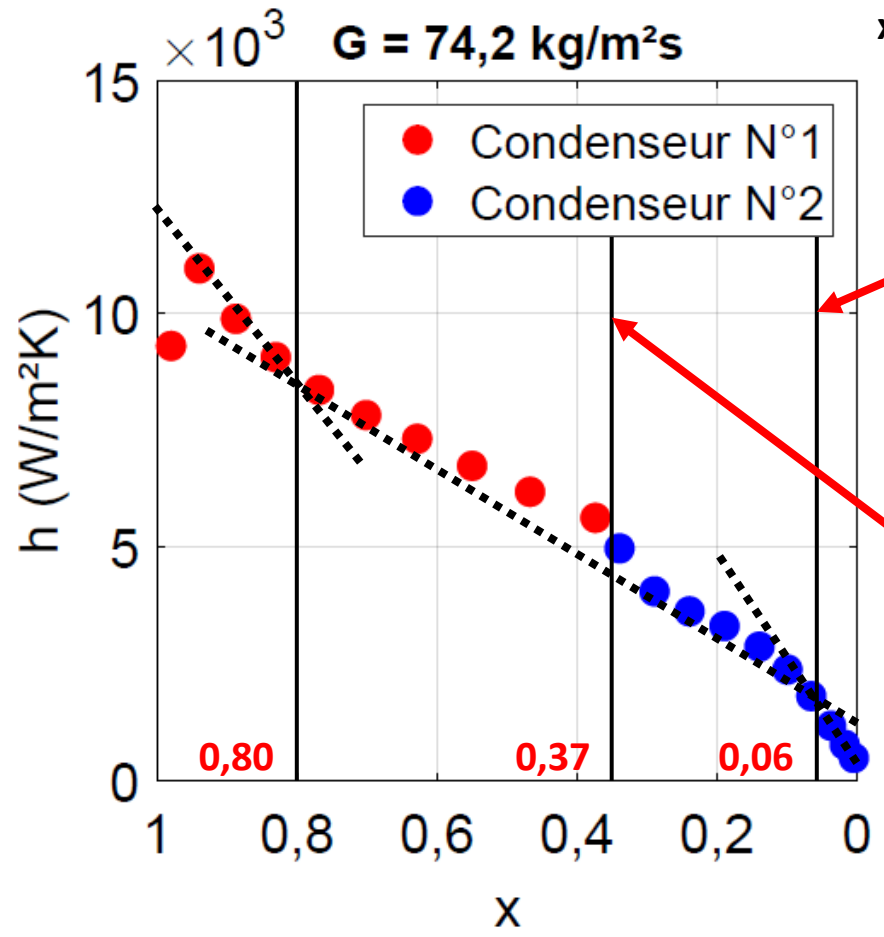
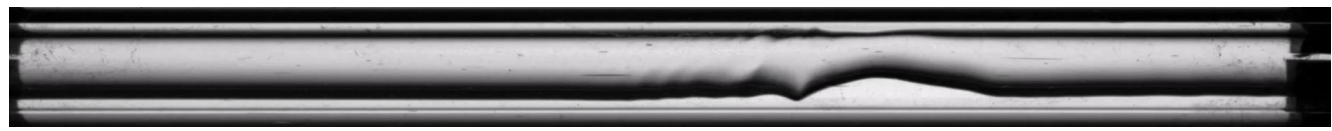
Incertitudes < 10%



$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

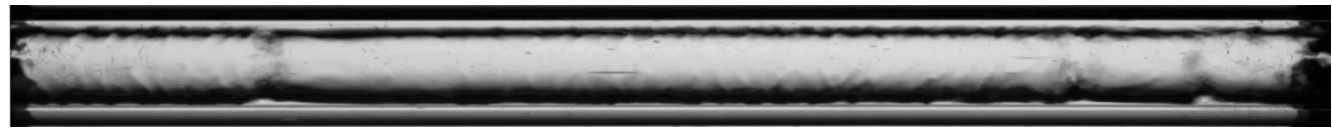
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



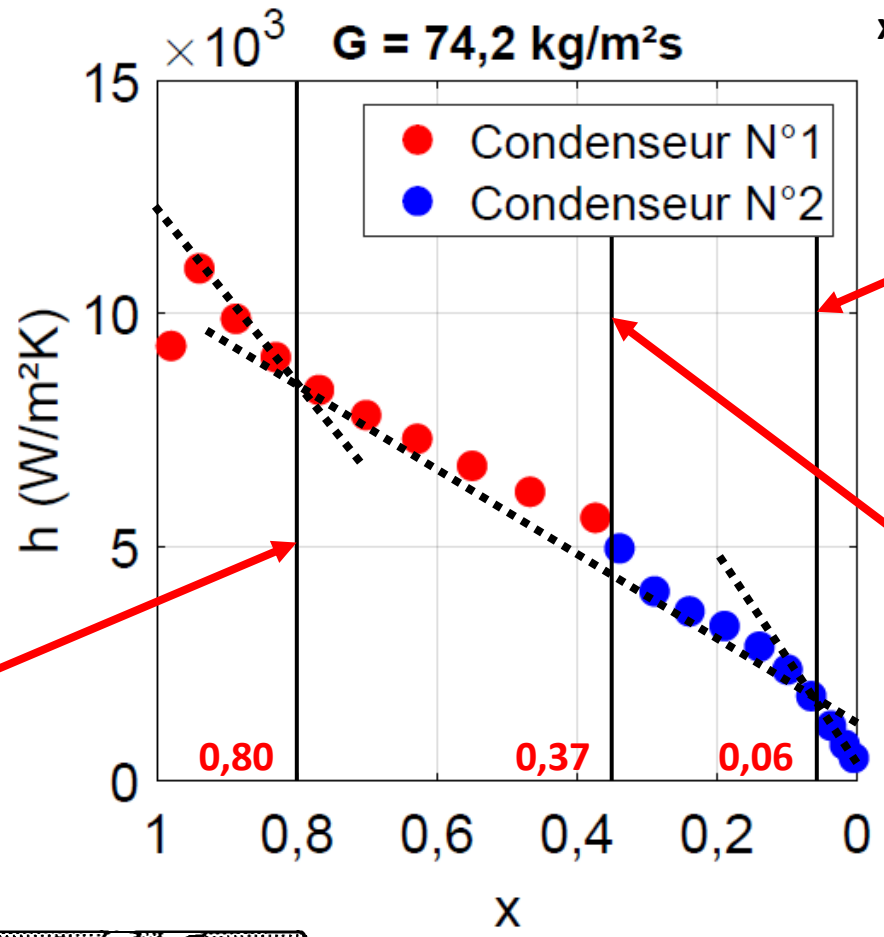
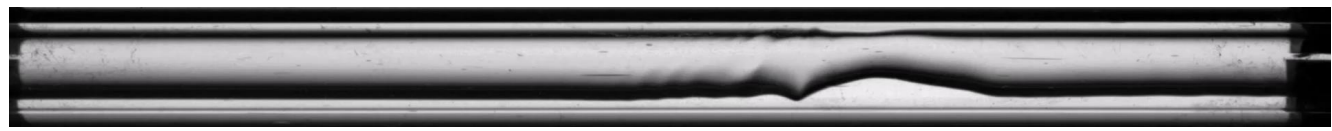
$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

$x = 0,37$: écoulement annulaire



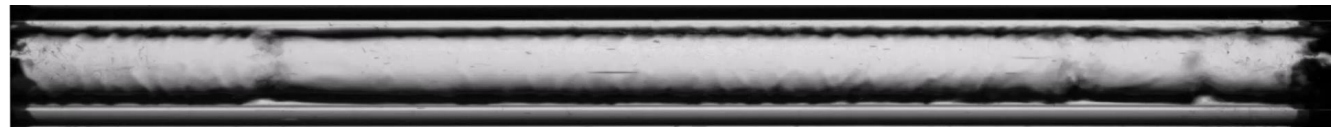
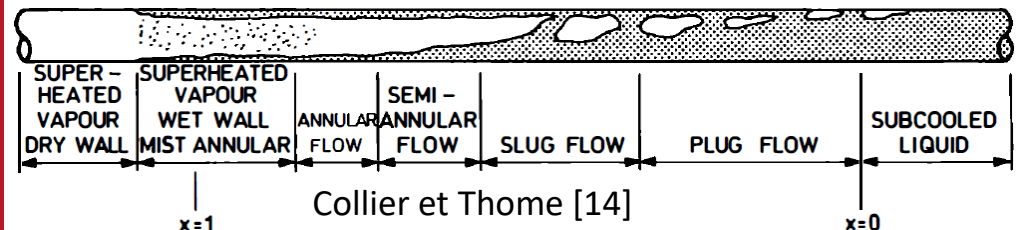
Coefficient d'échange – Cas de référence

Incertitudes < 10%



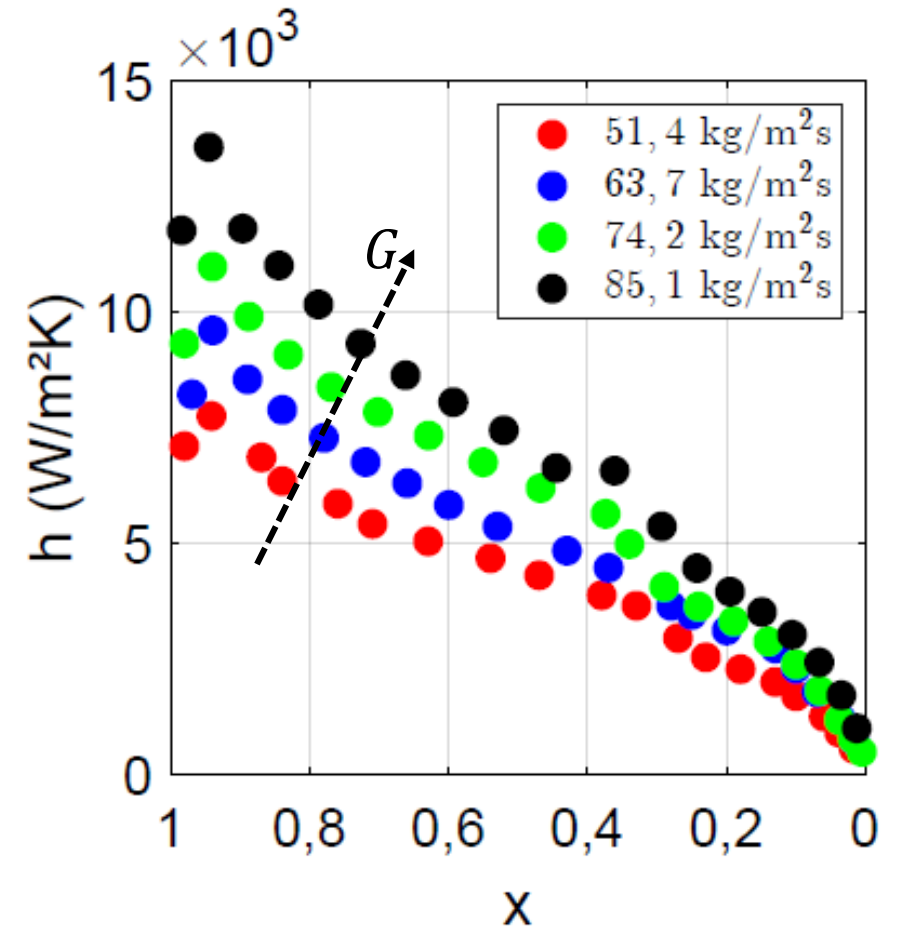
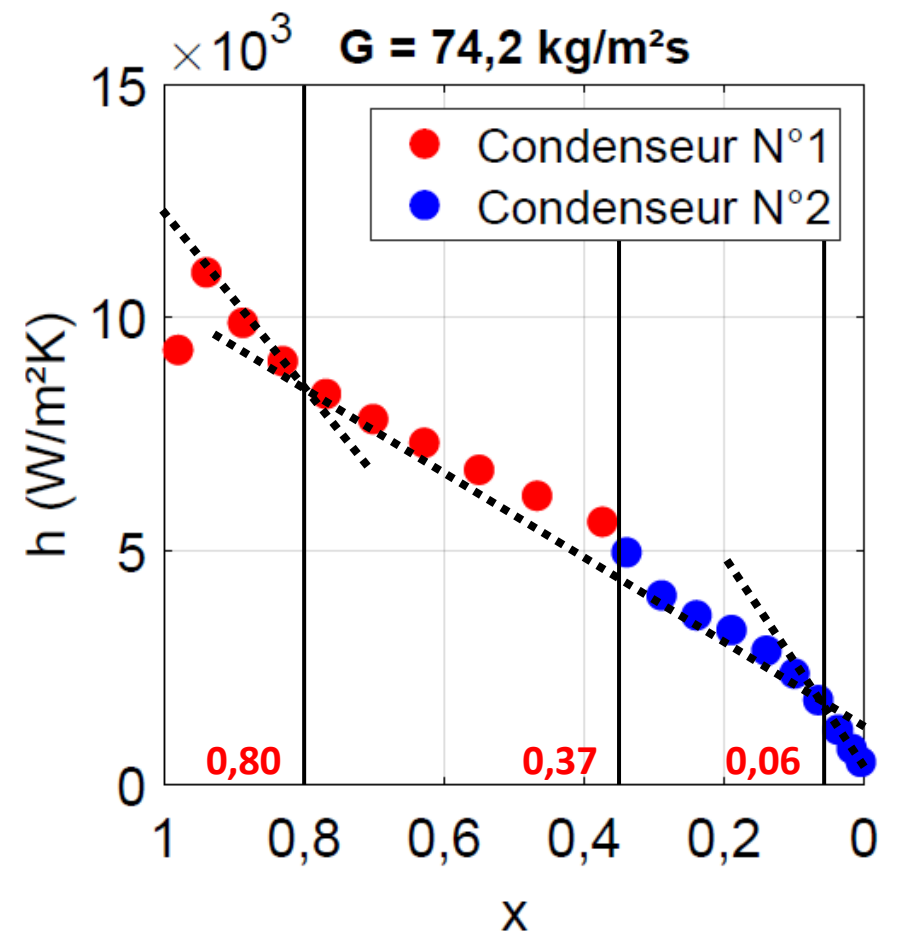
$x = 0,06$: transition de l'écoulement annulaire vers l'écoulement à poches

Écoulement à brouillard



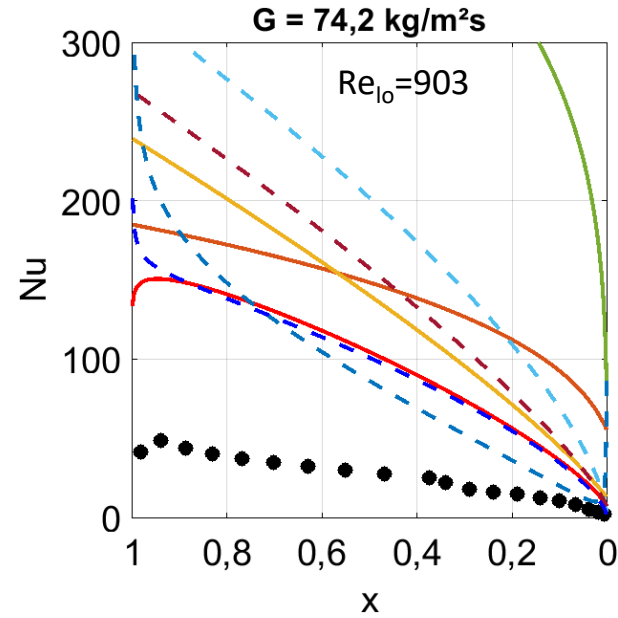
$x = 0,37$: écoulement annulaire

Coefficient d'échange – Cas de référence



Confrontation aux corrélations empiriques

- **Présente étude**
- Akers et al. [34]
- Cavallini et Zecchin [1]
- Shah [35]
- Bohdal et al. [9]
- Haraguchi et al. [2]
- Dobson et Chato [3]
- Koyama et al. [36]
- Huang et al. [37]



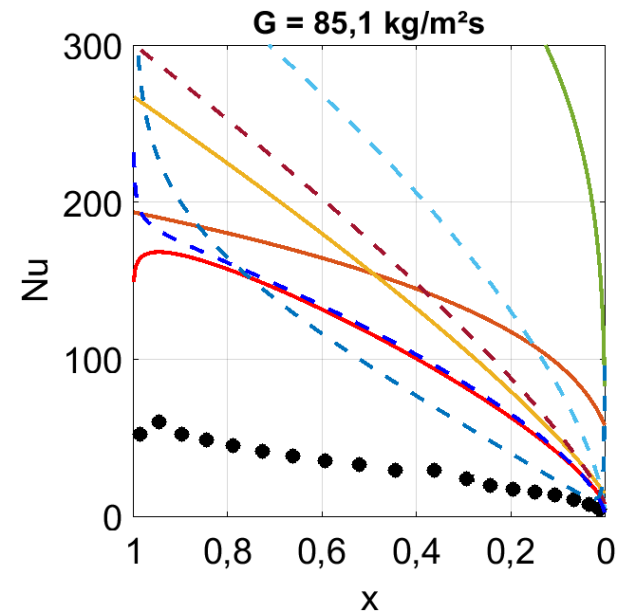
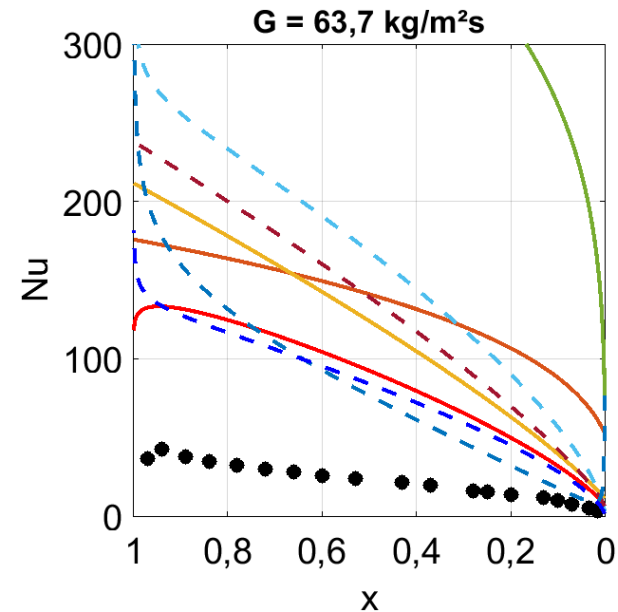
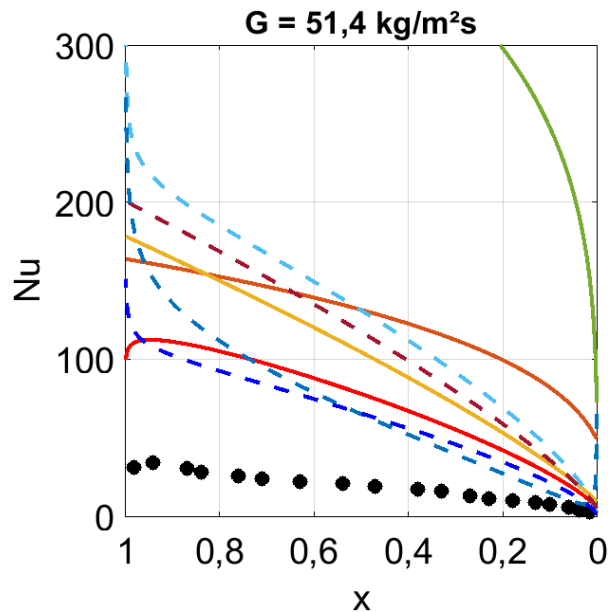
Shah [35]

$$\frac{hD_h}{\lambda_{liq}} = 0,023Re_{lo}^{0,8}Pr_{liq}^{0,4} \left[(1-x)^{0,8} + \frac{3,8x^{0,76}(1-x)^{0,04}}{\rho_r^{0,38}} \right]$$

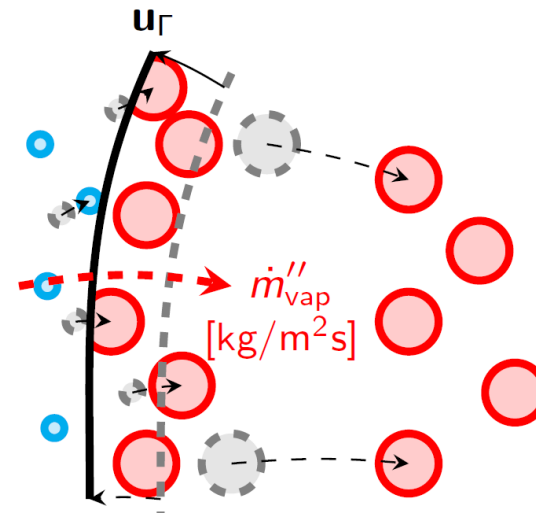
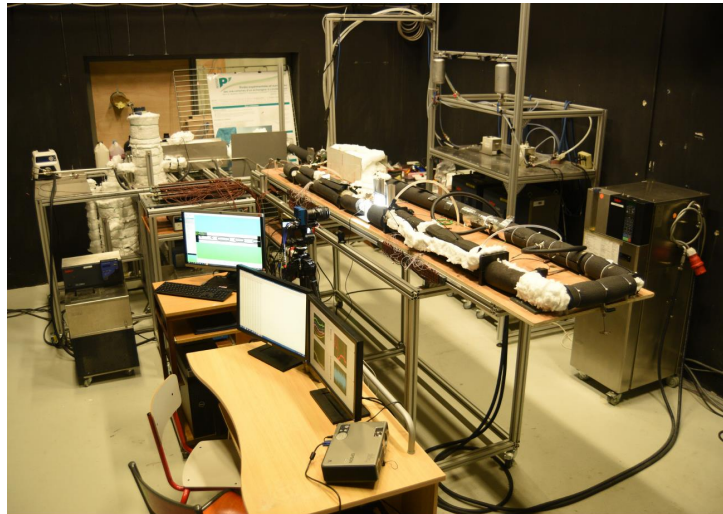
Huang et al. [37] (type Martinelli)

$$\frac{hD_h}{\lambda_{liq}} = 0,0152Re_{liq}^{0,77} \left(-0,33 + 0,83Pr_{liq}^{0,8} \right) \left(\frac{\phi_{vap}}{X_{tt}} \right)$$

$$X_{tt} = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{0,9} \left(\frac{\rho_{vap}}{\rho_{liq}} \right)^{0,5} \left(\frac{\mu_{liq}}{\mu_{vap}} \right)^{0,1}$$



CONCLUSION & PERSPECTIVES

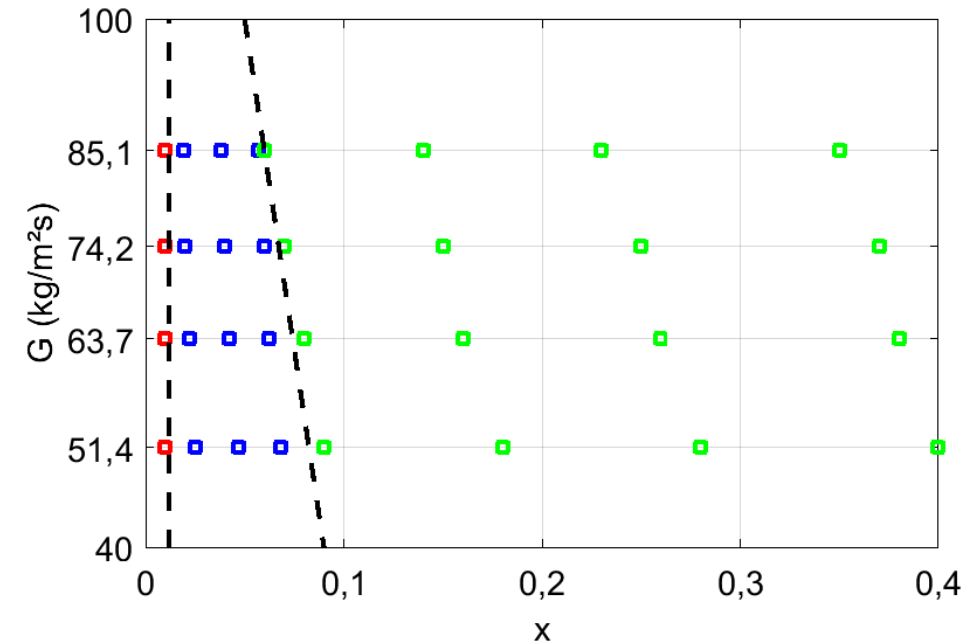
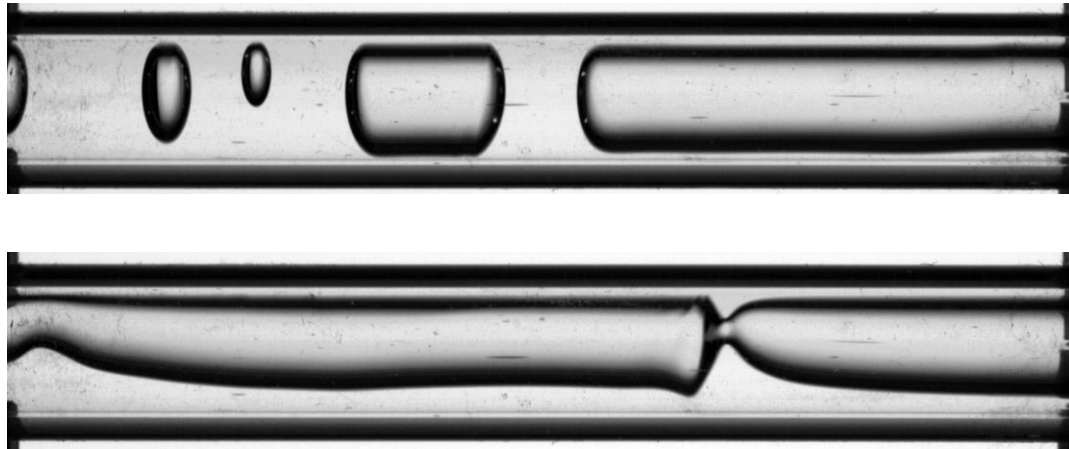


Conclusion

R1 - Identification des topologies de l'écoulement

Visualisation expérimentale

- Topologies d'écoulement : annulaire, poches, bouchons et bulles
- Compétition entre le cisaillement et la capillarité → pont liquide → transition des régimes
- Quantification en fonction du titre de vapeur
- Base de données ...

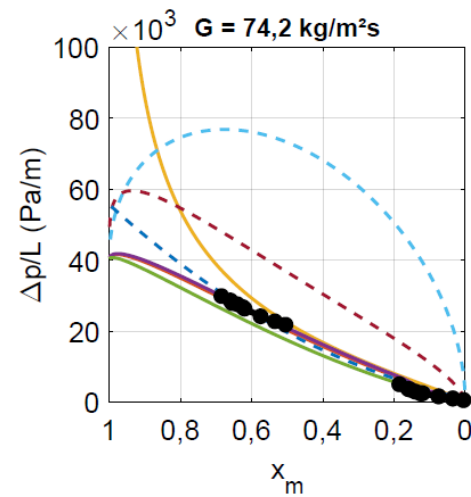
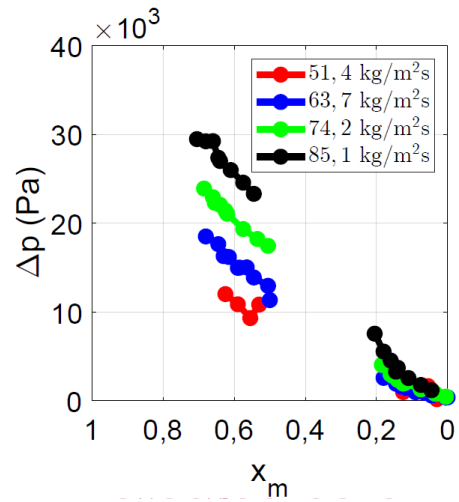


Conclusion

R2 – Evaluation des performances « hydrauliques » et « thermiques »

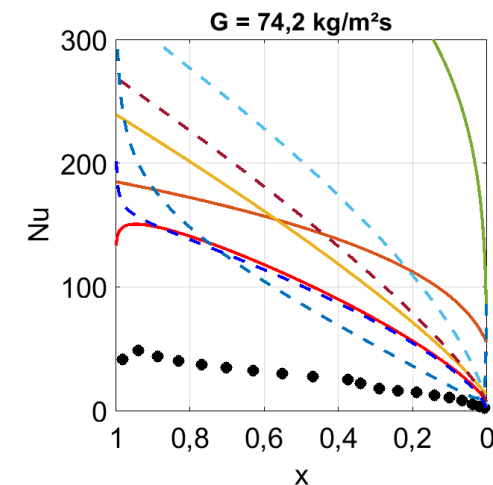
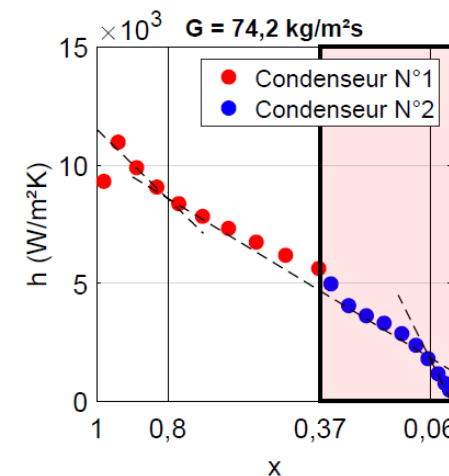
Pertes de charge globales

- Fonction décroissante avec titre de vapeur **moyen**
- En bon accord avec les corrélations empiriques



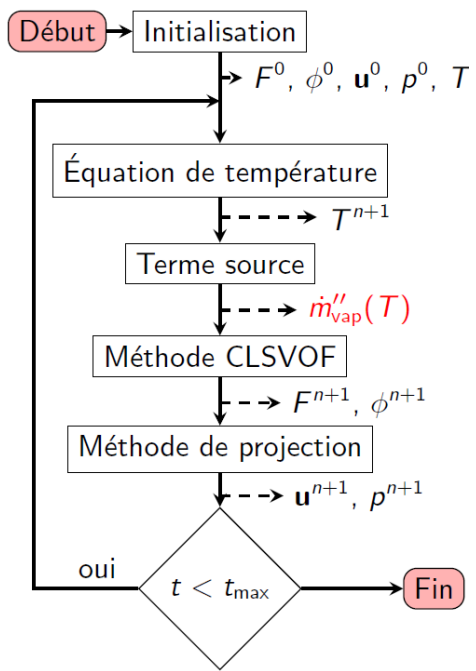
Coefficient d'échange local

- Fonction décroissante avec titre de vapeur **local**
- Changement des pentes dû à la transition des topologies de l'écoulement
- Surestimation par les corrélations empiriques importantes : régime à faible débit massique surfacique

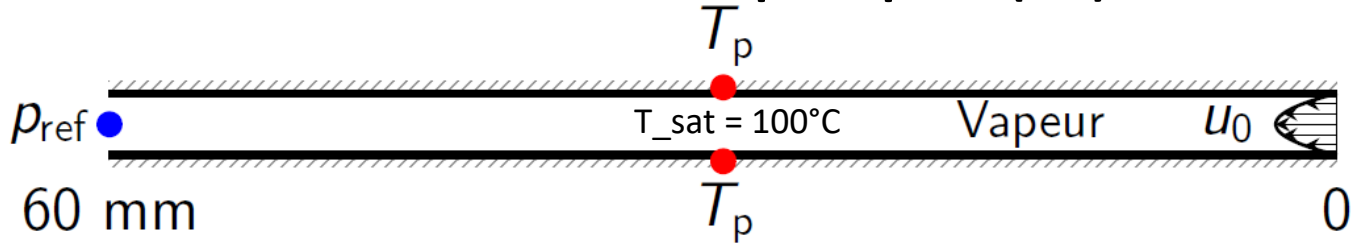


Perspectives

Approche numérique : Développement d'un outil numérique de type VOF (Volum of Fluid) = code maison DFMVOF .../... → thèse à venir ...

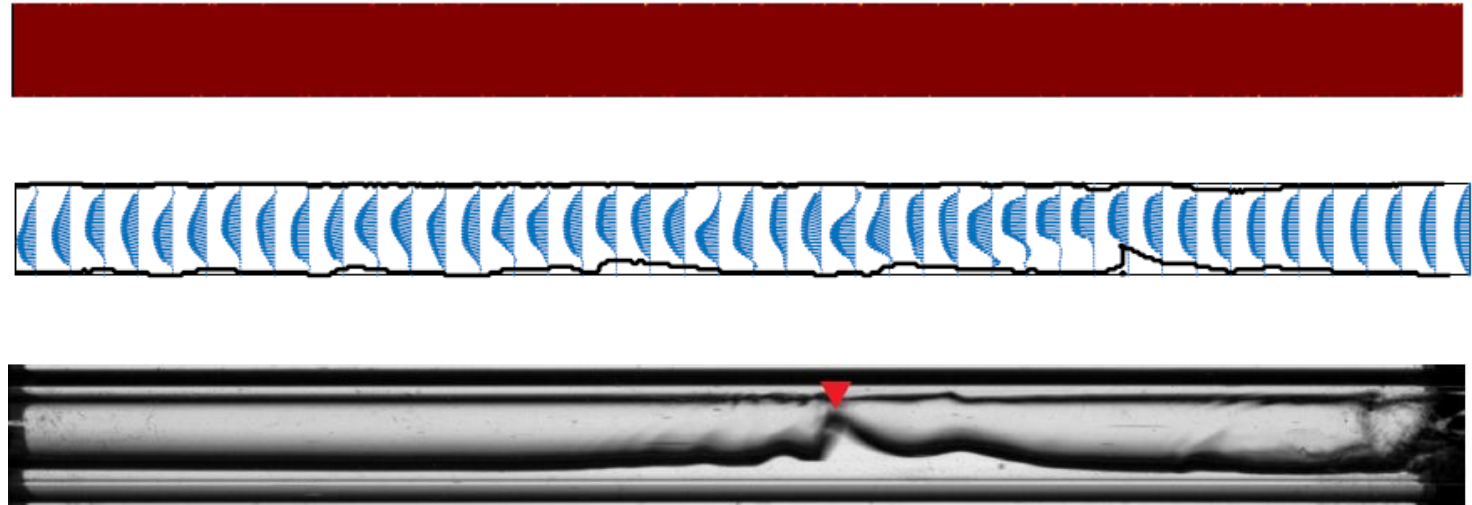


Condensation de la vapeur pure (2D)



- $u_0 = 1,5 \text{ m/s}$
- $T_p = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Maillage : 30×600 , $\Delta t = 1 \mu\text{s}$
- Temps de calcul : ≈ 3 semaines

Paramètres	Valeur
$\rho_{\text{liq}} - \rho_{\text{vap}}$	$957,9 \text{ kg/m}^3 - 0,5978 \text{ kg/m}^3$
$\mu_{\text{liq}} - \mu_{\text{vap}}$	$0,282 \times 10^{-3} \text{ kg/ms} - 1,227 \times 10^{-5} \text{ kg/ms}$
σ	$0,059 \text{ N/m}$
$\lambda_{\text{liq}} - \lambda_{\text{vap}}$	$0,679 \text{ W/mK} - 0,0251 \text{ W/mK}$
$c_{p,\text{liq}} - c_{p,\text{vap}}$	$4217 \text{ J/kgK} - 2029 \text{ J/kgK}$
L_{vap}	$2,257 \times 10^6 \text{ J/kg}$





SOCIÉTÉ FRANÇAISE DE THERMIQUE
Groupe thématique « ECHANGEURS »

Journée thématique – Jeudi 26 janvier 2023

*Échangeurs thermiques et multi-fonctionnels :
récents développements et perspectives*



Etude expérimentale d'un échangeur à condensation à mini-canaux

Nam LE, Dominique COUTON*, Matthieu FENOT, Frédéric PLOURDE

*Institut P' (UPR CNRS 3346) – Dépt. FTC – Equipe COST (Convection,
Optimisation, Systèmes Thermiques)*



MERCI DE VOTRE ATTENTION !