

Sujet de la thèse

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES ET HYDRODYNAMIQUES D'UN ÉCOULEMENT D'HÉLIUM NORMAL (He I) DIPHASIQUE EN CIRCULATION NATURELLE POUR LE REFROIDISSEMENT DES AIMANTS SUPRACONDUCTEURS

Lahcène BENKHEIRA



Directeur de thèse : Pr. Mohamed Souhar (INPL Nancy)

dapnia



saclay

Co-directeur de thèse : Dr. Bertrand Baudouy (CEA Saclay)

Motivation de l'étude

Ces travaux de recherche ont été effectués au

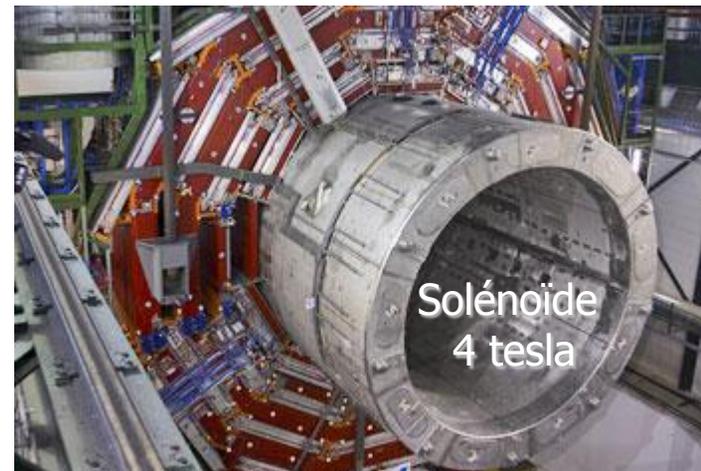


Dapnia/SACM/LCSE

En collaboration avec



**Dimensionnement du système de refroidissement
cryogénique de l'aimant supraconducteur du détecteur
de particules CMS pour le LHC**



Plan de la présentation

- ↳ **Contexte et motivation de l'étude**
- ↳ **Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques**
 - Cryostat et insert
 - Techniques de mesure
- ↳ **Présentation et analyse des résultats expérimentaux**
 - Thermiques
 - Hydrodynamiques
- ↳ **Conclusion générale et perspectives**


 **Contexte et motivation de l'étude****Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques**

- Cryostat et insert
- Techniques de mesure

Présentation et analyse des résultats expérimentaux

- Thermiques
- Hydrodynamiques

Conclusion générale et perspectives

Enjeu scientifique et technologique du LHC

↳ Enjeu scientifique

- Le Grand collisionneur de hadrons, (Large Hadron Collider, LHC) est un accélérateur de particules qui sondera la matière plus profondément que jamais
- Collisions à 14 TeV

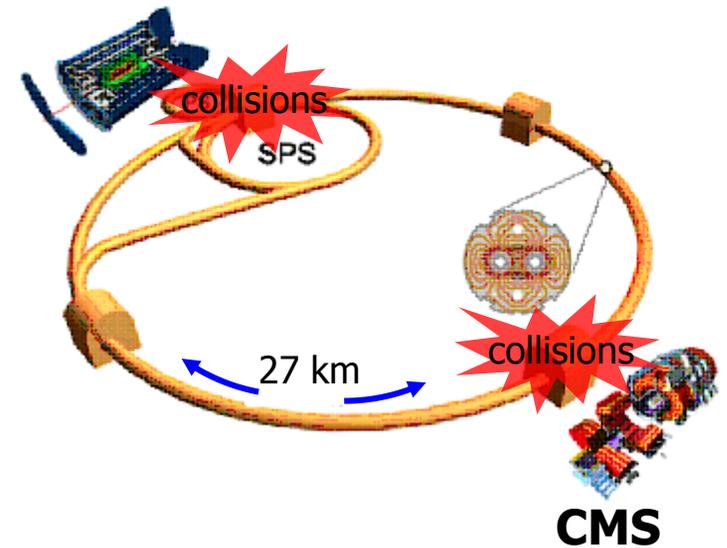
↳ Particule de Higgs ?

↳ Enjeu technologique

- Réaliser une telle machine **⇒** Aimants supraconducteurs

↳ Besoin de champs magnétiques intenses

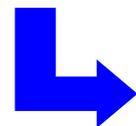
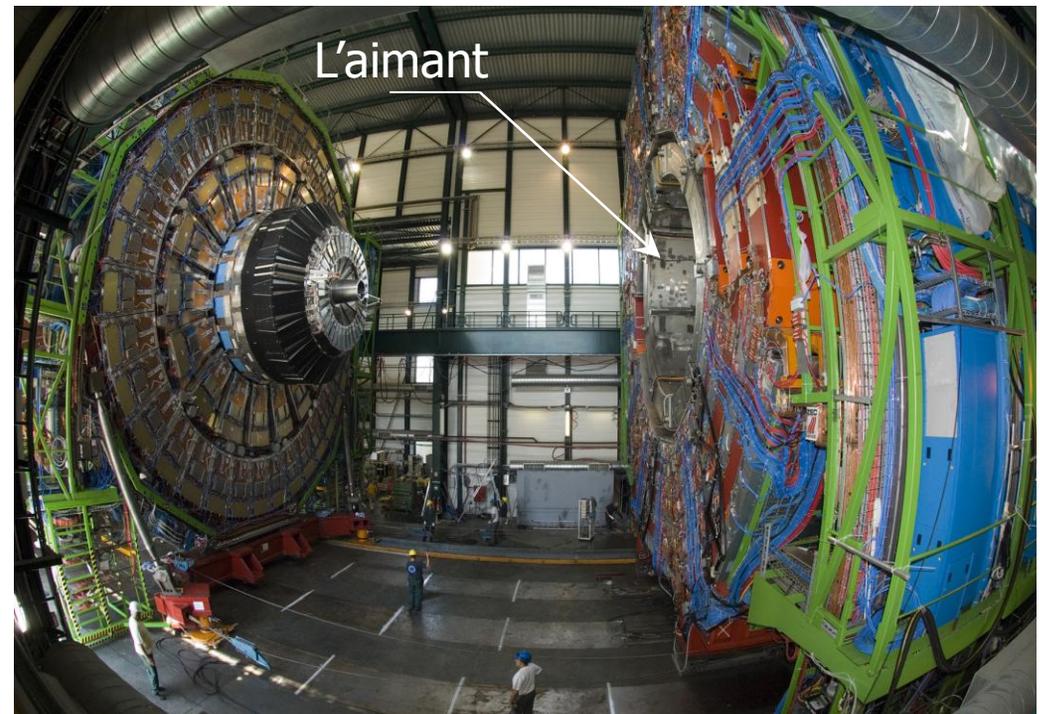
↳ La propriété qu'ont certains matériaux de conduire le courant électrique sans dissipation d'énergie à condition de les **refroidir jusqu'à une température très basse voisine de celle de l'hélium liquide**



Aimant supraconducteur du détecteur CMS

- Hauteur : 12,5 m
- Diamètre externe : 7 m
- Champ magnétique: 4 teslas
- Courant électrique nominal : 19500 A

Vue d'ensemble de **CMS** avant fermeture



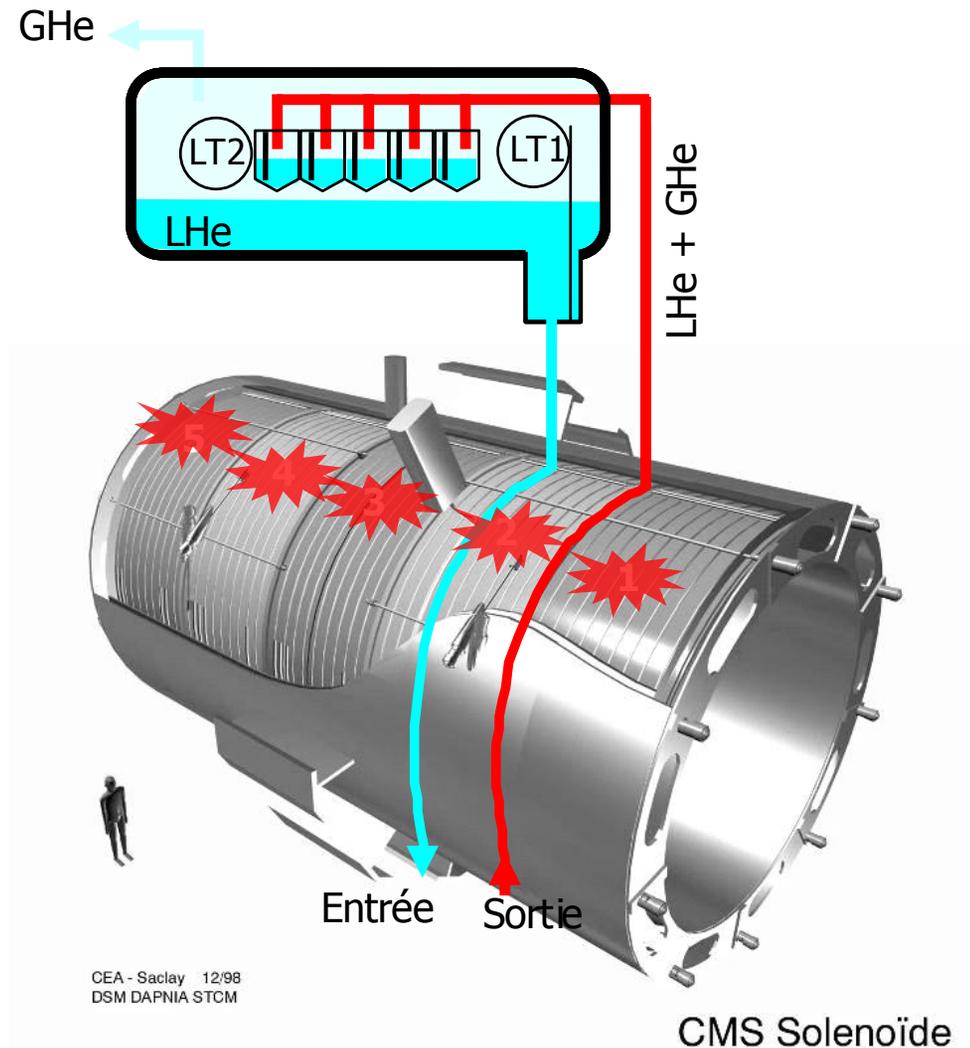
Aimant supraconducteur ayant la plus importante énergie magnétique stockée de 2,7 GJ

Systeme cryogénique de l'aimant de CMS

- ↳ Le solénoïde de CMS est composé de 5 modules
- ↳ L'He I saturé à 4,5 K circule à travers des tubes de diamètre intérieur de 14 mm
- ↳ L'écoulement est créé par le principe thermosiphon

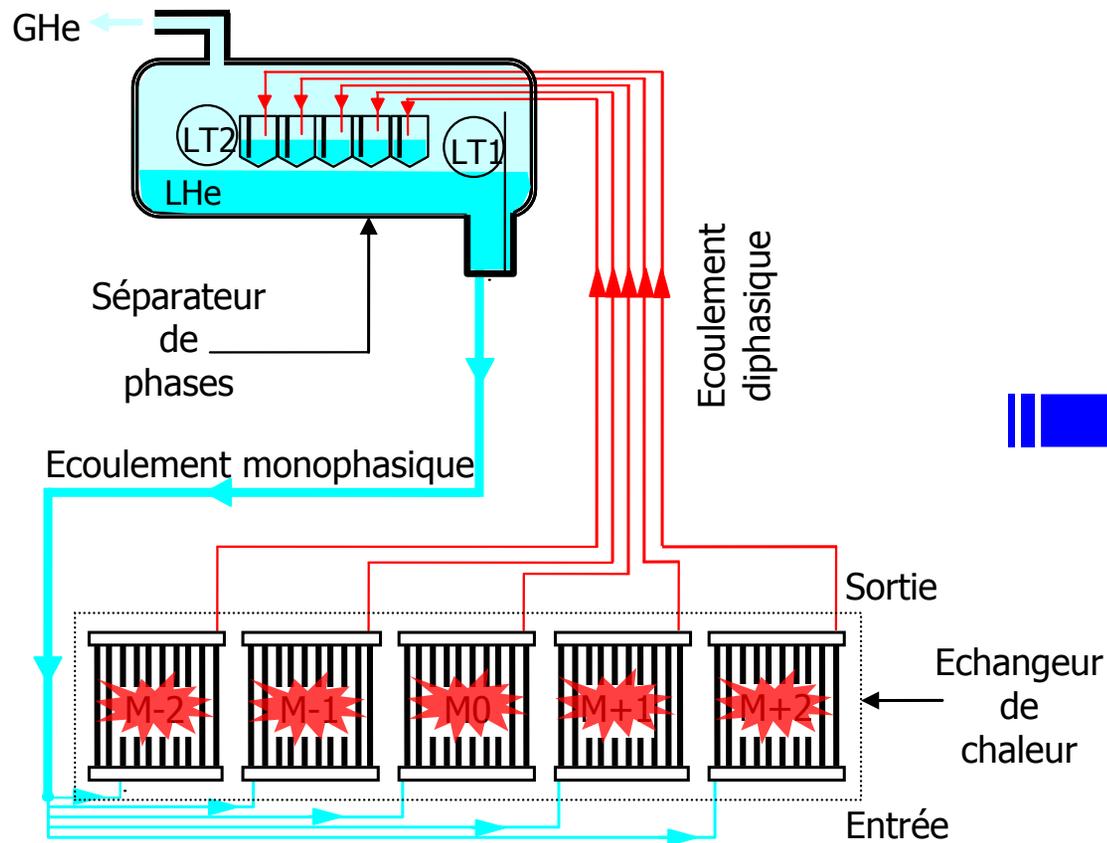
↳ Avantages

- ⇒ Passivité : sans pompage, sans système de pressurisation
- ⇒ Mise en œuvre simple
- ⇒ Faible coût

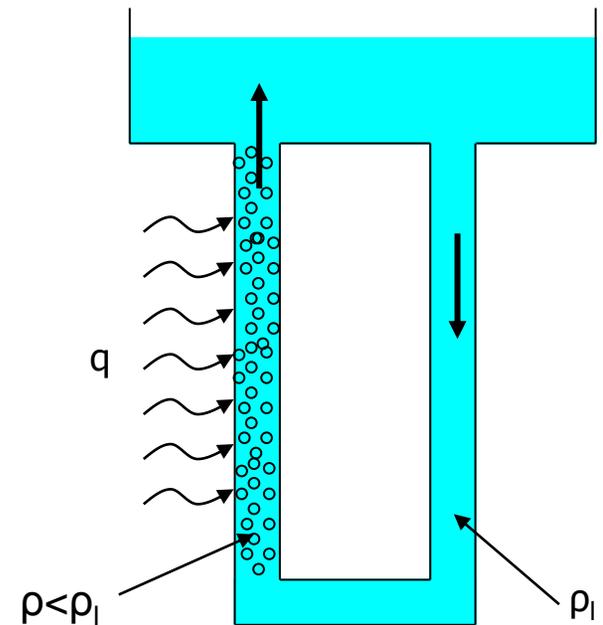


Problématique

Boucle thermosiphon multibranches



Boucle thermosiphon monobranch



Propriétés thermohydrauliques de l'écoulement d'He I diphasique en mode thermosiphon ?

Boucles thermosiphons diphasiques

↳ La plupart des études concernent les fluides classiques notamment eau-vapeur et eau-air

↳ Des cartes d'écoulements

↳ Des lois de comportement
- les pertes de charges
- le transfert thermique

↳ Ces travaux ne sont pas directement transposables au cas de l'hélium vu la grande différence de propriétés physiques

Comparaison massique

Fluide	ρ_l (kg/m ³)	ρ_v (kg/m ³)	ρ_l/ρ_v
Eau	1000	0,6	1000
Hélium	125	17	7

Comparaison thermique

Fluide	C_p (J/kg.K)	L_v (J/kg)	C_p/L_v (K ⁻¹)
Eau	2250	4212	1000
Hélium	20000	4480	4

↳ Une étude sur ce sujet s'avère indispensable

Contexte et motivation de l'étude



Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques

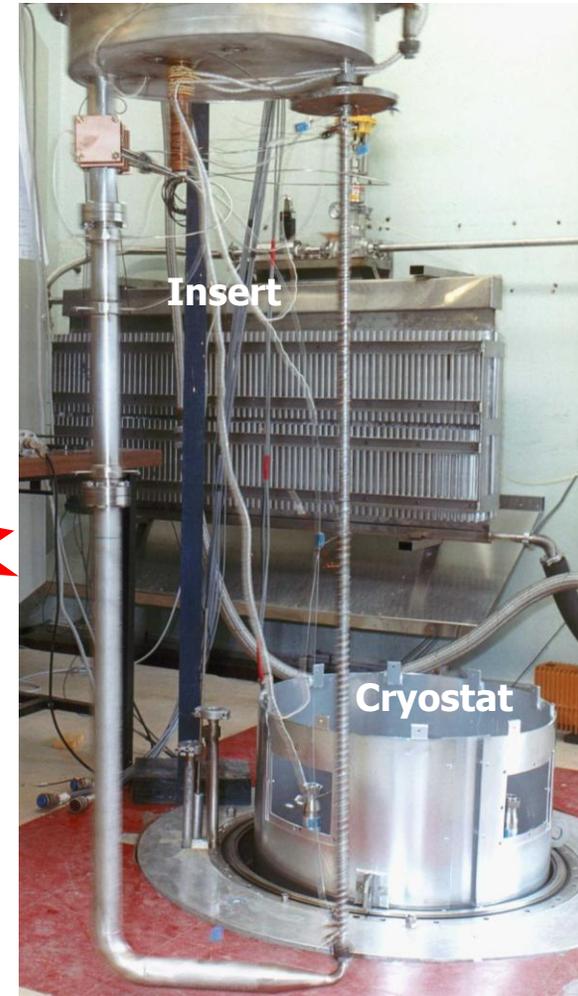
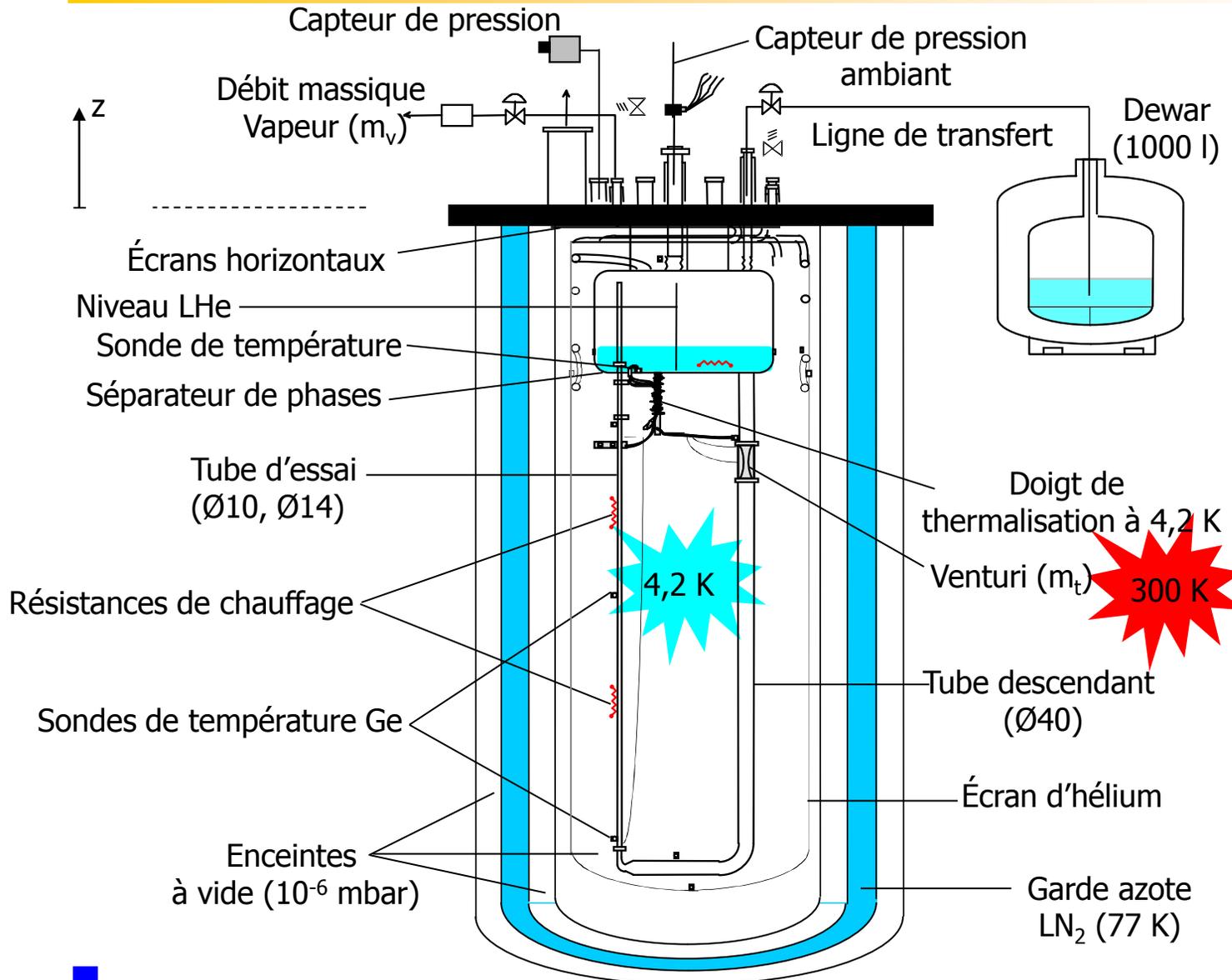
- **Cryostat et insert**
- **Techniques de mesure**

Présentation et analyse des résultats expérimentaux

- **Thermiques**
- **Hydrodynamiques**

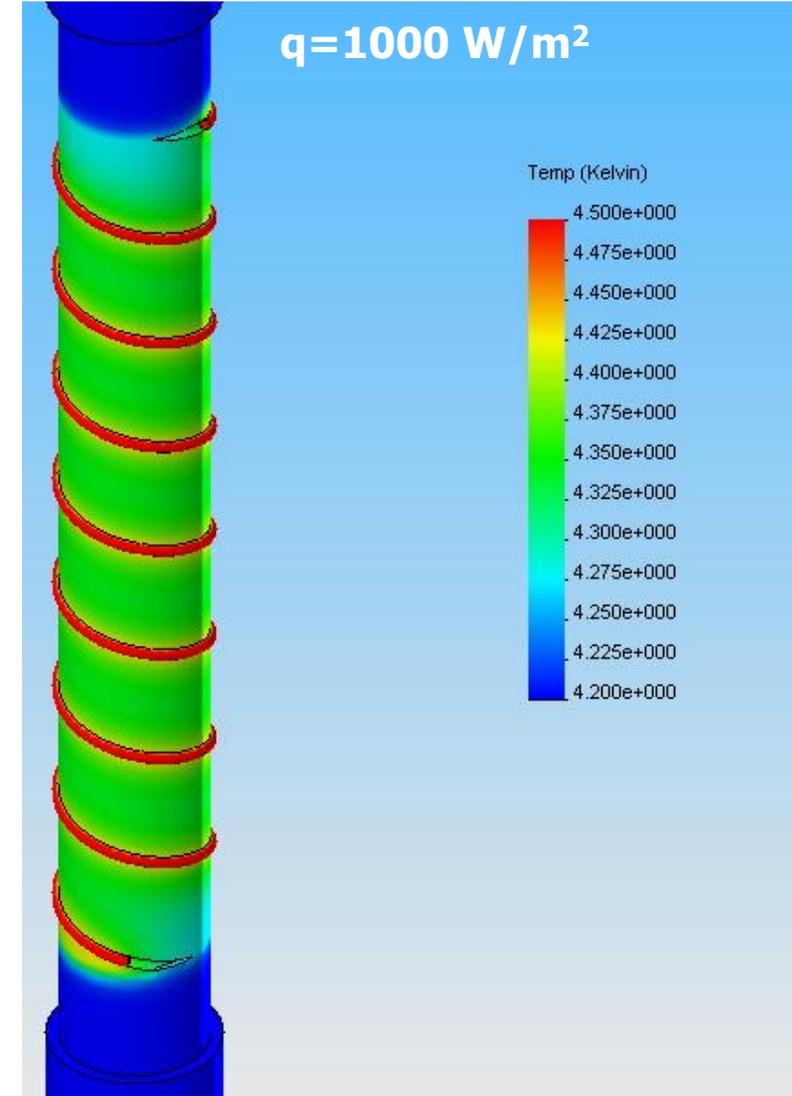
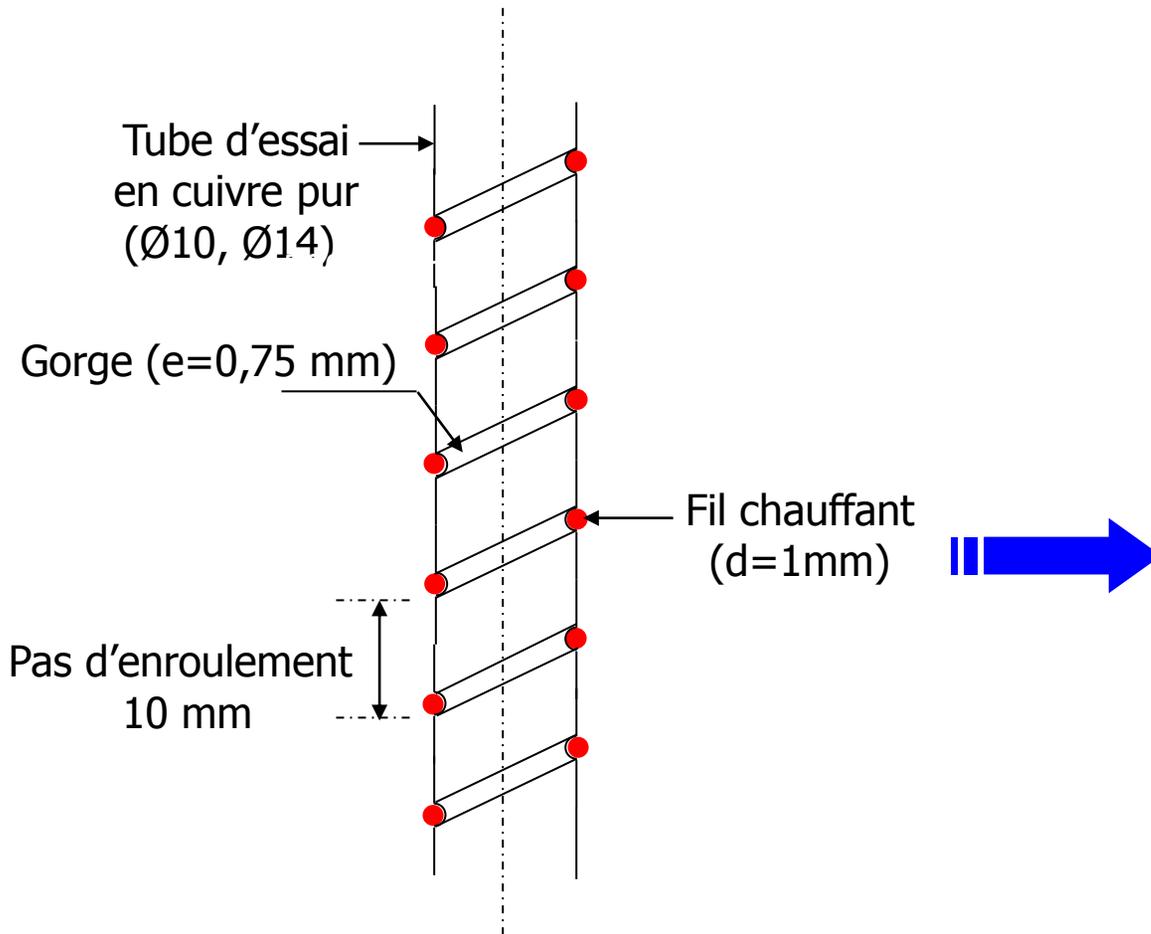
Conclusion générale et perspectives

Système expérimental



↳ Pertes thermiques du système expérimental ➡ $m_v=0,08$ g/s @ $q=0$ W/m² ➡ 1,7 W

Système de chauffage



Le tube d'essai est uniformément chauffé

Mesure de la température pariétale T_p

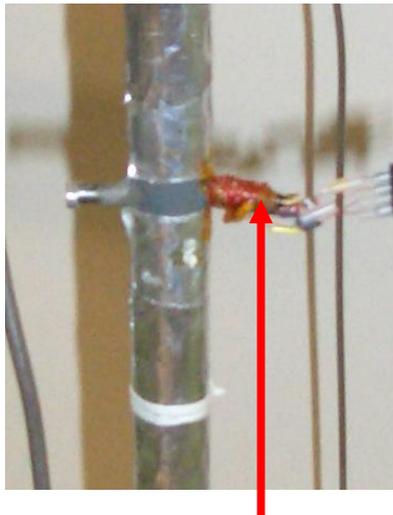
↳ Sonde de température utilisée



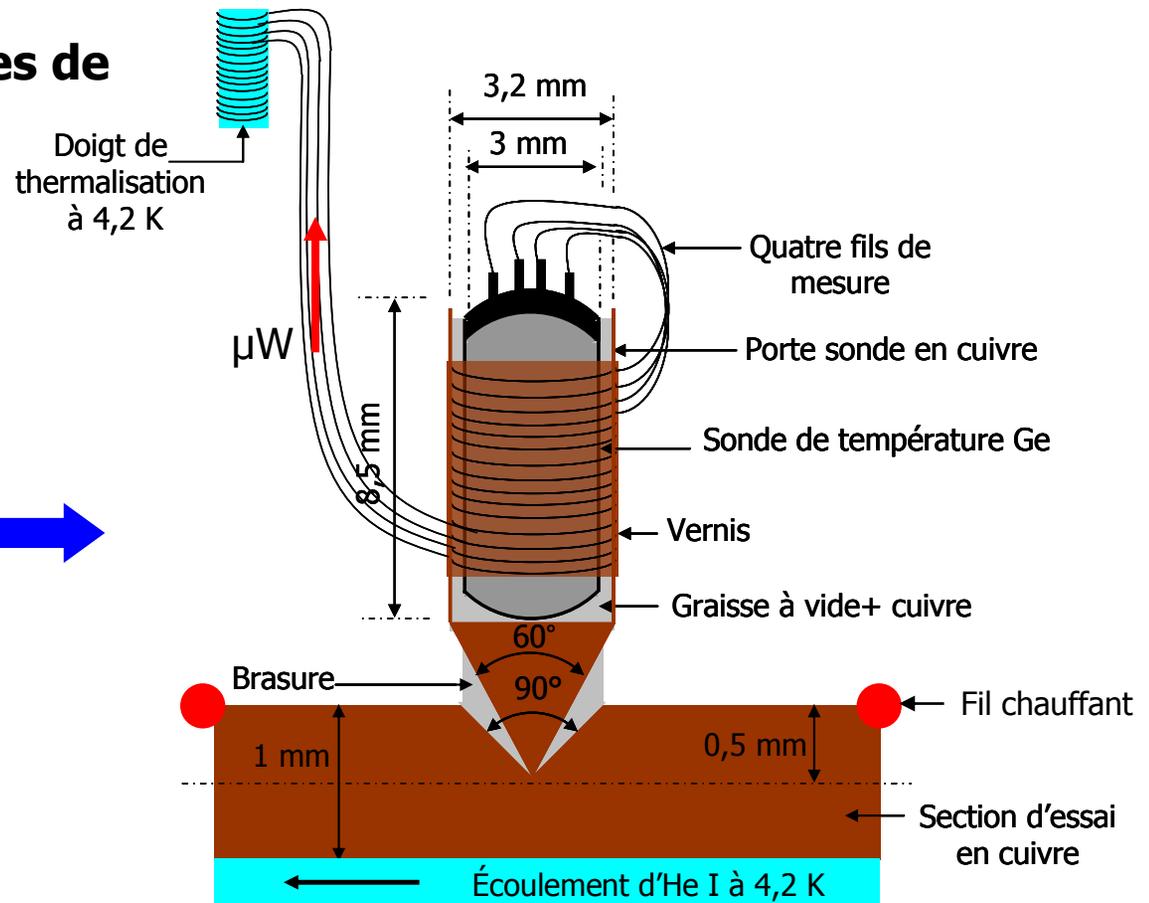
- $dR/dT \approx 10^4 \Omega/K$ @ 4,2 K

- Précision 3 mK

↳ Méthode de montage des sondes de température Ge



Sonde de température Ge dans son support



Mesure de la pression différentielle Δp

Mesure à chaud

- Capteurs de pression à l'extérieur du cryostat et reliés avec les points de mesure avec des capillaires

$$\underbrace{p_1 - p_2}_{\Delta p_{\text{recherchée}}} = \underbrace{p_{1'} - p_{2'}}_{\Delta p_{\text{mesurée}}} + \int_{z_1}^{z_2} \rho_c g dz$$

Chaufferettes

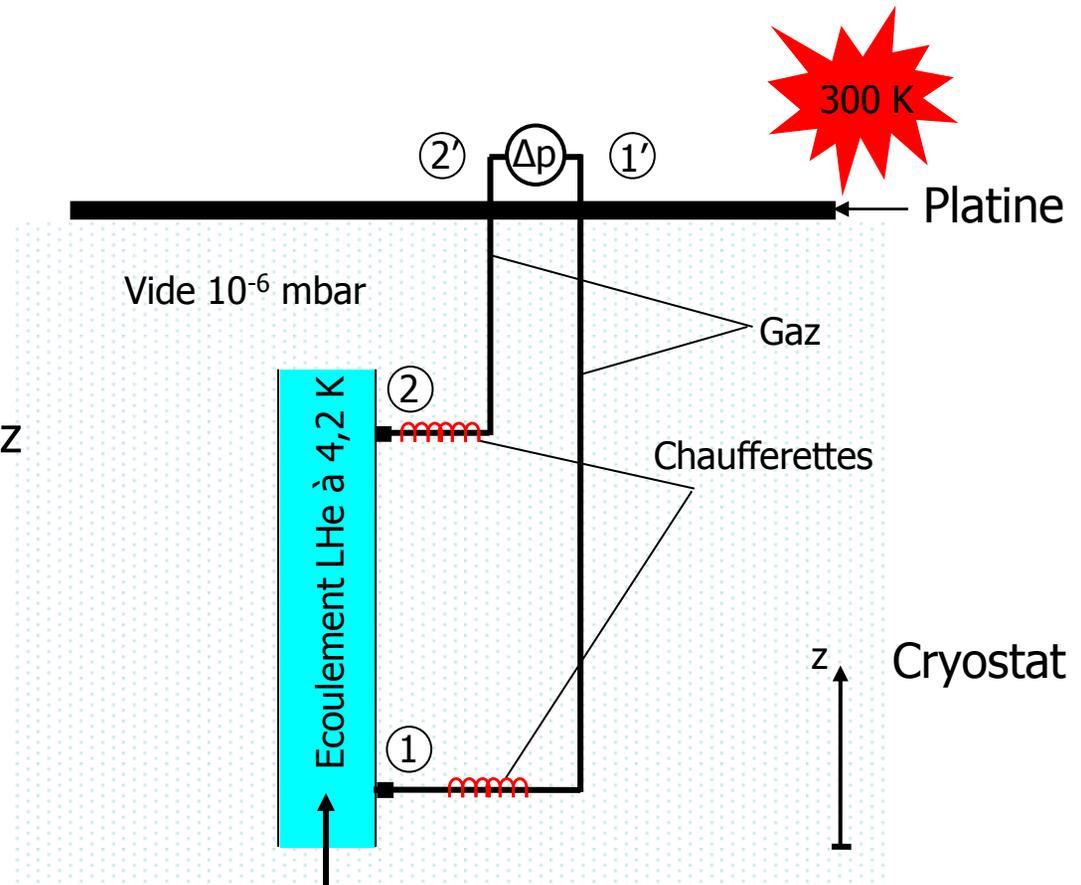
 $Q = 25 \text{ mW}$

$$\Delta p_{\text{recherchée}} = \Delta p_{\text{mesurée}} + \int_{z_1}^{z_2} \rho_v g dz$$

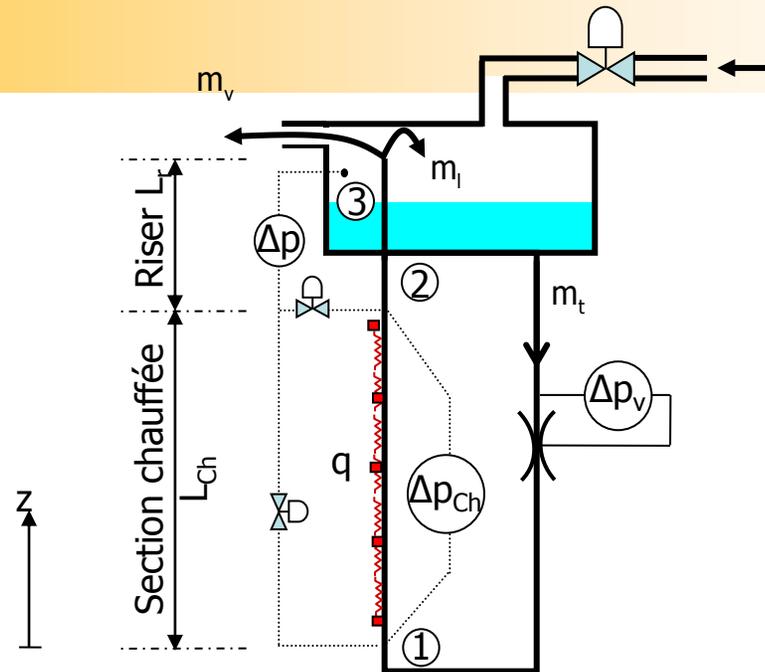
Calcul de $\int_{z_1}^{z_2} \rho_v g dz$

$$\int_{z_1}^{z_2} \rho_v g dz = 4,70 \text{ Pa}$$

Δp mesuré à 300 K $\approx \Delta p$ à 4,2 K



Disposition des capteurs



↳ Pour les deux tubes d'essai testés $\varnothing 10$ et $\varnothing 14$:

- Δp_v \Rightarrow La différence de pression du venturi $\Rightarrow m_t$
- Δp_{ch} (1 \rightarrow 2) \Rightarrow La chute de pression le long de la partie chauffée
- Δp_{13} (1 \rightarrow 3) \Rightarrow La charge motrice
- Δp_{23} (2 \rightarrow 3) \Rightarrow La chute de pression le long du riser
- m_v \Rightarrow Le débit massique vapeur sortant (débitmètre Brooks)
- Mesures de température de paroi T_p à différentes hauteurs

Contexte et motivation de l'étude

Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques

- Cryostat et insert
- Techniques de mesure



Présentation et analyse des résultats expérimentaux

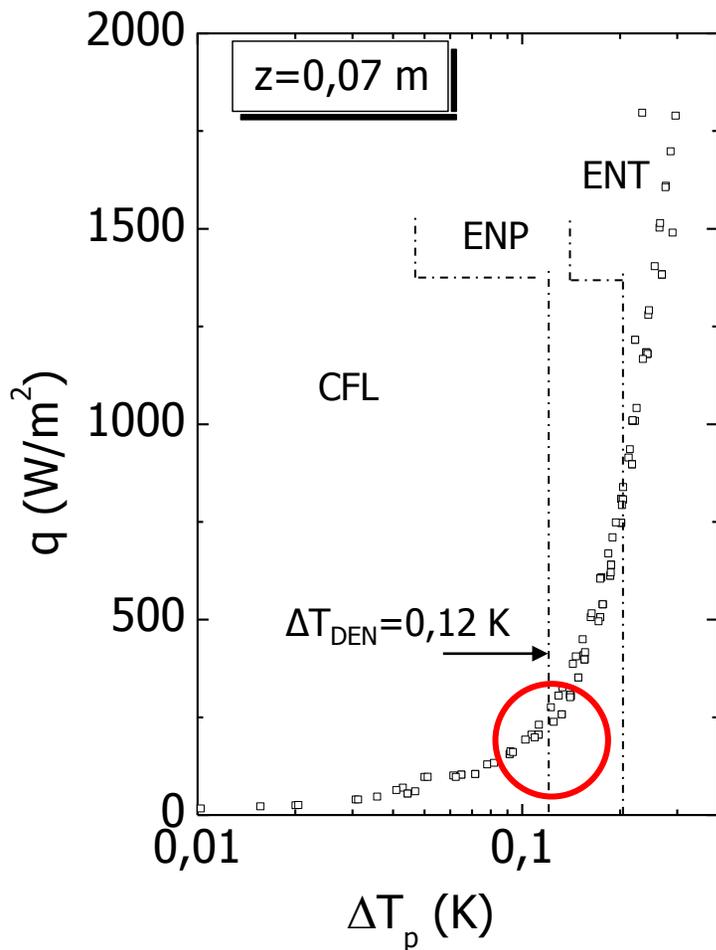
- **Thermiques**
- Hydrodynamiques

Conclusion générale et perspectives

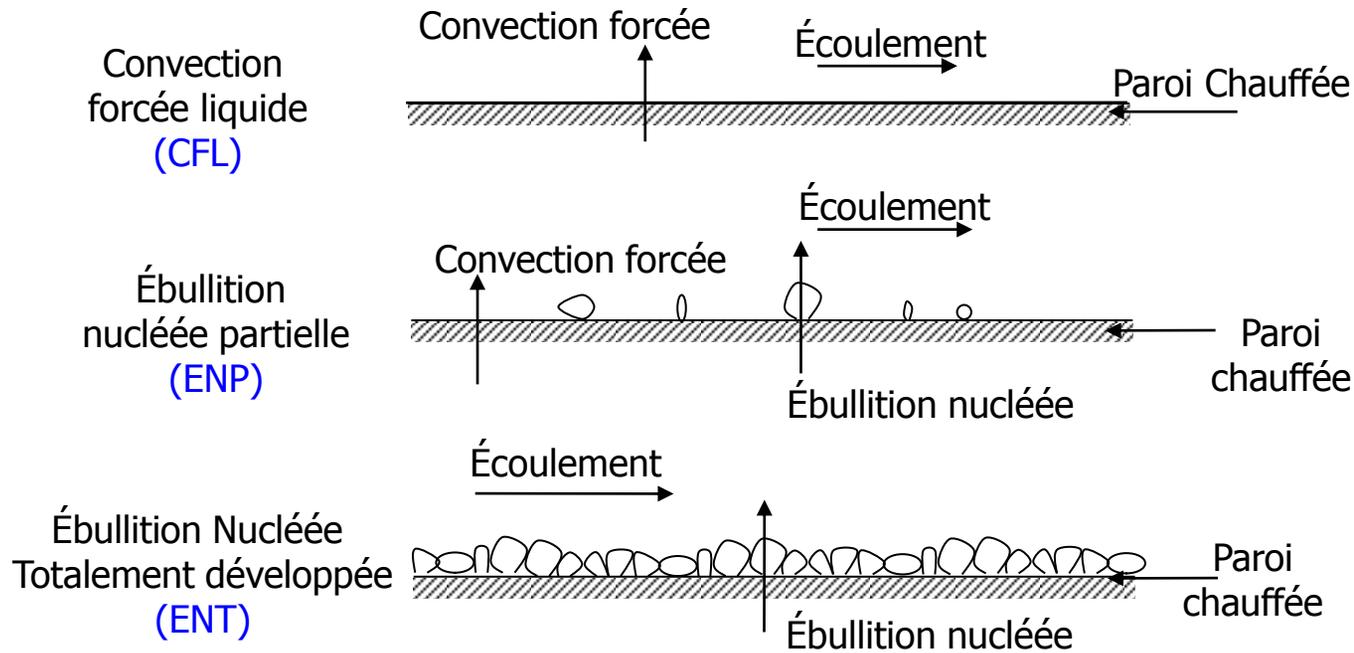
Courbes d'ébullition

$q = f(\Delta T_p)$

- q flux de chaleur appliqué
- $\Delta T_p = T_p - T_f$ surchauffe de la paroi



3 régions d'échanges thermiques



Point de déclenchement de l'ébullition nucléée (DEN)

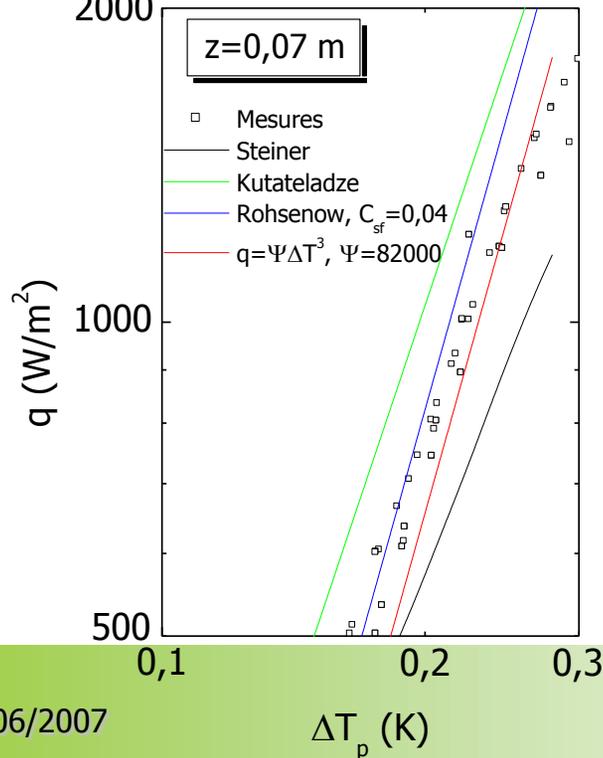
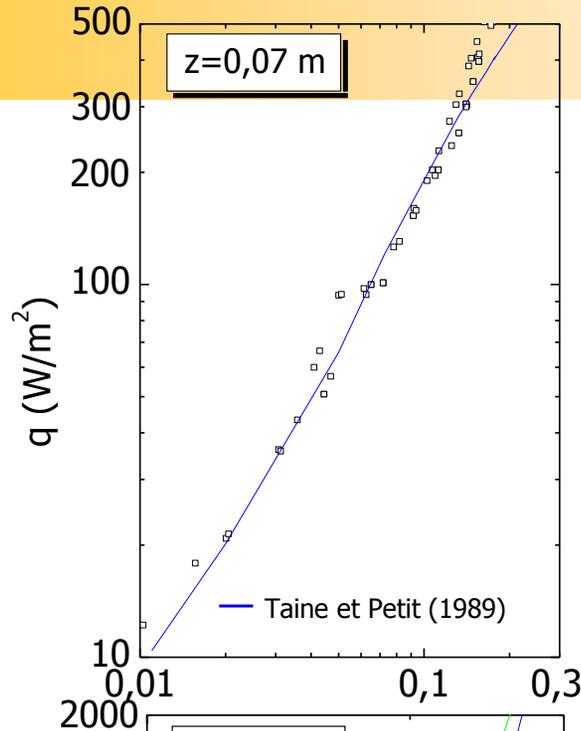
$\Delta T_{DEN}|_{mesurée} \approx 10 \Delta T_{DEN}|_{prédite}$ (Théorie de Graham et Hsu en bain (1960))

Effet de la convection forcée

Prédiction des courbes d'ébullition

↳ **Région CFL**
monophasique

$$q = h_{CV} \Delta T_p$$



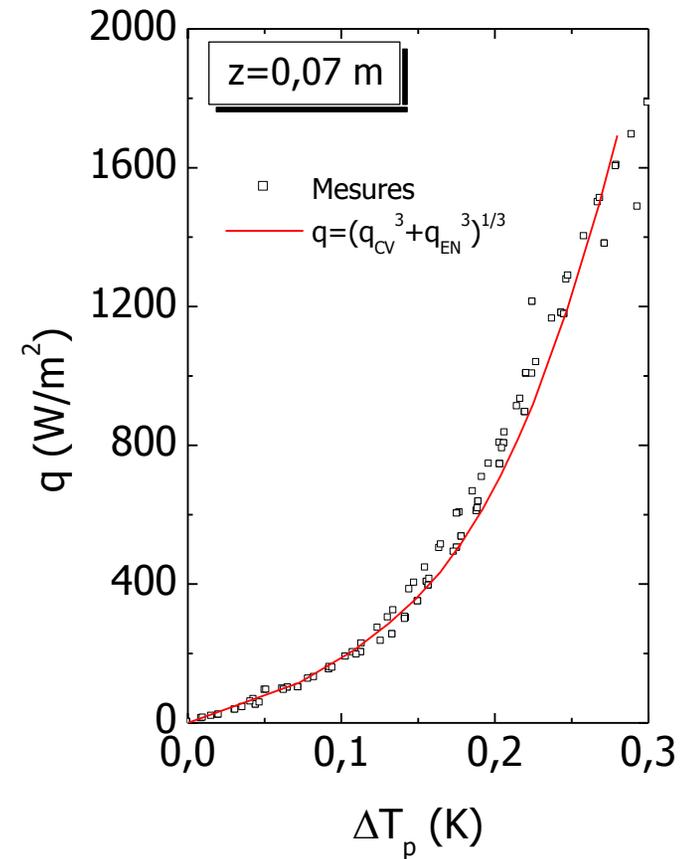
↳ **Région ENT**
diphase

$$q = h_{EN} \Delta T_p$$

↳ **Région ENP**
diphase

$$q = h_{TP} \Delta T_p$$

avec $h_{TP} = (h_{CV}^3 + h_{EN}^3)^{1/3}$



Comparaison entre modèles d'ébullition convective

↳ Modèle proposé (10% d'écart)

⇒ $q = h_{TP} \Delta T_p$ avec $h_{TP} = (h_{CV}^3 + h_{EN}^3)^{1/3}$

Corrélation
de
Taine et Petit (1989)

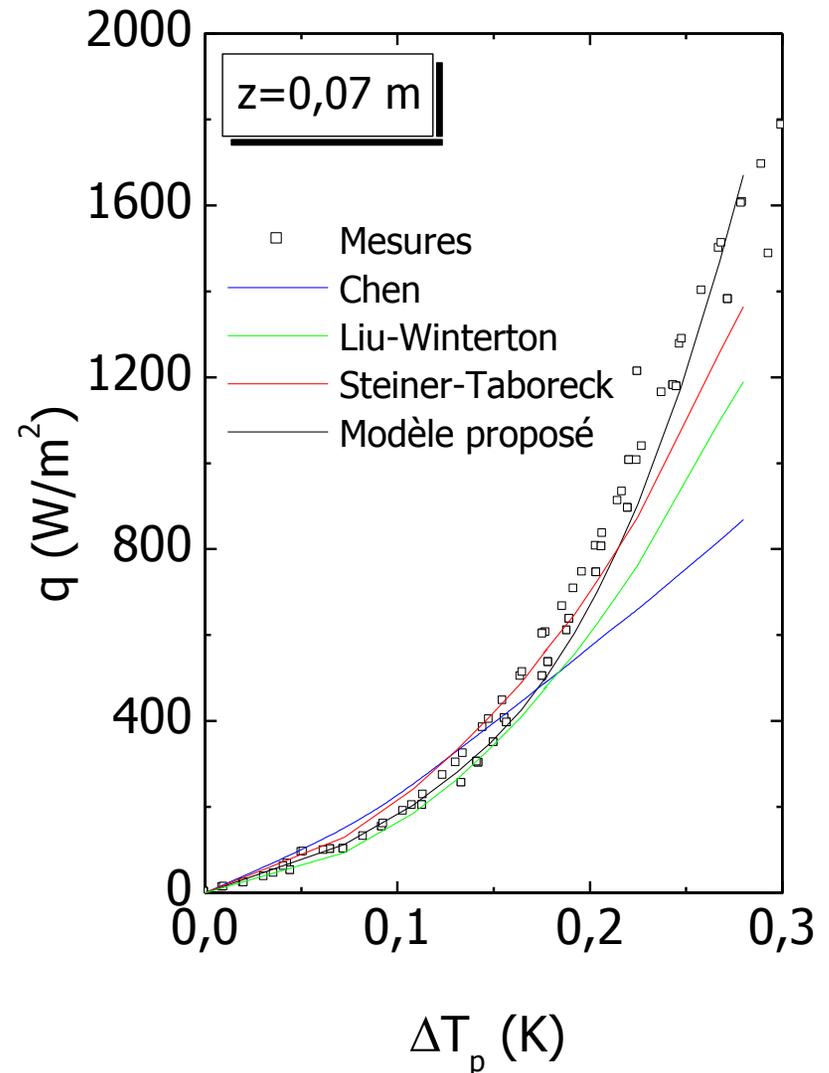
$$h_{EN} = \psi \Delta T^3$$
$$\psi = 82000$$

↳ Modèles asymptotiques existants

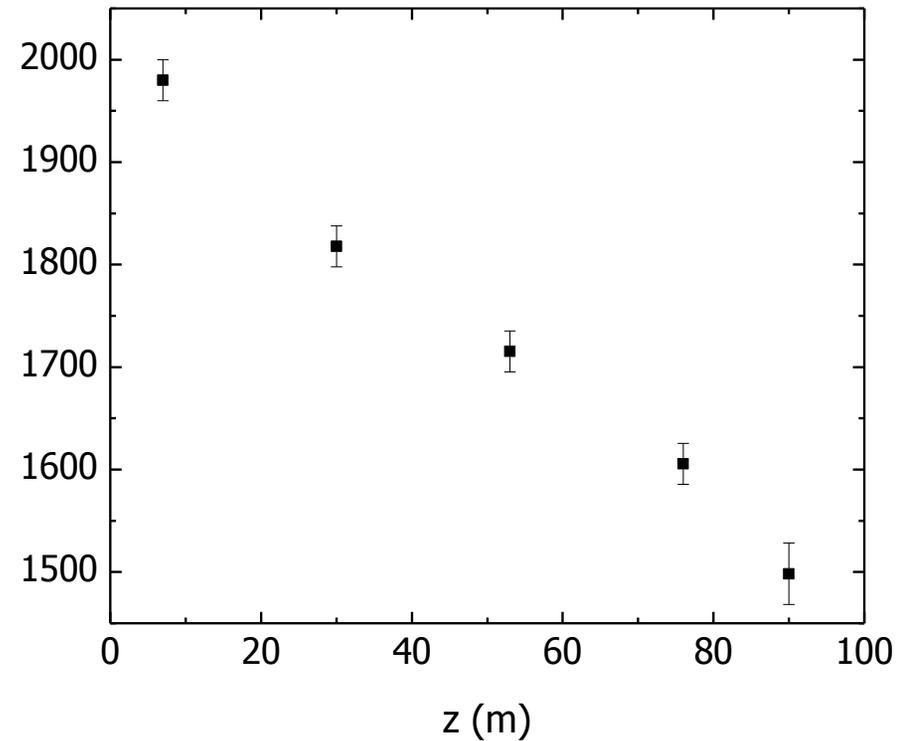
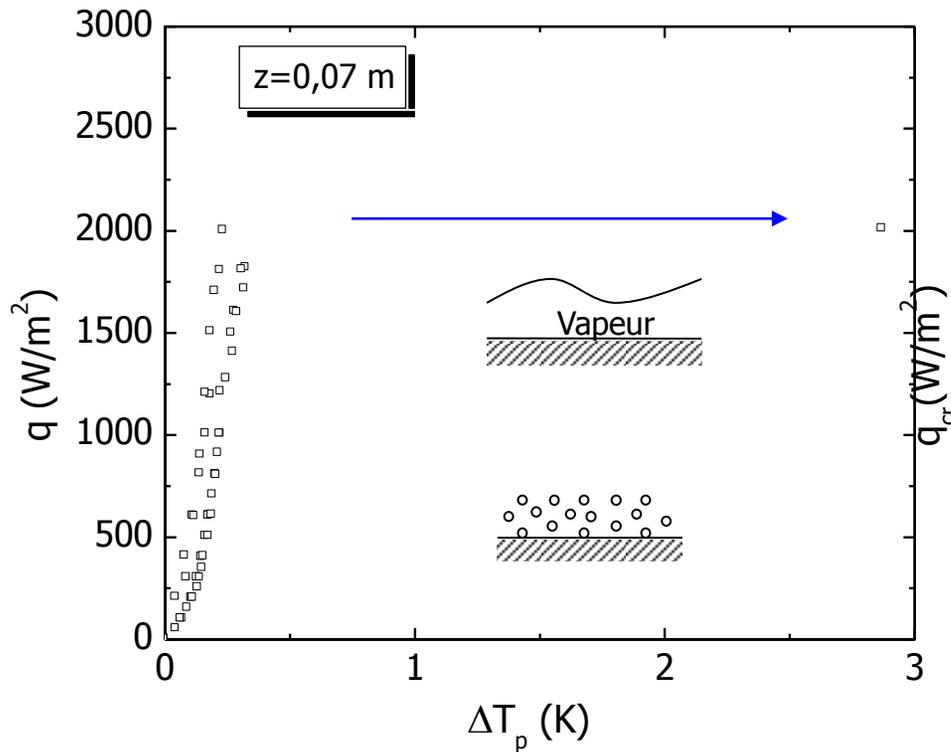
⇒ Modèle de **Steiner-Taboreck** (1992) avec $n=3$

⇒ Modèle de **Liu-Winterton** (1991) avec $n=2$

⇒ Modèle de **Chen** (1966) avec $n=1$



Crises d'ébullition



- ↳ Un saut de température allant de 3 à 5 K est observé **↳** Formation d'un film vapeur en paroi
- ↳ Le flux de chaleur correspondant est appelé flux critique q_{cr}
- ↳ Pour $\varnothing 10$, q_{cr} varie entre 1500 à 2000 W/m²

Comparaison entre modèles de flux de chaleur critique

Écoulements thermosiphons

↳ Corrélation de **Lehongre** en He I (1968)

↳ Corrélation de **Monde** (1990)

Modèle proposé (7 % d'écart)

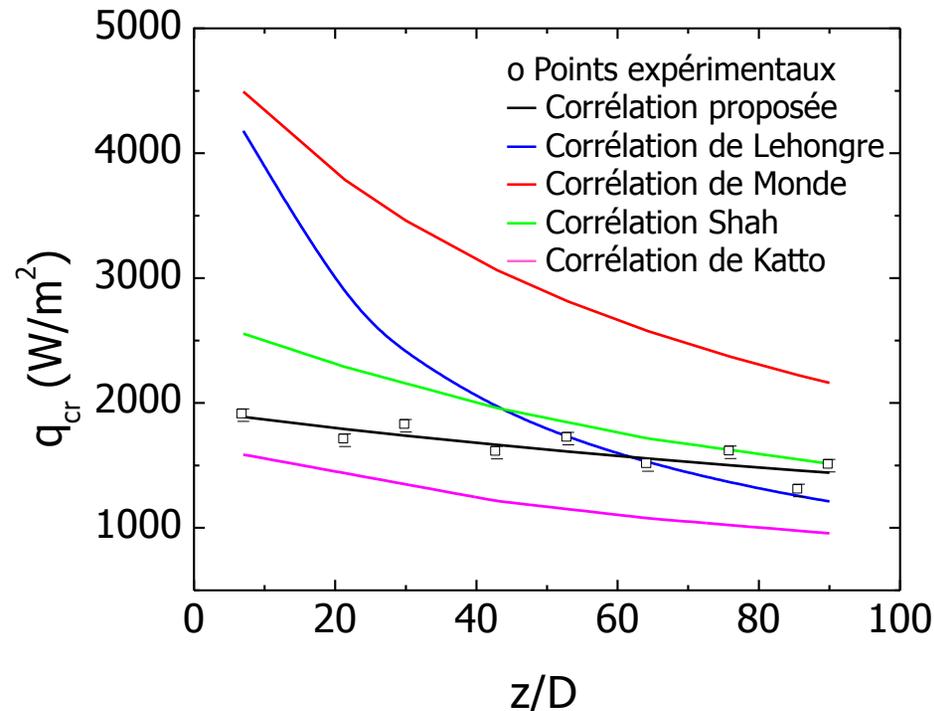
$$Ku = \frac{1}{24,29 + 0,093 \left(\frac{z}{D} \right)}$$

Écoulements en convection forcée

↳ Corrélation de **Shah** (1979)

↳ Corrélation de **Katto** (1984)

$$\text{Avec } Ku = \frac{q_{cr}}{L_v \sqrt{\rho_v} (\sigma g (\rho_l - \rho_v))^{0,25}}$$



Contexte et motivation de l'étude

Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques

- Cryostat et insert
- Techniques de mesure

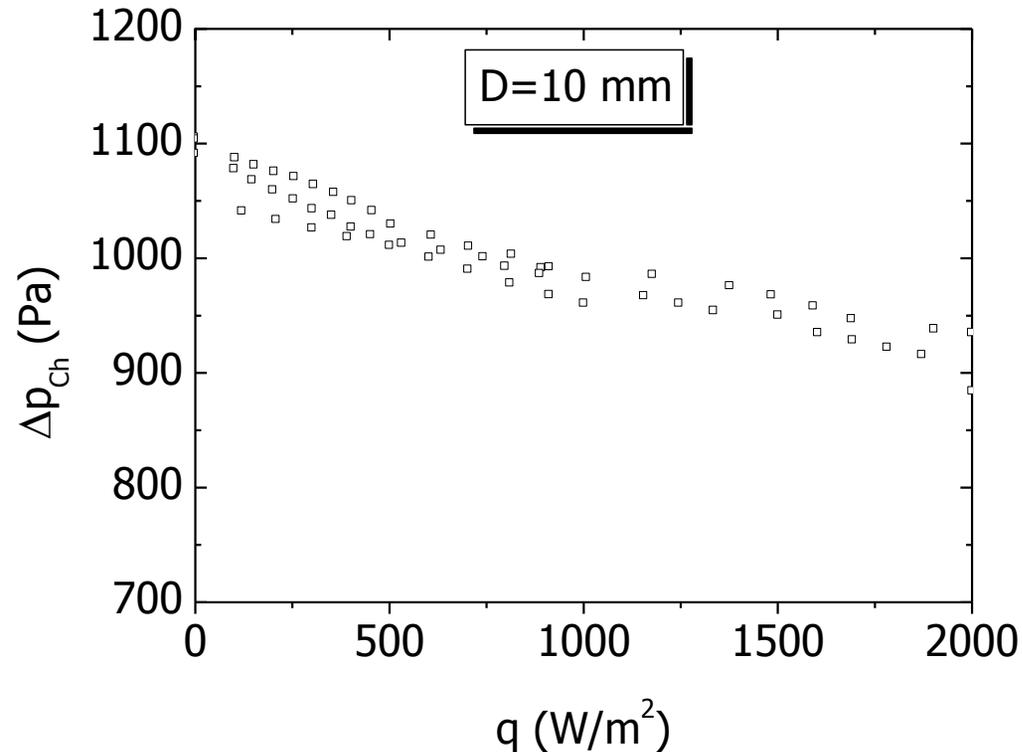


Présentation et analyse des résultats expérimentaux

- Thermiques
- Hydrodynamiques

Conclusion générale et perspectives

Chute de pression Δp_{ch}



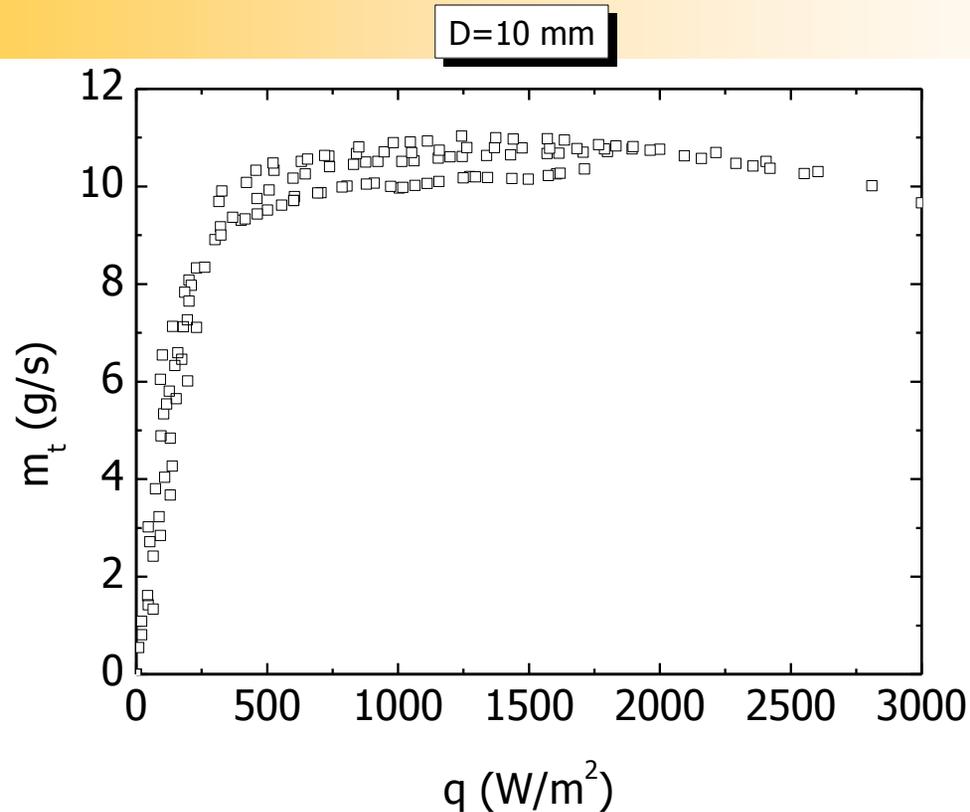
↳ Dans la gamme $0 \leq q \leq 2000 \text{ W/m}^2$, Δp_{ch} diminue avec l'augmentation de q

↳ La prédominance du terme de gravité dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement:

$$\Delta p_{ch} = \Delta p_g + \Delta p_a + \Delta p_f$$

$q \nearrow$ le taux de vide \nearrow et $\Delta p_g \searrow$, Δp_a et $\Delta p_f \nearrow$ légèrement

Évolution du débit massique de circulation m_t

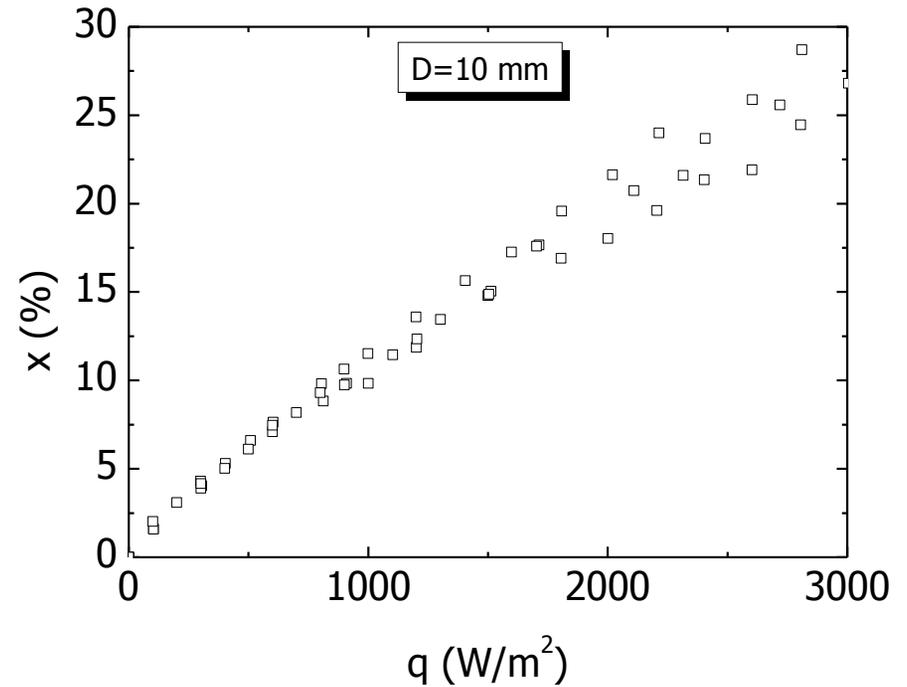
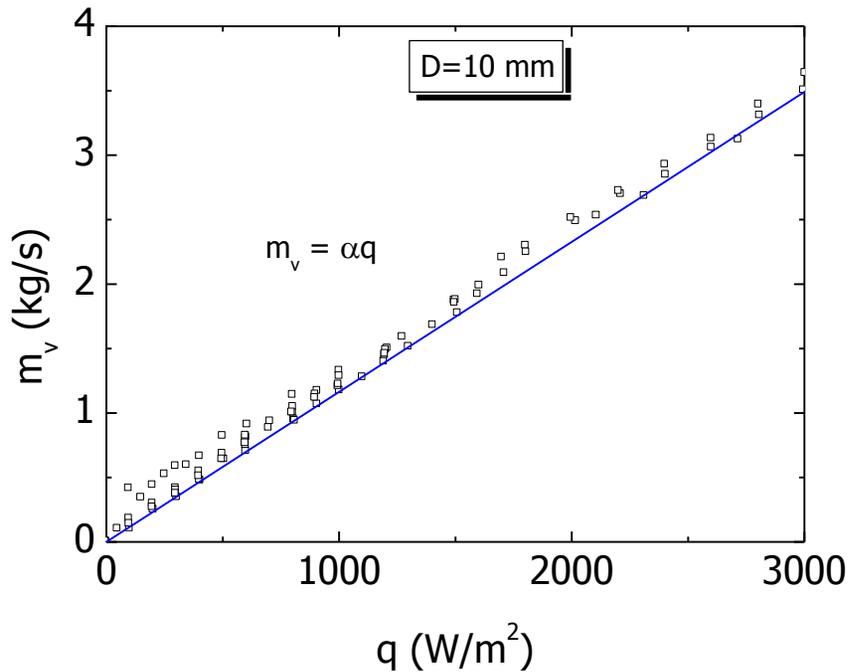


↳ Pour $0 \leq q \leq 500 \text{ W/m}^2$, m_t augmente rapidement avec q jusqu'à une valeur de 10 g/s

↳ Le gradient de pression gravitationnel domine le gradient de pression total $\Rightarrow m_t$ croît

↳ Le gradient de pression par frottement devient de plus en plus important $\Rightarrow m_t$ diminue

Évolution de m_v et x



⇒ m_v augmente constamment et d'une manière linéaire avec le flux de chaleur q

↳ $m_v \propto q$

⇒ x est déduit des mesures de m_t et de m_v :

↳ $x = m_v / m_t$

⇒ x augmente continûment avec l'augmentation de q

↳ $x_{\max} = 30\%$ à $q = 3000 \text{ W/m}^2$

Modélisation de l'écoulement à travers la boucle (1/4)

Objectif

Prédire les propriétés hydrodynamiques de l'écoulement thermosiphon notamment le débit massique total m_t et le titre massique vapeur x créés par la densité du flux de chaleur q .

Description du modèle

Équation des quantités de mouvement

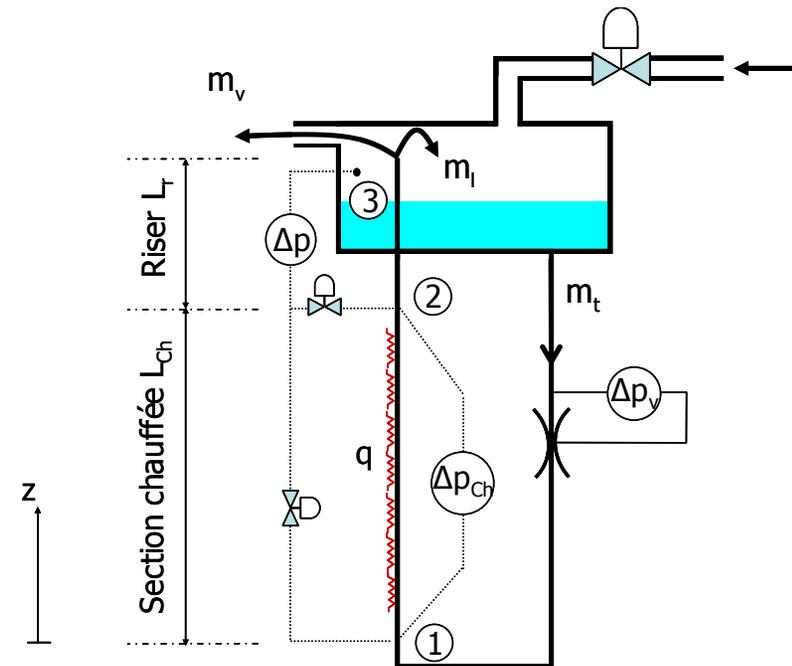
$$\Delta p_{ch} + \Delta p_r + \Delta p_s = \Delta p_{13}$$

Avec :

$$\Delta p_s = K_s \frac{m_t^2}{2A^2 (\rho_v a + (1-a)\rho_l)}, K_s = 1$$

Équation de l'énergie

$$m_t C_{pl} (T_{sat}(z) - T_{sat}(z_{sref})) + m_t L_v(z)x + \frac{8m_t^3}{\pi^2 D^4 \rho_l^2} \left[\frac{x^3 \rho_l^2}{a^2 \rho_v^2} + \frac{(1-x)^3}{(1-a)^2} - 1 \right] + m_t g (z - z_{sref}) = q \pi D (z - z_{sref})$$



Modélisation de l'écoulement à travers la boucle (2/4)

↳ Les propriétés physiques de l'écoulement sont calculées à partir du code numérique HEPAK

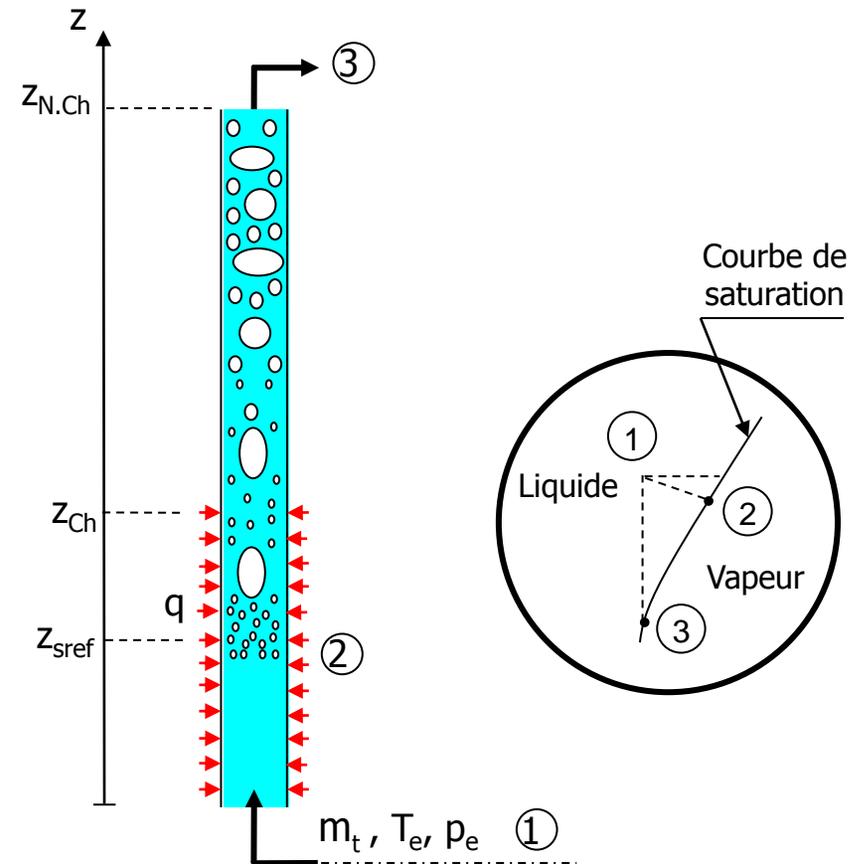
↳ Détermination de la frontière entre les zones d'écoulement diphasique et monophasique

$$T_l(z) = T_{\text{sat}}(p_z)$$

Tels que :

$$- T_l(z) = T_e + \frac{q\pi D - m_t g}{m_t C_{pl}} z$$

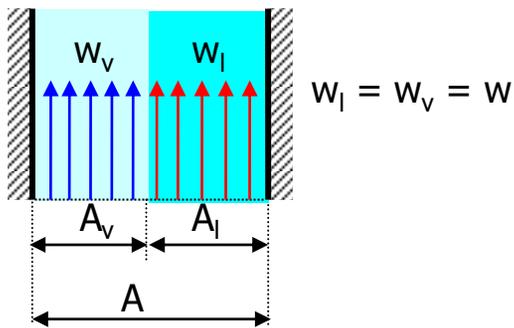
$$- p_z = p_e + \frac{2C_{flo} m_t^2 z}{D\rho_l A^2} + \rho_l g z \left[1 - \beta \frac{q\pi D}{2m_t C_{pl}} z \right]$$



Modélisation de l'écoulement à travers la boucle (3/4)

↳ La fermeture du système d'équations nécessite la connaissance de α et de ϕ_{lo}^2

- Modèle homogène

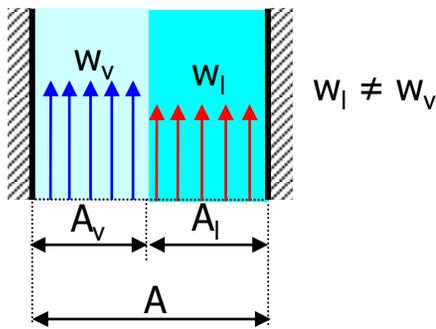


$$\alpha = \frac{x\rho_l}{x\rho_l + (1-x)\rho_v}$$



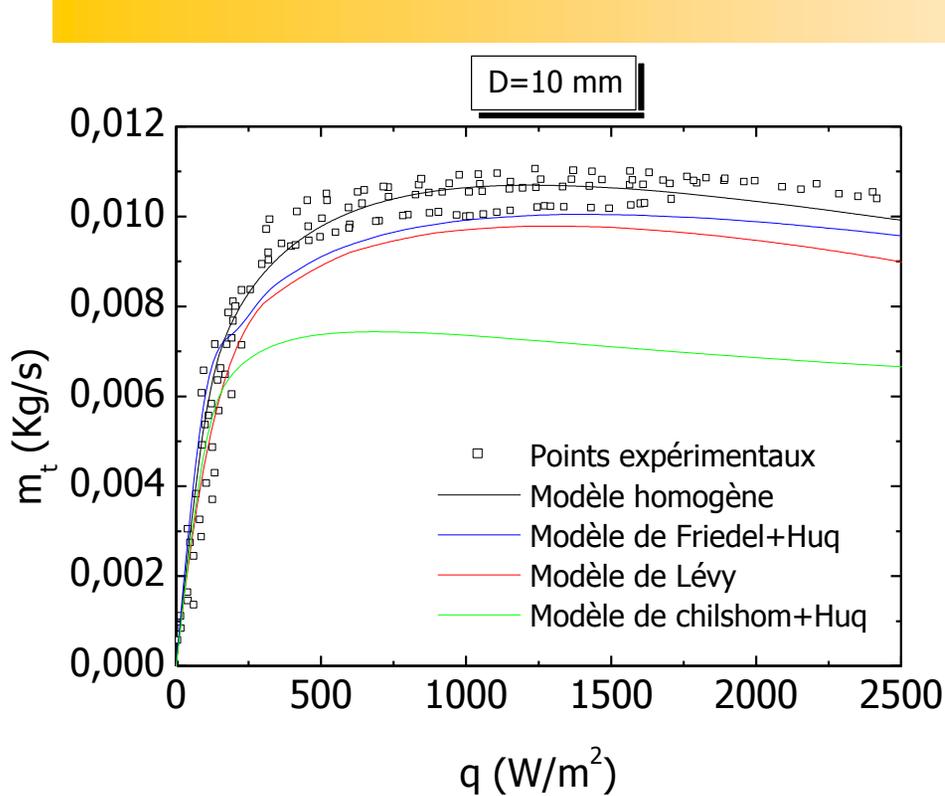
$$\phi_{lo}^2 = \left[1 + x \frac{\rho_l - \rho_v}{\rho_v} \right] \left[1 + x \frac{\mu_l - \mu_v}{\mu_v} \right]^{-0,25}$$

- Modèle à phases séparées

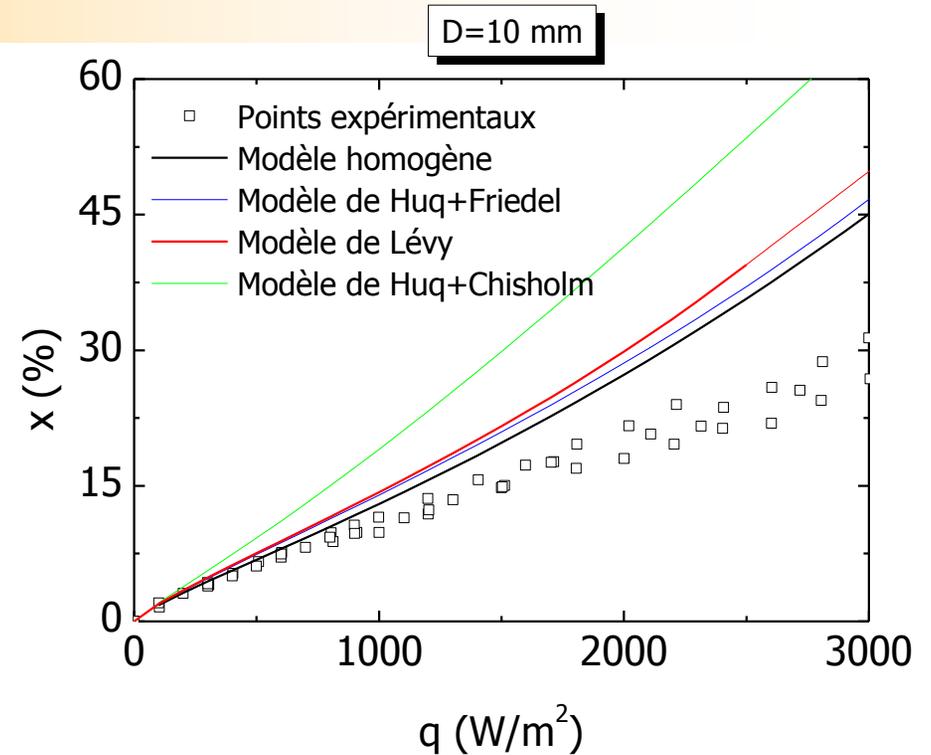


- Modèle de Lockhart-Martinelli (1949)
- Modèle de Lévy (1960)
- Modèle de Huq (1992)
- Modèle de Chisholm (1973)
- Modèle de Friedel (1979)

Modélisation de l'écoulement à travers la boucle (3/4)



Le modèle homogène reproduit bien les mesures de m_t dans la gamme $0 \leq q \leq 2500$ W/m^2



Le modèle homogène reproduit bien les mesures de x jusqu'à 1500 W/m^2



L'apparition de la crise d'ébullition

Contexte et motivation de l'étude

Dispositif expérimental et appareillages cryogéniques

- **Cryostat et insert**
- **Techniques de mesure**

Présentation et analyse des résultats expérimentaux

- **Thermiques**
- **Hydrodynamiques**

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Résultats thermiques

- ⇒ L'échange thermique par ébullition nucléée est le régime le plus performant
- ⇒ L'échange thermique est modélisé par une corrélation $q=(q_{CV}^3 + q_{EN}^3)^{1/3}$ avec un écart de 10%
- ⇒ q_{cr} est prédit par la corrélation $K_U = \frac{1}{24,29 + 0,093\left(\frac{z}{D}\right)}$ avec un écart de 7%

Résultats hydrodynamiques

- ⇒ Le modèle homogène prédit d'une manière très satisfaisante la chute de pression de l'écoulement dans la gamme de titre massique étudiée ($0 \leq x \leq 30\%$)
- ⇒ La modélisation de la boucle prédit d'une manière très satisfaisante l'évolution du débit total et du titre massique jusqu'au flux critique

Application à CMS

- ⇒ Utilisation du modèle homogène pour le dimensionnement des circuits
- ⇒ Utilisation des coefficients d'échange pour les échangeurs

Perspectives

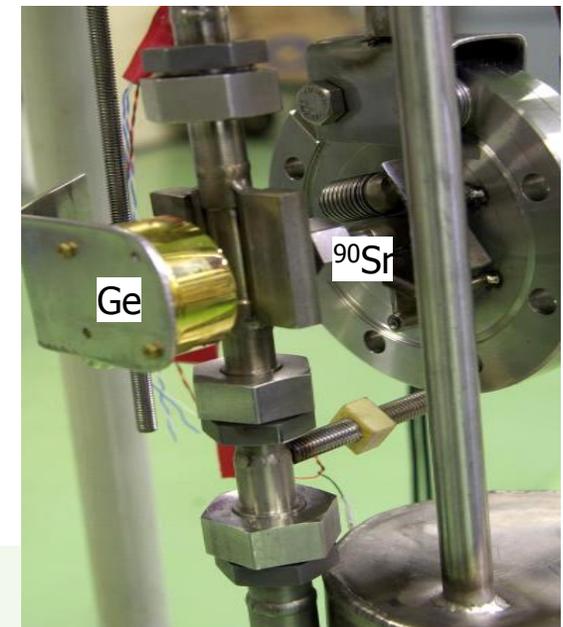
- ➡ Paramètres supplémentaires à étudier
 - Pression de fonctionnement
 - Diamètre du tube inférieur à 10 mm
 - Hauteur de la boucle

- ➡ Le transfert de chaleur dans la zone d'ébullition en film
 - corrélation de transfert de chaleur

- ➡ Etude des mécanismes de la crise d'ébullition
 - hystérésis

- ➡ Détermination du régime d'écoulement diphasique par visualisation à travers un tube en verre
 - Cartes d'écoulement

- ➡ Mesure du taux de vide par la technique d'atténuation de l'énergie d'un faisceau d'électrons



Revue

- **Heat transfer characteristics of He I thermosiphon flow**
L. Benkheira, B. Baudouy and M. Souhar, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 50, p. 3534-3544, 2007

Communications avec actes dans des livres à comité de lecture

- **Heat and mass transfer in nucleate boiling regime of He I in a natural circulation loop**
L. Benkheira, M. Souhar, B. Baudouy, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 51A, p. 871-878, 2005
- **Experimental and theoretical study of a two phase heliumhigh circulation loop**
Ph. Brédy, F-P. Juster, B. Baudouy, L. Benkheira, M.Cazanou, Advances in Cryogenic Engineering, Vol. 51A, p. 496-503, 2005

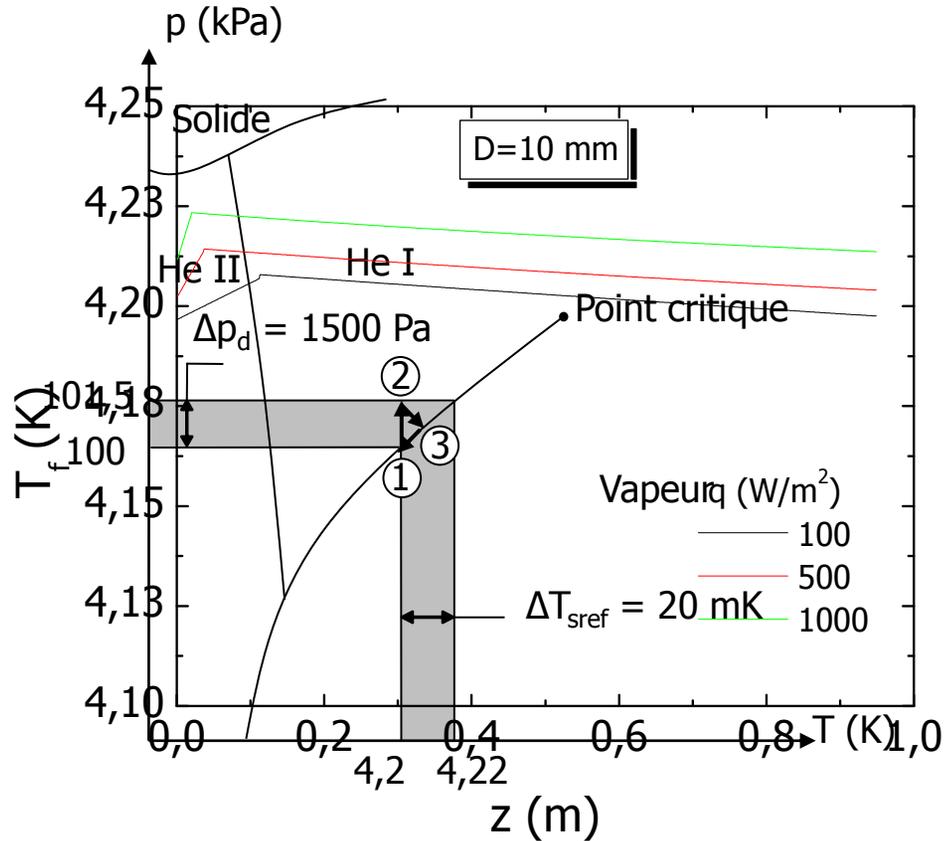
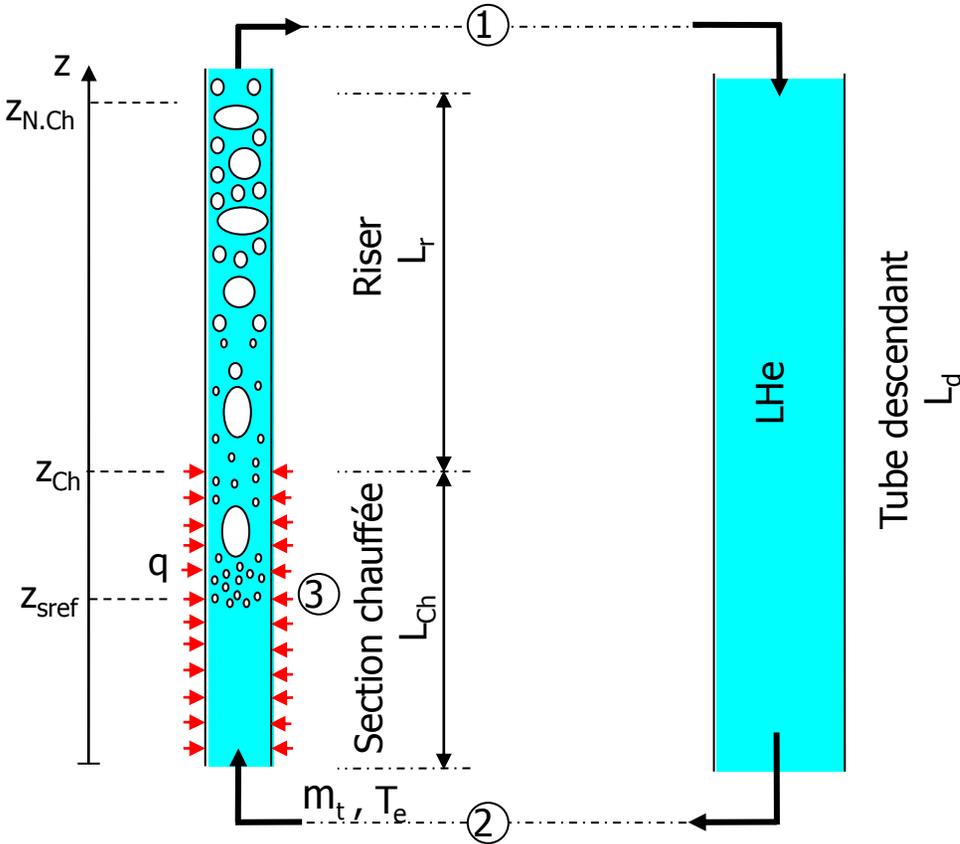
Communications

- **Flow boiling regimes and CHF prediction in He I thermosiphon flow**
L. Benkheira, B. Baudouy and M. Souhar, 21st International Cryogenic Engineering Conference (2006), Praha, Czech Republic
- **Régimes d'ébullition convective d'un écoulement thermosiphon en hélium normal (4.2 K)**
L. Benkheira, B. Baudouy and M. Souhar, Congrès français de thermique Île-de-Ré (2006), p. 149-154



Merci de votre attention

Calcul de la température du fluide T_f



Corrélations d'ébullition nucléée

La relation $q=f(\Delta T_p)$ dans la zone ENT s'exprime généralement par la loi : $q = \Psi.\Delta T_p^m$

↳ Corrélations d'ébullition nucléée en bain

↳ Corrélation de Rohsenow

$$q = \frac{\mu_l C_{pl}^3}{Pr^{5,1} C_{sf}^3 L_v^2 \left(\frac{\sigma}{g(\rho_f - \rho_v)} \right)^{1/2}} \Delta T_p^3$$

- C_{sf} est un coefficient dépendant de la combinaison surface-fluide compris entre 0,012 et 0,013

↳ Corrélation de Kutateladze

$$q = 1,9 \times 10^{-9} \left[g \left(\frac{\rho_l}{\mu_l} \right)^2 X^3 \right]^{0,3125} \left(\frac{pX}{\sigma} \right)^{1,75} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1,5} \times \left(\frac{C_{pl}}{L_v} \right)^{1,5} \Delta T_p^{2,5}$$

- $X = \left(\frac{\sigma}{g\rho_l} \right)^{0,5}$

↳ Corrélation en ébullition nucléée convective

↳ Corrélation de Steiner

Steiner propose une expression de h_{EN} faisant intervenir q , D , la rugosité de la paroi et la pression



Coefficient d'échange thermique diphasique

↳ Modèle asymptotique

$$h_{TP} = \sqrt[n]{(Fh_{CV})^n + (Sh_{ENB})^n}$$

- ↳ n exprime le degré de couplage entre l'ébullition nucléée et la convection forcée
- ↳ F est le multiplicateur diphasique convectif > 1
- ↳ S est le coefficient de suppression
- ↳ h_{CV} → Corrélation de Dittus-Boettler (1930)
- ↳ h_{ENB} → Corrélation d'ébullition en bain

↳ Plusieurs corrélations ont été proposées selon le modèle asymptotique :

- ↳ Corrélation de Rohsenow (1949)
- ↳ Corrélation de Liu-Winterton (1991)
- ↳ Corrélation de Chen (1966)
- ↳ Corrélation de Steiner-taboreck (1992)



Chute de pression diphasique

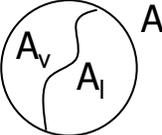
↳ Équation des quantités de mouvement

$$\Delta p_t = \Delta p_a + \Delta p_f + \Delta p_g \quad \Rightarrow \quad \Delta p_a = \frac{m_t^2}{\rho_l A^2} \left[\frac{x^2}{a} \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right) + \frac{(1-x)^2}{(1-a)} - 1 \right]$$

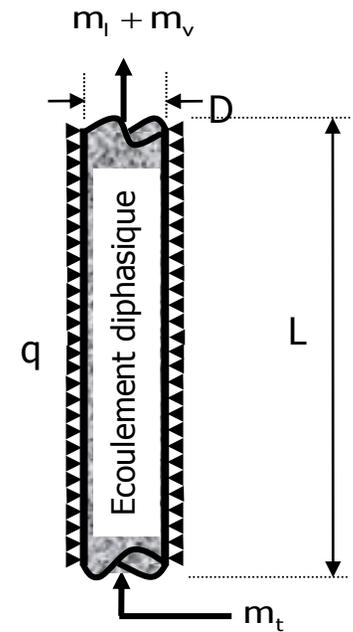
$$\Delta p_f = \frac{2C_{f10} m_t^2}{DA^2 \rho_l} \int_0^L \phi_{10}^2 dz$$

$$\Delta p_g = g \int_0^L (a \rho_v + (1-a) \rho_l) dz$$

Tels que :

- Taux de vide $a = \frac{A_v}{A}$ \Rightarrow 

- ϕ_{10}^2 est le multiplicateur diphasique $\Rightarrow \phi_{10}^2 = \frac{\left(\frac{dp}{dz} \right)_{TP}}{\left(\frac{dp}{dz} \right)_{10}}$



↳ Le long du riser (partie non-chauffée) $\Rightarrow \Delta p_a = 0$