

Séminaire CEA Saclay - Juin 2010



Particle Image Velocimetry dans l'hélium superfluide

S. Fuzier

Remerciements: S.W. Van Sciver, T. Zhang, T. Chagovets,
NSF, Oxford Instruments

NHMFL - Florida State University

Introduction

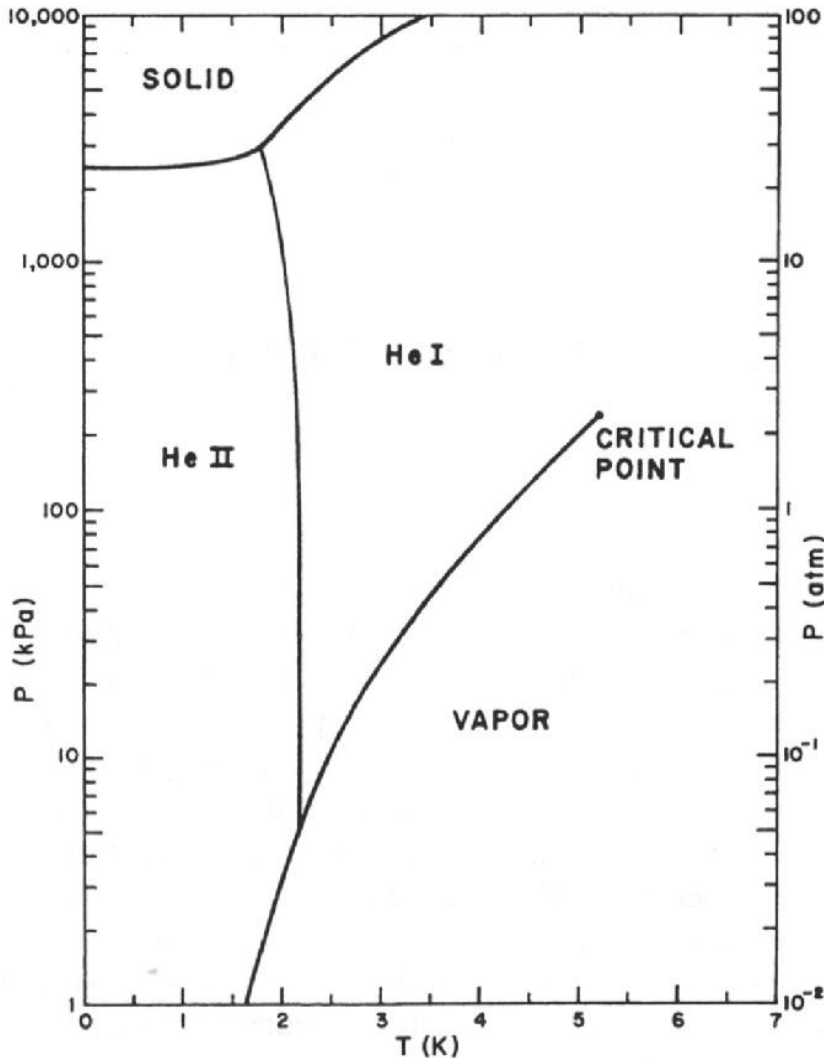
L'hélium superfluide a des propriétés thermiques uniques qui sont utilisées dans la plus part de ses applications. Certaines de ces applications nécessitent la modélisation des transferts de chaleur de ce fluide dans des géométries complexes.

Durant le dernier siècle, le développement de notre compréhension de l'hélium II a été basée essentiellement sur des mesures de température et de pression. Or, le modèle utilisé pour modéliser l'He II le considère comme constitué de deux composantes avec des vitesses distinctes et explique ces modes de transferts de chaleur uniques par les déplacements de ces deux composantes. Le but de l'application de la technique de PIV a l'He II est d'obtenir des informations directes sur les vitesses de ces composantes.

PIV dans l'hélium superfluide

- L'hélium II: modélisation et transferts de chaleur
- Présentation de la technique de PIV
Choix de particules appropriées
- Observations d'écoulements
contre courant thermique
couches limites
écoulement autour d'un cylindre
observation des lignes de vortex
- Séparation de particules par taille

L'hélium superfluide



Deux phases liquides:

- He I: Fluide Newtonien
 $T < T_c = 5.2 \text{ K}$, $P_c = 0.226 \text{ Mpa}$
 $\mu \sim 3 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$
- He II: Fluide quantique
 $T < T_\lambda = 2.176 \text{ K}$ a PVS
 $\mu_n \sim 1.4 \mu\text{Pa}\cdot\text{s}$

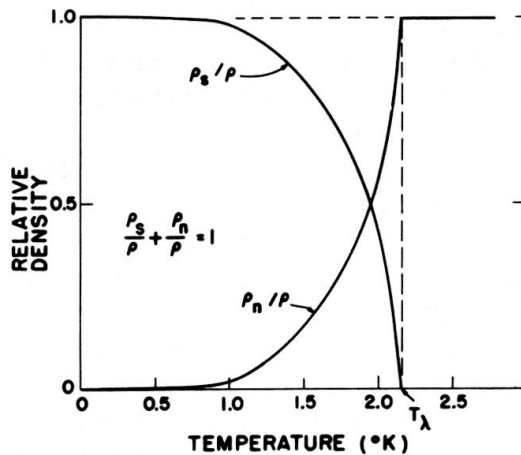
Uniques propriétés thermiques de l'He II

- Écoulement invisible de la composante superfluide
- Turbulence quantique et friction mutuelle

Phase solide seulement sous une pression extérieure de $P > 2.5 \text{ MPa}$

Le modèle a deux fluides

Dans ce modèle développé par Landau et Tisza, l'He II est considéré comme constitué de deux composantes: la composante superfluide et la composante normale. La composante superfluide n'a ni viscosité ni entropie. La composante normale est visqueuse et porte toute l'entropie du liquide.



- Composante normale $\rho_n \quad v_n \quad s \quad \eta_n$
- Composante superfluide $\rho_s \quad v_s$

$$\rho_n \frac{D\vec{v}_n}{Dt} = -\frac{\rho_n}{\rho} \vec{\nabla}P - \rho_s s \vec{\nabla}T + \eta_n \nabla^2 \vec{v}_n + A \rho_n \rho_s |\vec{v}_s - \vec{v}_n|^2 (\vec{v}_s - \vec{v}_n)$$

$$\rho_s \frac{D\vec{v}_s}{Dt} = -\frac{\rho_s}{\rho} \vec{\nabla}P + \rho_s s \vec{\nabla}T - A \rho_n \rho_s |\vec{v}_s - \vec{v}_n|^2 (\vec{v}_s - \vec{v}_n)$$

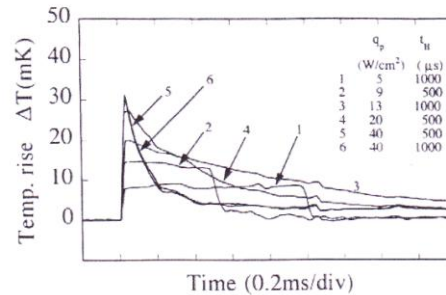
Transferts de chaleur

- Second son:

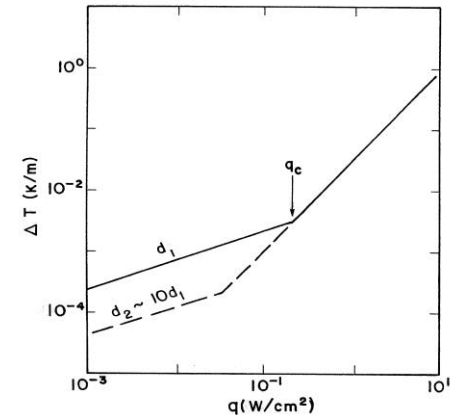
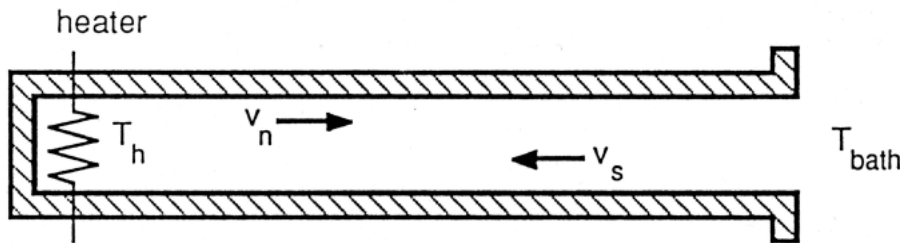
Le second son est une onde de température et d'entropie.

Peut se propager sous forme de pulse et transporte de la chaleur.

Phénomène expliqué par une oscillation des vitesses des composantes normale et superfluide.



- Contre courant thermique:



Faibles flux de chaleur: régime laminaire,

$$q \propto \frac{dT}{dx}$$

Grands flux de chaleur: régime turbulent,
interaction entre la composante normale et superfluide

$$q^3 \propto \frac{dT}{dx} \quad q = - \left[\frac{1}{f(T)} \frac{\partial T}{\partial x} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Les vortices dans le superfluide

- inviscide
- cœur du vortex de taille atomique (10^{-10} m)
- circulation quantifiée

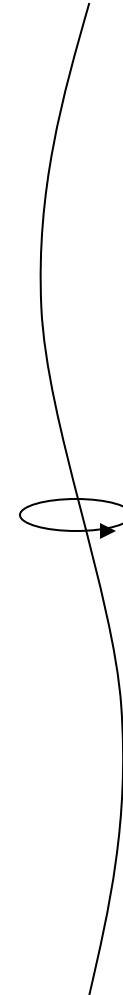
$$\oint \mathbf{v}_s \cdot d\mathbf{l} = \frac{nh}{m}$$

h : constante de Planck, m : masse d'un atome d'hélium

- termine sur lui même ou sur des parois

Mesure de densité de lignes de vortices par atténuation du second son

- > valeur moyenne, pas d'observation locale



La technique de PIV appliquée à l'hélium

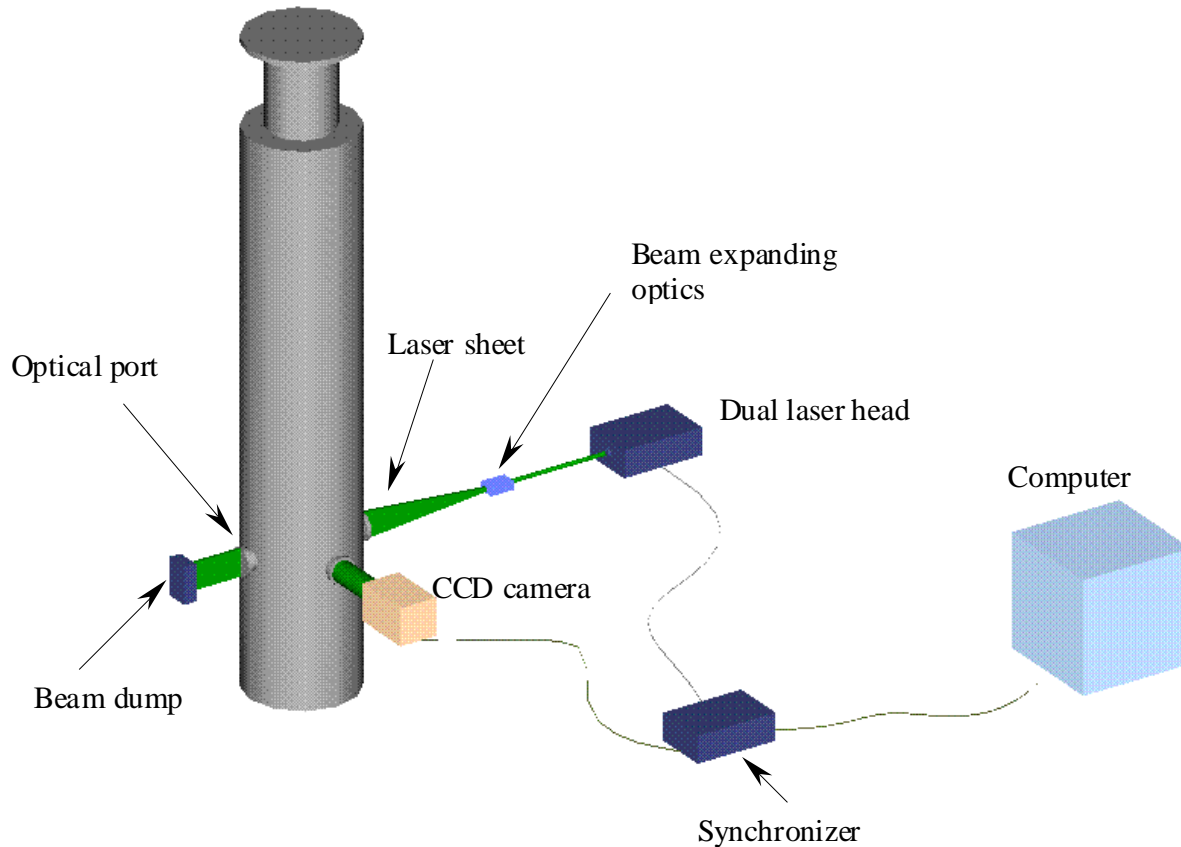


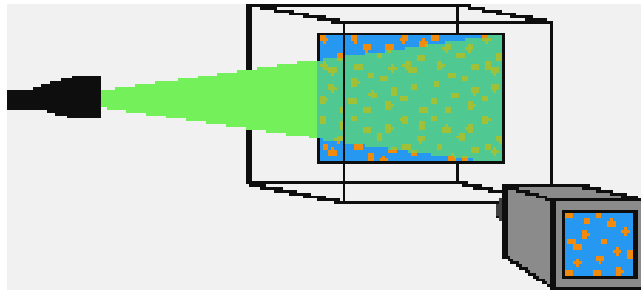
Figure 17 Optical cryostat with PIV setup

Technique de PIV consiste à injecter des particules dans un écoulement sans le perturber et mesurer les vitesses de ces particules.

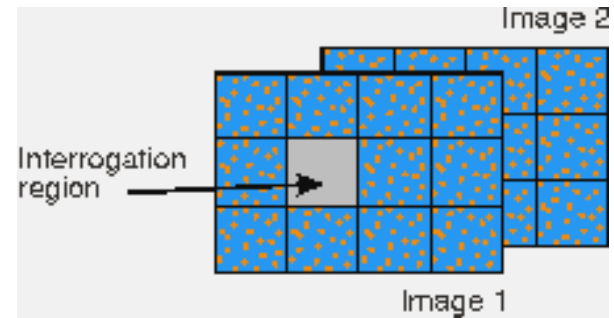
Nécessite:

- Particules appropriées
- Laser
 - Nd:Yag (532 nm)
 - Diode (795 nm)
- Cryostat optique et système d'acquisition d'images

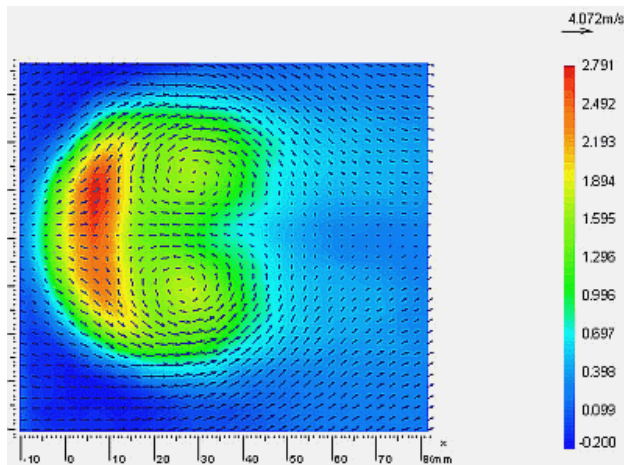
Calculs de vitesses avec la PIV



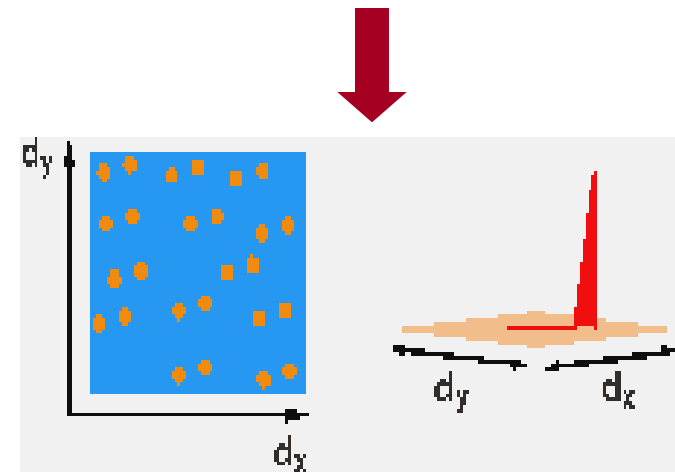
1. Ensemencement et acquisition d'images



2. Subdivision en fenêtres d'interrogation



4. Résultat - champ de vitesse



3. Corrélation

$$f_{cc}(dx, dy) = \sum_{i,j} I_1(i, j) \cdot I_2(i + dx, j + dy)$$

Dynamique des particules dans un fluide classique

$$\frac{\pi d_p^3 \rho_p}{6} \frac{dv_p}{dt} = \frac{\pi}{8} d_p^2 C_D \rho_f (v_p - v_f)^2 + \frac{\pi}{6} d_p^3 g (\rho_f - \rho_p) + \frac{\pi}{6} d_p^3 \rho_f \frac{dv_f}{dt} + \frac{\pi}{12} d_p^3 \rho_f \frac{d(v_f - v_p)}{dt}$$

équation Basset-Boussinesq-Oseen (particules sphériques, mouvement vertical)

$$C_D = \frac{24}{\text{Re}_p} \quad \text{si} \quad \text{Re}_p \ll 1 \quad \text{avec} \quad \text{Re}_p = \frac{\rho_f d_p (v_f - v_p)}{\mu_f}$$

$$C_D = \frac{24\phi}{\text{Re}_p} \quad \text{avec} \quad \phi = 1 + f(\text{Re}_p) \quad \text{pour déviation avec la loi de Stokes}$$

=> vitesse de glissement en régime permanent:

$$v_f - v_p = \frac{(\rho_p - \rho_{\text{HeII}}) d_p^2 g}{18\phi\mu}$$

Critères pour choisir les particules

Vitesse de glissement:

$$v_n - v_p = \frac{(\rho_p - \rho_{HeII})d_p^2 g}{18\phi\mu_n}$$

$$\phi = 1 + f(\text{Re}_p) \quad \text{Pour déviation avec la loi de Stokes}$$

Viscosité de l'hélium est faible

Densité des particules proches de celle de l'hélium ($\rho_{HeII} \sim 145 \text{ kg/m}^3$)

Particules de petite taille ($d < 10 \text{ }\mu\text{m}$)

Temps de réponse:

$$\tau \equiv \frac{(\rho_p + \frac{1}{2}\rho_{HeII})d_p^2}{18\phi\mu_n}$$

Concentration:

- statistique pour le calcul de vitesses (~ 10 particules/fenêtre d'interrogation)
 - trop de particules interféreraient avec la dynamique de l'écoulement
- $\rightarrow C \sim 10^9 / \text{m}^3$

Illumination laser:

Taille des particules préférable au moins 2x longueur d'onde du laser

Distribution de tailles uniforme - Minimise (re)agglomération

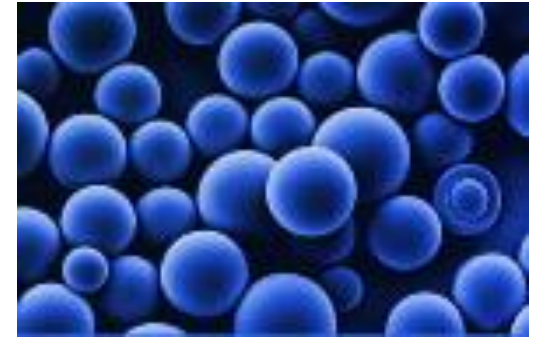
Particules possibles

Sphères en verre creuses:

- densité autour de 160 kg/m^3
- tailles de particules entre 30 et $120 \text{ }\mu\text{m}$

Sphères en polymère

- forte densité autour de 1100 kg/m^3
- Petite taille très uniforme $\sim 1.7 \text{ }\mu\text{m}$



Particules d'hydrogène/deutérium solidifié

- $\rho_{\text{H}_2} = 88 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{D}_2} = 206 \text{ kg/m}^3$ proches de $\rho_{\text{HeII}} \sim 145 \text{ kg/m}^3$
- Possible d'obtenir des particules de diamètre de l'ordre d'un à quelques microns

Type of particules	Taille	Vitesse de glissement	Temps de réponse
Sphères en verre creuses	$30 \text{ }\mu\text{m}$	3.12 mm/s	8.1 ms
	$120 \text{ }\mu\text{m}$	13.8 mm/s	130 ms
Sphères en polymère	$1.7 \text{ }\mu\text{m}$	1.0 mm/s	0.13 ms
H_2 solidifié	$\sim 2 \text{ }\mu\text{m}$	$\sim 0.1 \text{ mm/s}$	$\sim 0.03 \text{ ms}$

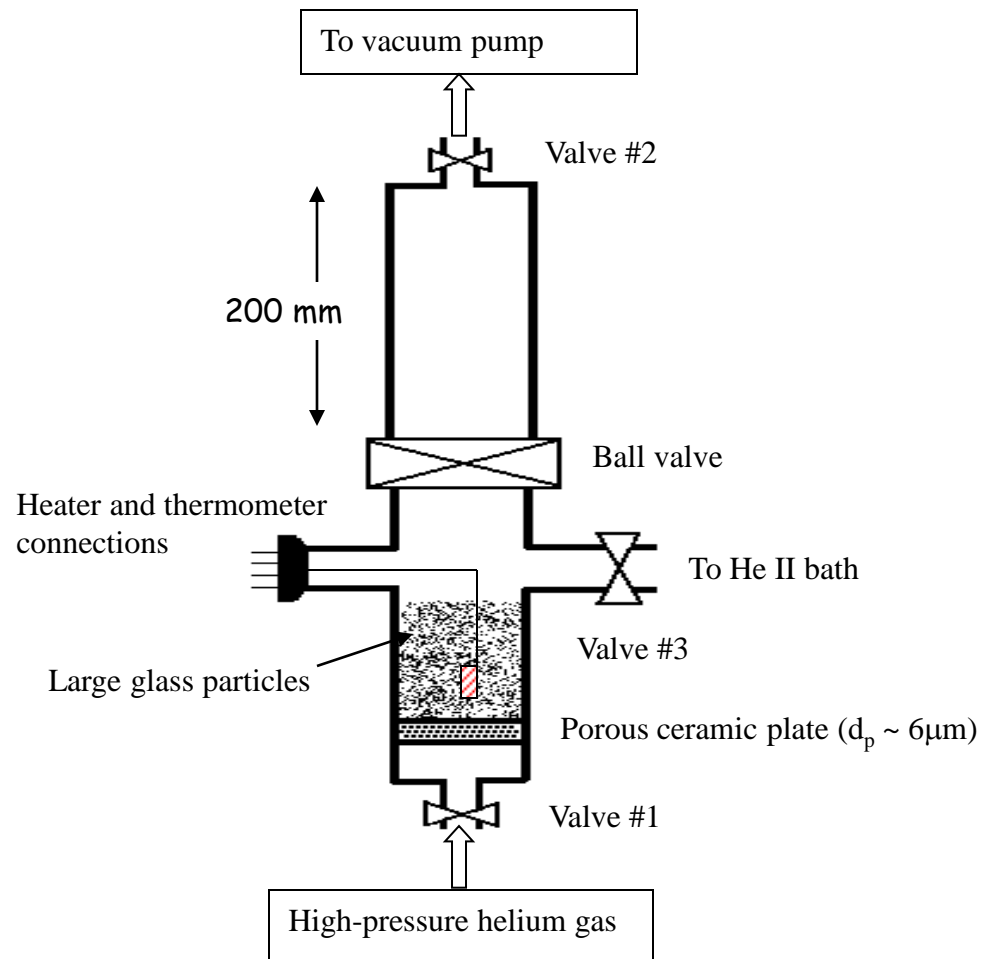
Injection de particules solides

- Minimiser la quantité de gaz autre que l'He injecté avec les particules
- Minimiser l'agglomération de particules

⇒ Nombreuses purges des particules dans l'injecteur.

Mélange des particules à injecter avec des billes de verre ($d=100\mu\text{m}$) qui restent dans l'injecteur

Injection des particules avec de l'He gas

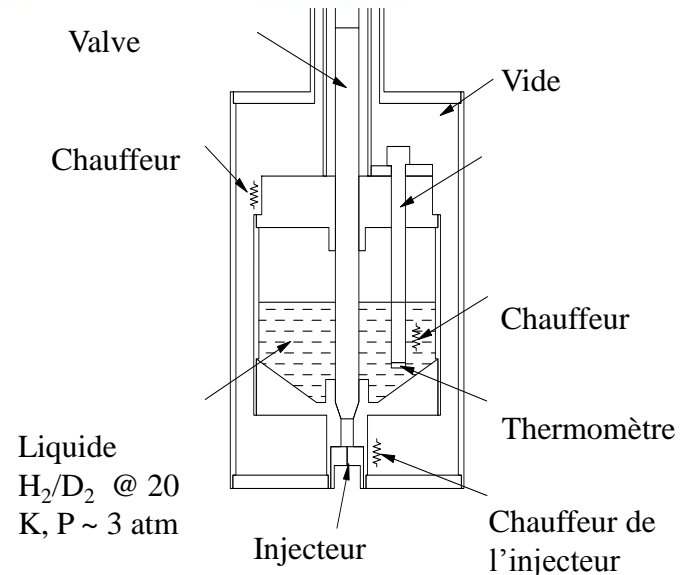
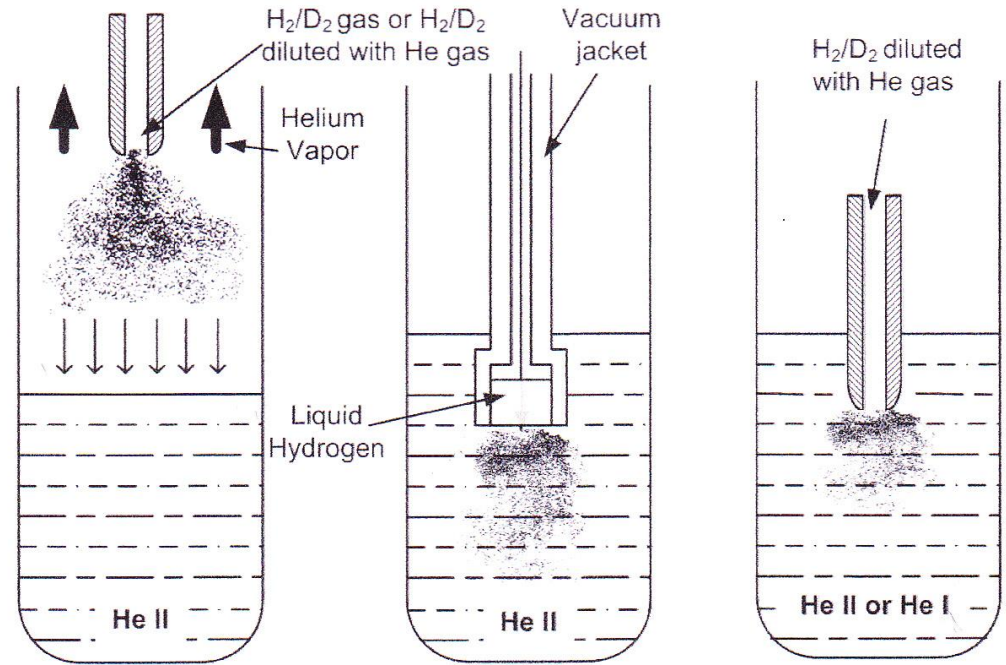


Injection de particules d' H_2/D_2 solidifiées

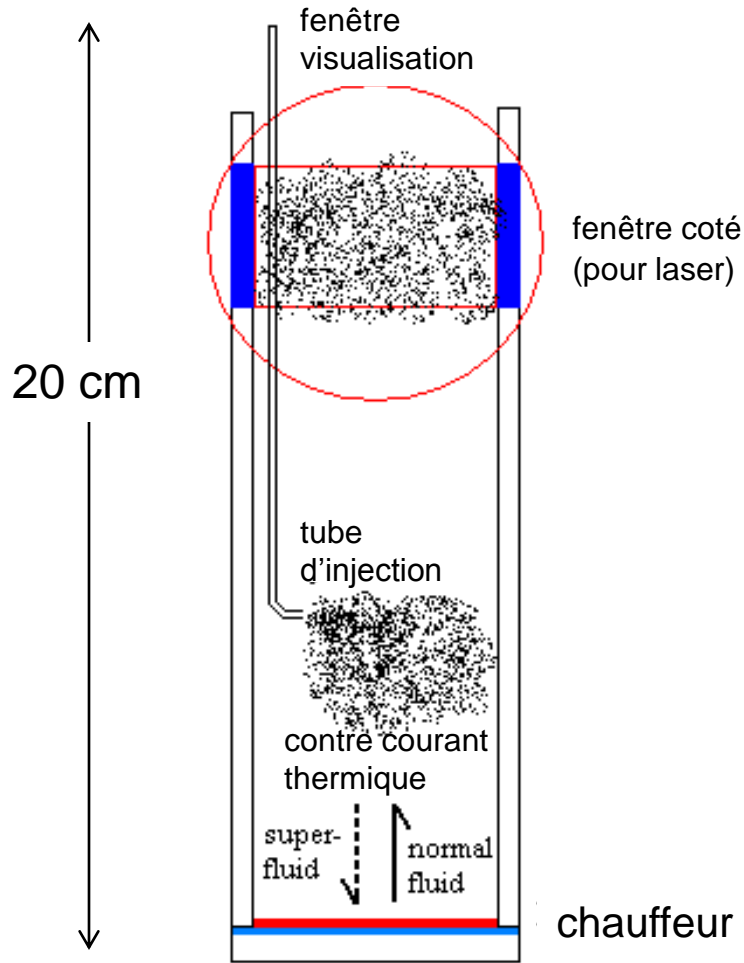
Injection d'un mélange d'hydrogène et d'hélium avec 1% d'hydrogène pour obtenir des particules de l'ordre du micron

Paramètres pression, temps d'injection à adapter pour chaque expérience

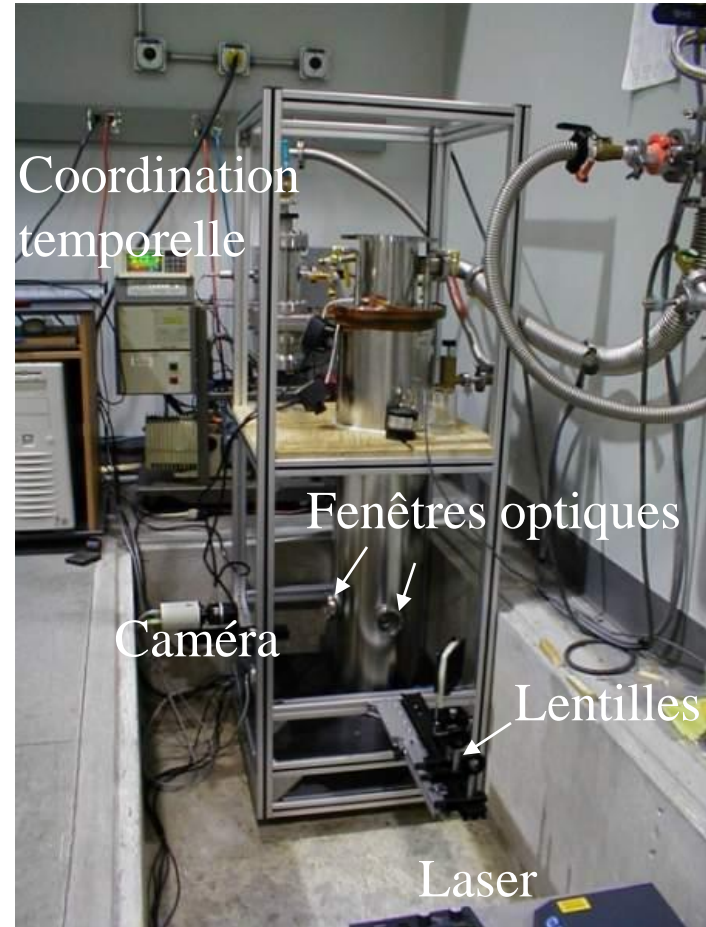
Injection dans le liquide avec un tube est préférée pour minimiser les perturbations thermiques



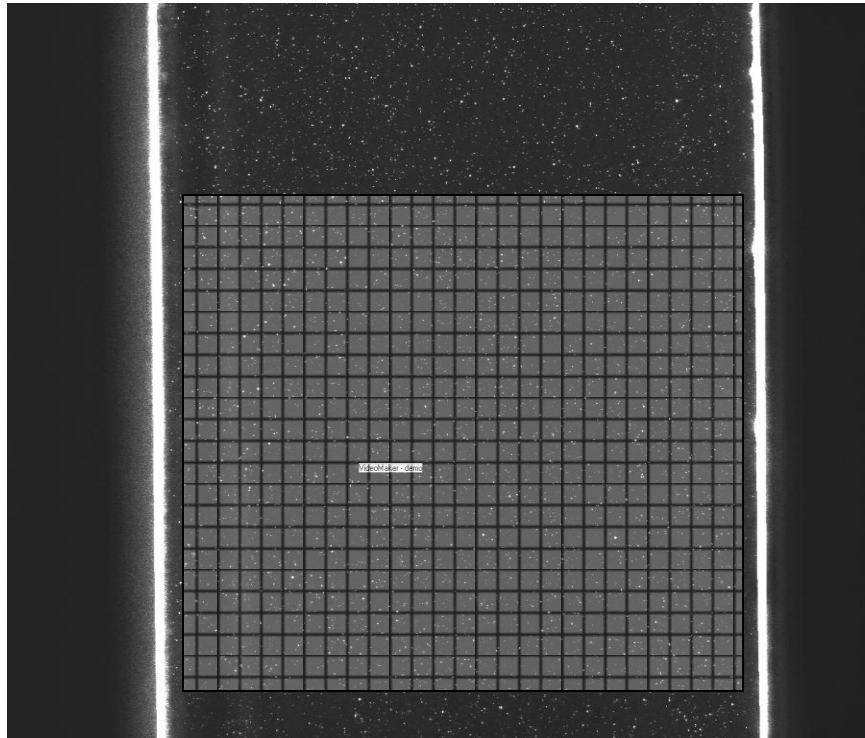
Expérience de contre courant thermique



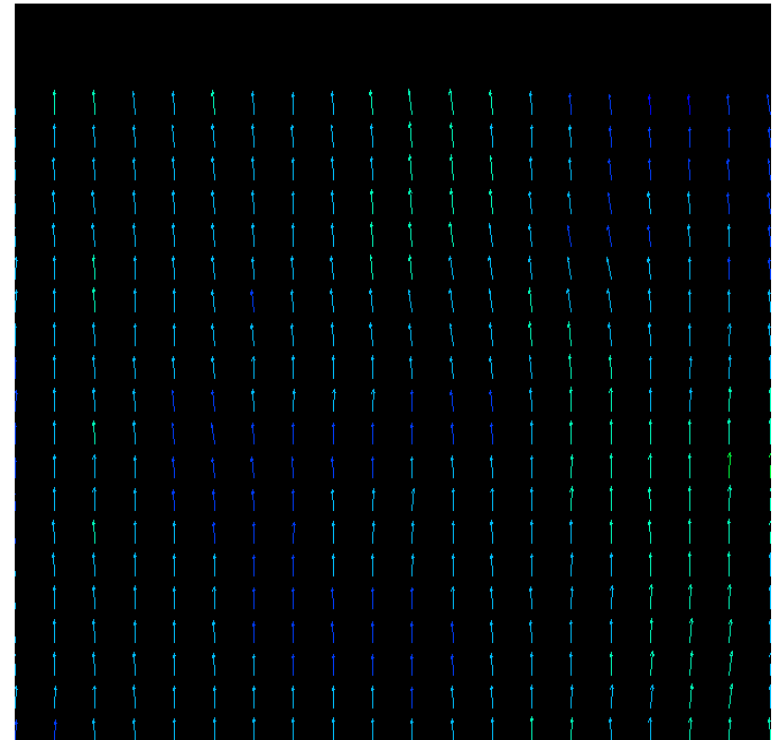
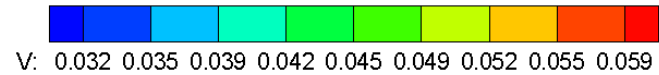
channel $4.3 \times 1.9 \text{ cm}^2$



Contre courant thermique

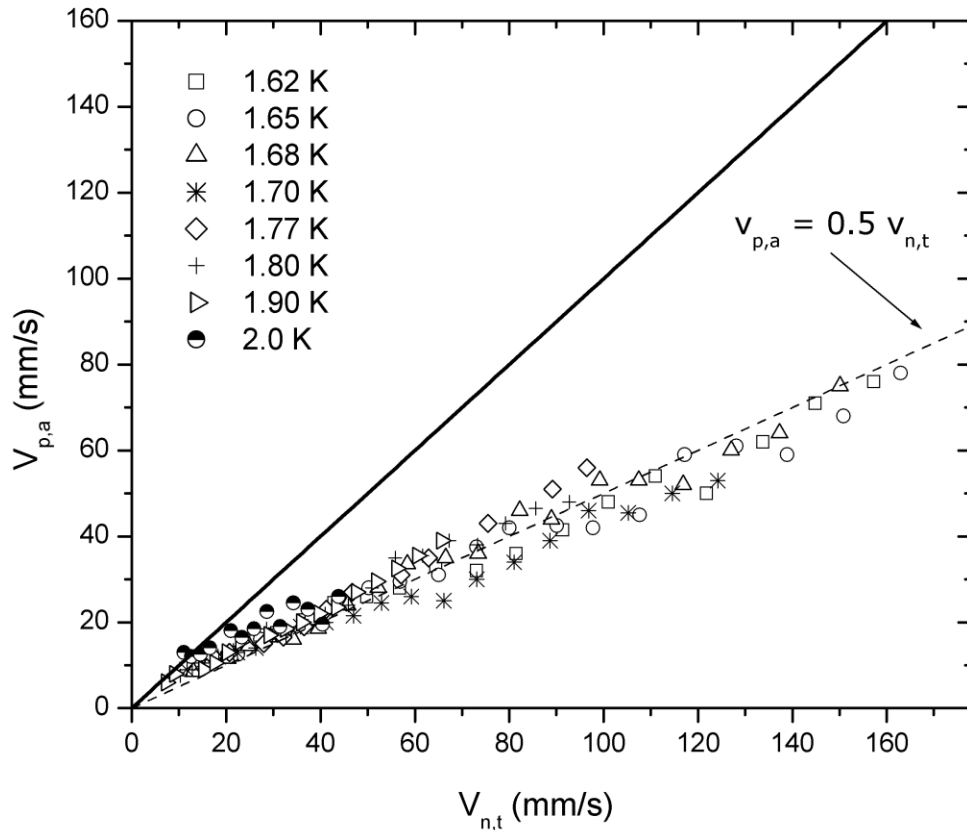


Ici, particules utilisées sont les
sphères en polymères
 $\phi = 1.7 \mu\text{m}$, $d = 1100 \text{ kg/m}^3$



Vitesses obtenues pour chaque paire
d'image (ex ↑ vitesses uniformes)
Acquisition généralement d'environ 50
paires a $\sim 10 \text{ Hz}$

Contre courant thermique, régime permanent



T. Zhang

Bien que seule la composante normale soit visqueuse, elle n'entraîne pas complètement les particules

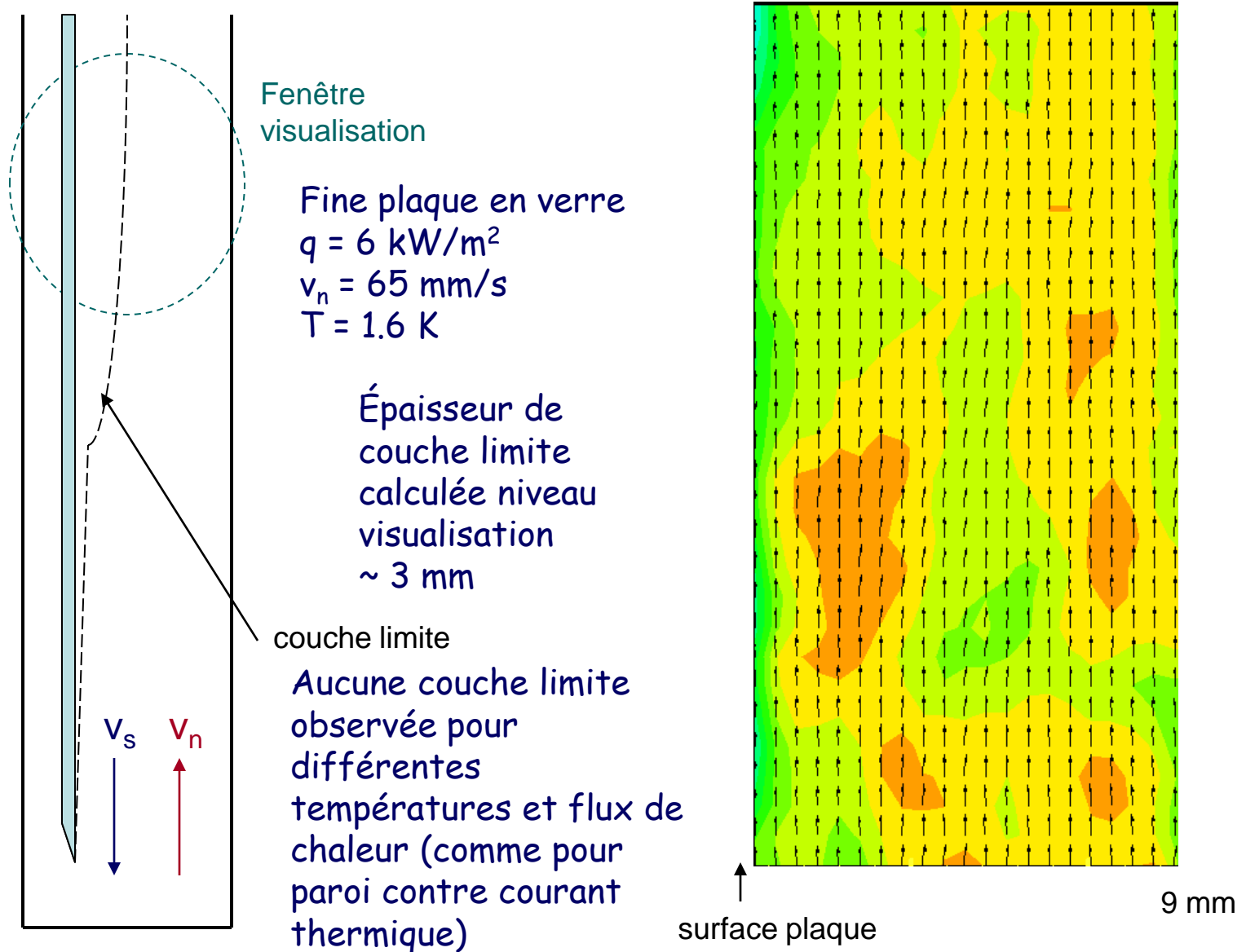
$$v_p = \frac{1}{2} v_n \quad (q = \rho_s T v_n)$$

Suppose influence de la composante superfluide sur les particules mais n'en connaît pas la nature

Ratio $\frac{1}{2}$ ne dépend pas de la température donc de la proportion de fluide normal et superfluide

Résultats reproduits avec des particules d'hydrogène

Couches limites - Plaque dans contre courant thermique



Écoulement autour d'un cylindre



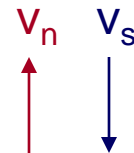
$$d_{\text{cylinder}} = 2 \text{ mm}$$

$$q = 0.91 \text{ W/cm}^2$$

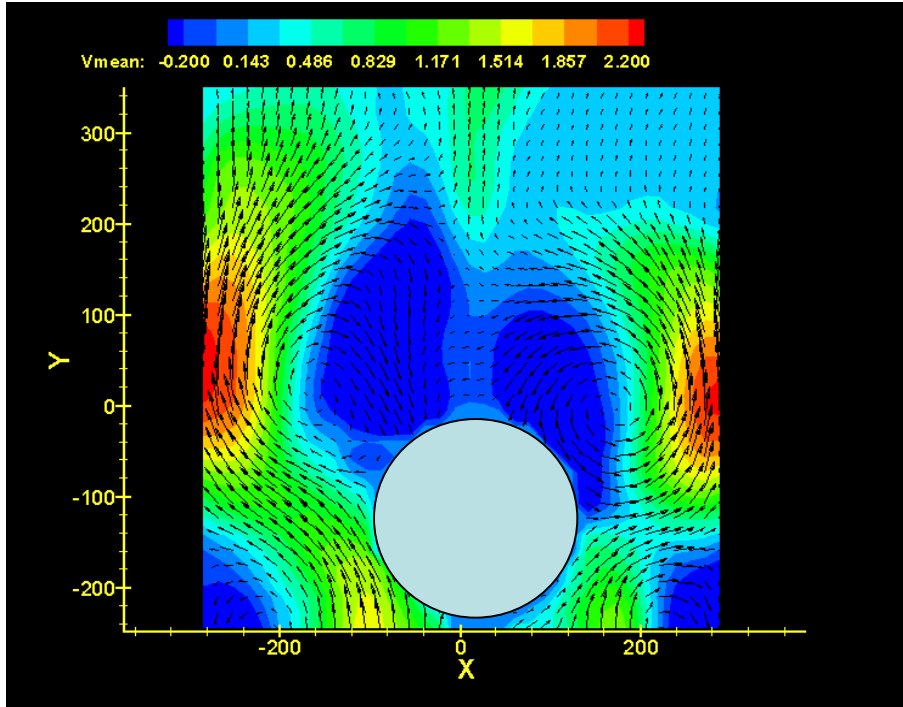
$$T = 2 \text{ K}$$

$$Re = 6150$$

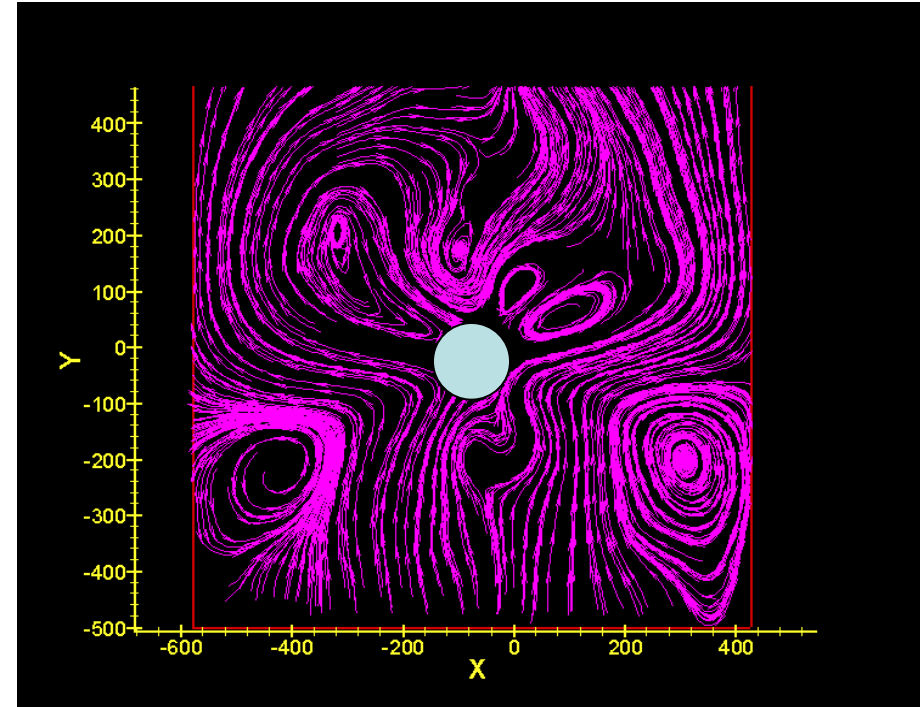
$$Re_n = 3870$$



Écoulement autour d'un cylindre



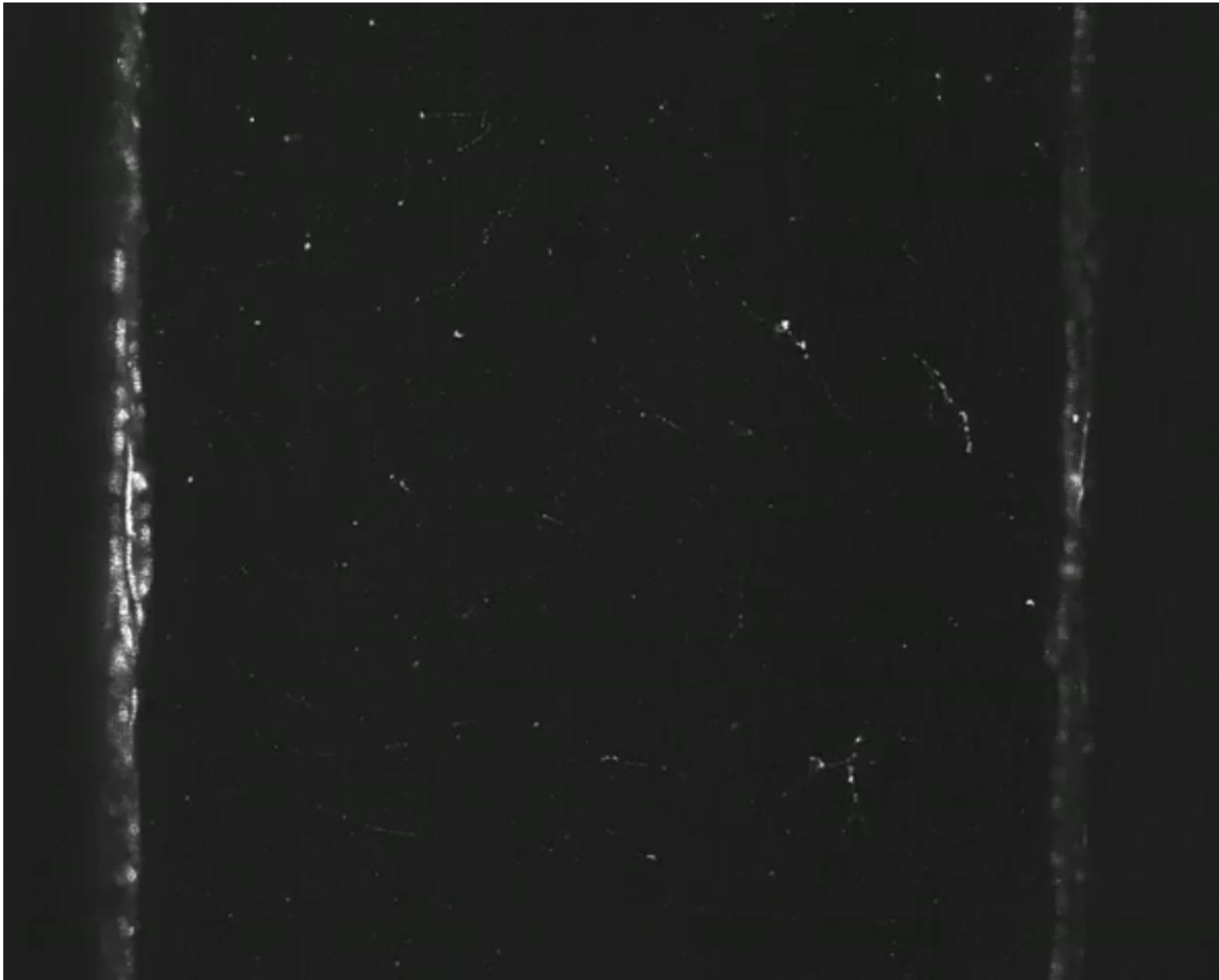
$T = 2.03 \text{ K}$, $I = 280 \text{ mA}$, $q = 14.1 \text{ kW/m}^2$
Re = 26044 $V_n = 45.7 \text{ mm/s}$
 $Re_n = 17775$ $V_s = 98.2 \text{ mm/s}$
Cylindre 6 mm diamètre



$T = 2.03 \text{ K}$, $q = 7.2 \text{ kW/m}^2$, $Re = 4185$
Cylindre 2 mm de diamètre

Pas d'observation d'allée de Von Karman

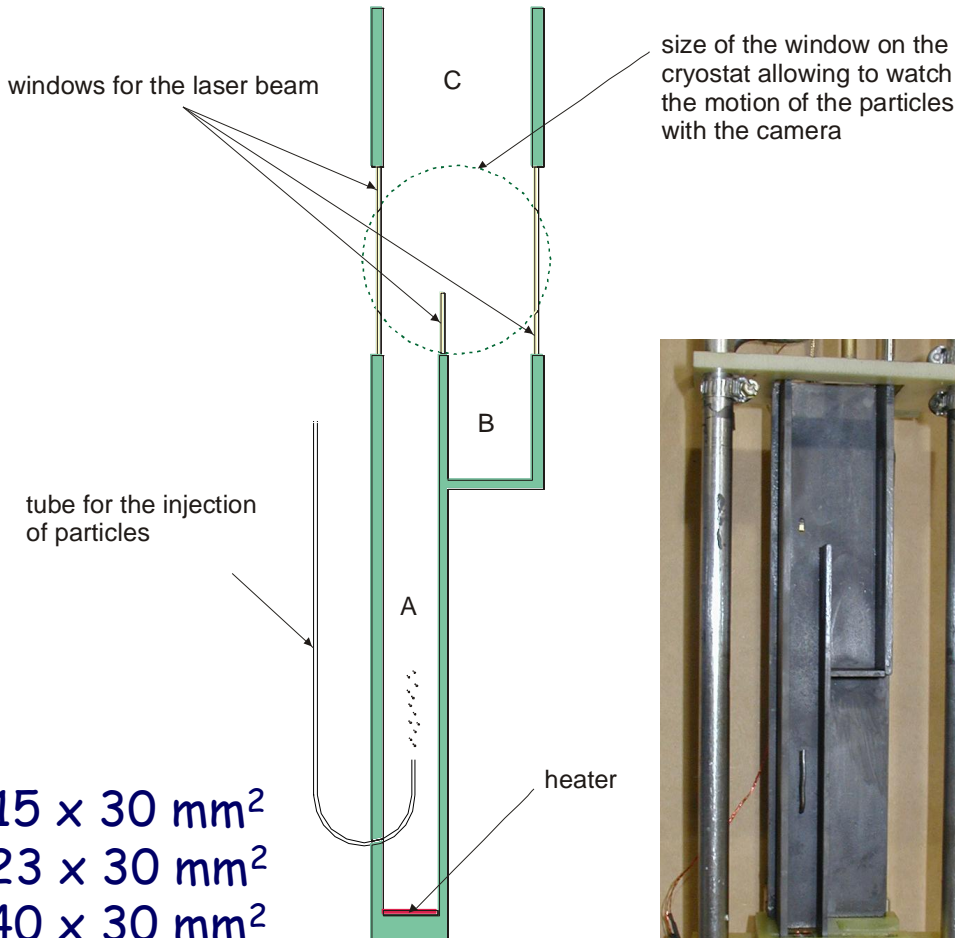
Particules prises dans le cœur des vortex



Pas de flux
de chaleur
(vidéo)

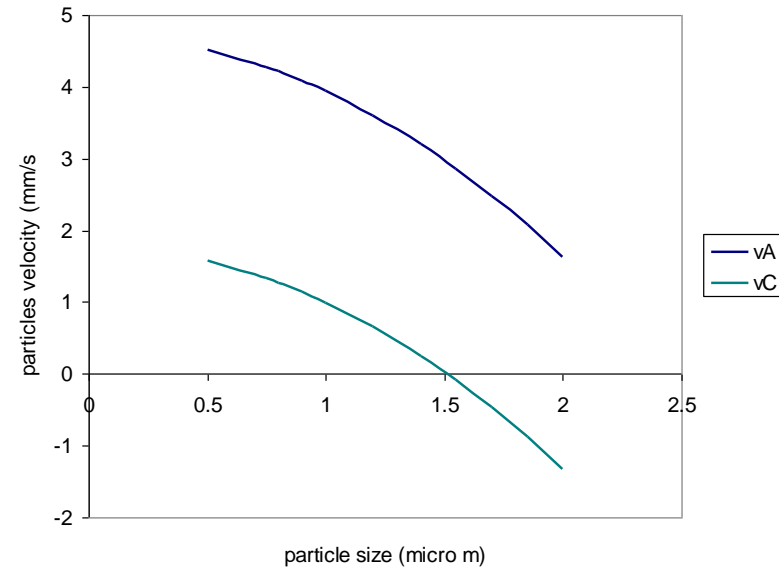
Séparation de particules par taille utilisant l'hélium II

Objectif: classifier des particules de taille de quelques microns et moins
 Utilise le fait que l'on peut déplacer les particules avec un flux de chaleur et que la vitesse de glissement des particules est proportionnelle au carré de leur diamètre.



$$v_n - v_p = \frac{(\rho_p - \rho_f)gd_p^2}{18\mu_n}$$

$$v_p = \frac{q}{\rho_s T} - \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu_f}$$



$$q_A = 0.08 \text{ W} / \text{cm}^2 \quad T = 1.85 \text{ K}$$

Mouvement des particules



Une seule taille de particule, $d = 1.7 \mu\text{m}$

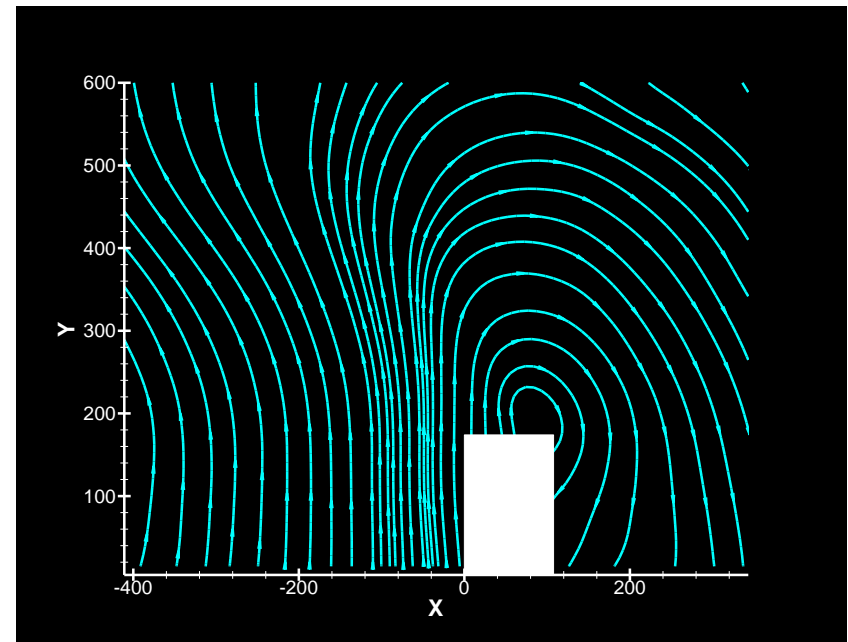
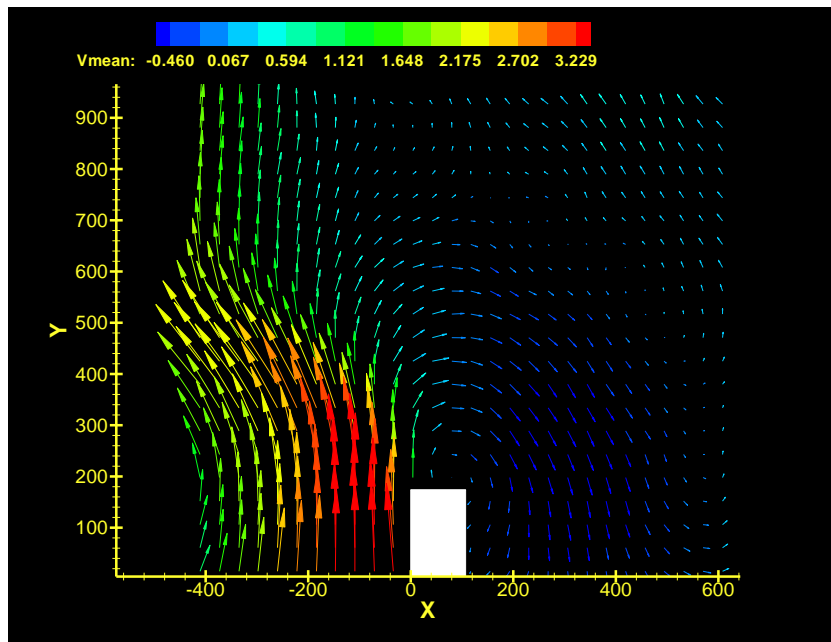
$q_A = 1.18 \text{ W/cm}^2$

$T = 1.6 \text{ K}$

$V_n = 182 \text{ mm/s}$

$Re = 37\,600$

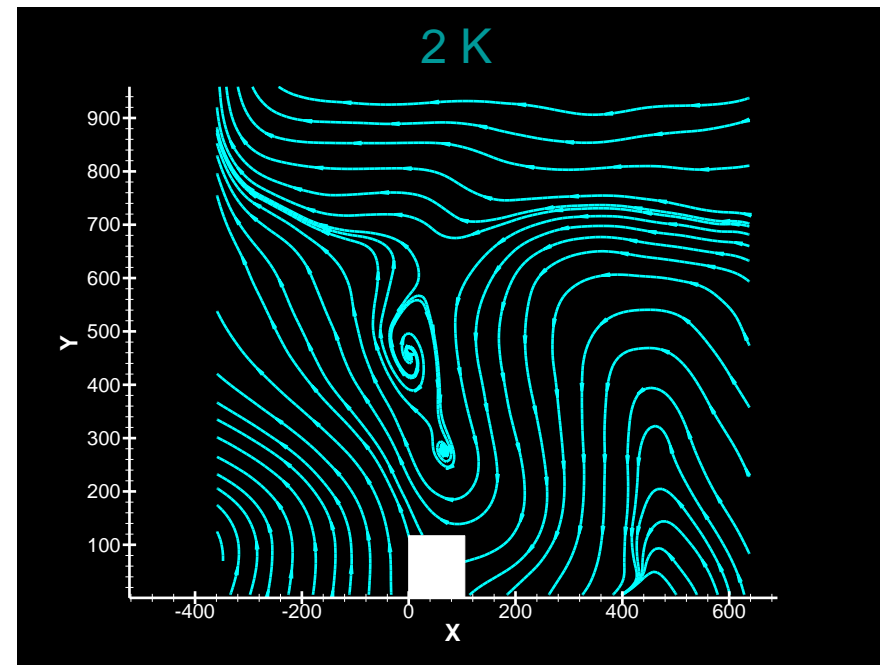
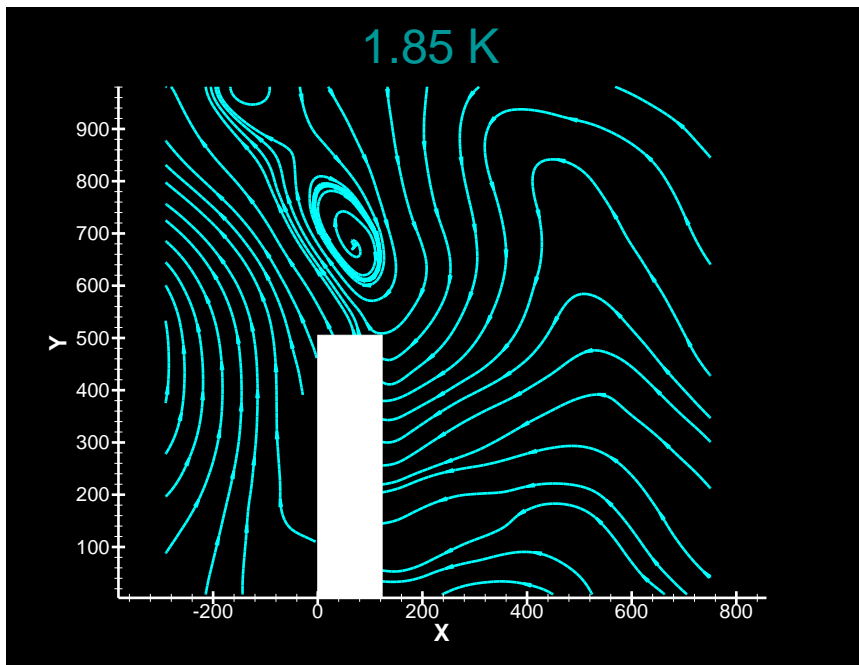
*1 pixel/s = 24 mm/s



Choix de la température pour faire la séparation

De larges vortices sont observés sur la délimitation entre les deux parties du channel aux flux de chaleur les plus importants et aux plus hautes températures (effet similaire de la température pour les vortex derrière un cylindre). Les expériences de séparation de particules seront ensuite effectuées à 1.6 K pour éviter ces larges vortices.

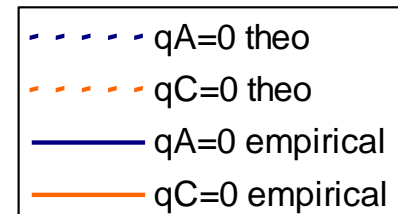
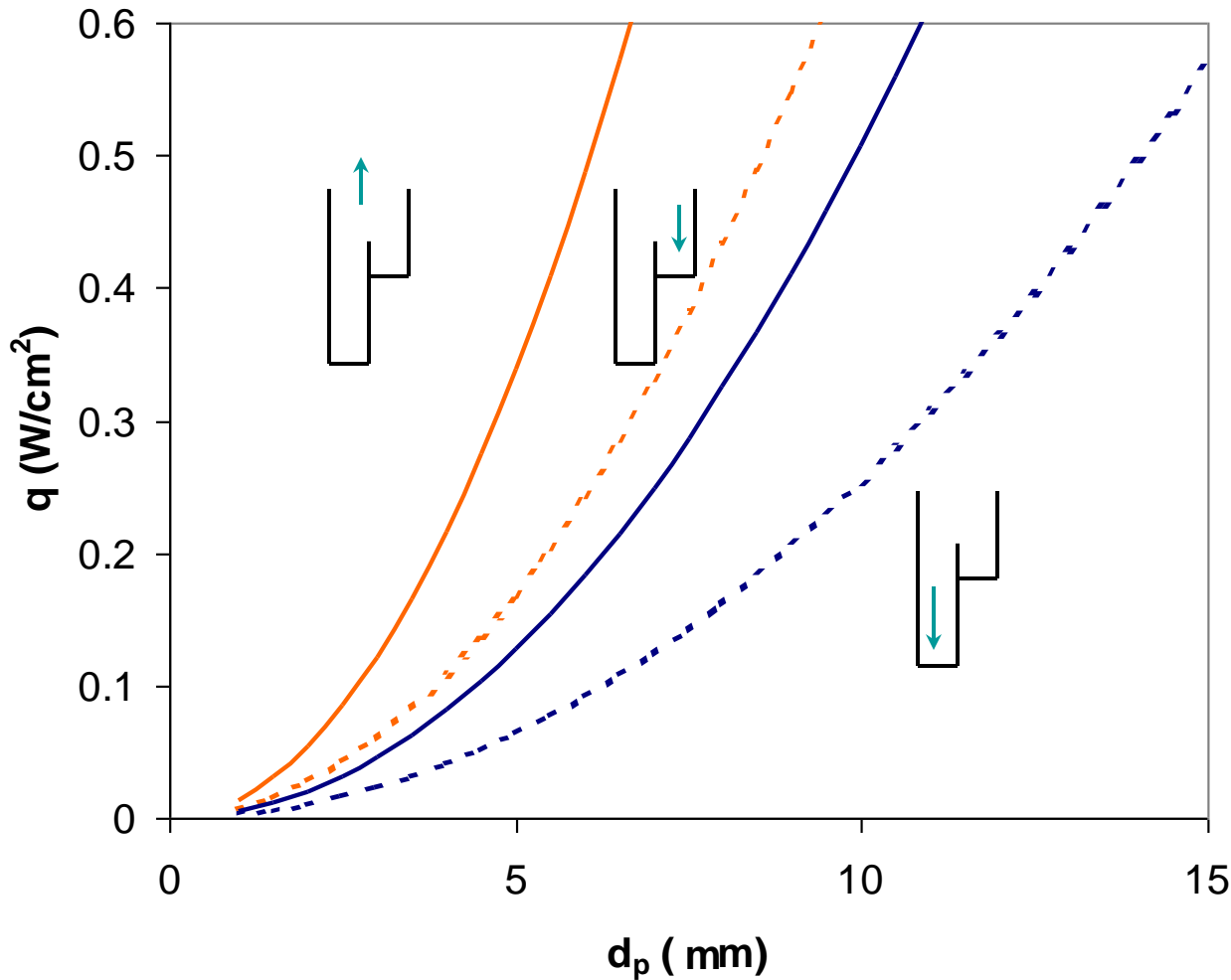
$q = 1.18 \text{ W/cm}^2$ (même flux que sur la page précédente)



Déplacement des particules

$$v_p = \frac{q}{2\rho_s T} - \frac{gd_p^2(\rho_p - \rho_f)}{18\mu_f}$$

$T = 1.6 \text{ K}$



$d_1 = 5.4 \text{ mm}$

$d_2 = 9.9 \text{ mm}$

$q_A = 0.25 \text{ W/cm}^2$

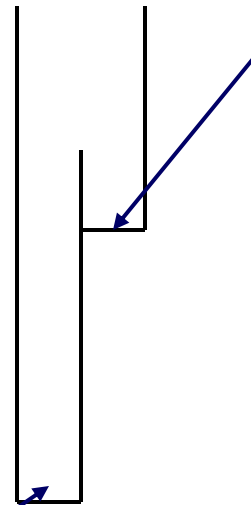
Pas de séparation observée

$q_A = 0.15 \text{ W/cm}^2$

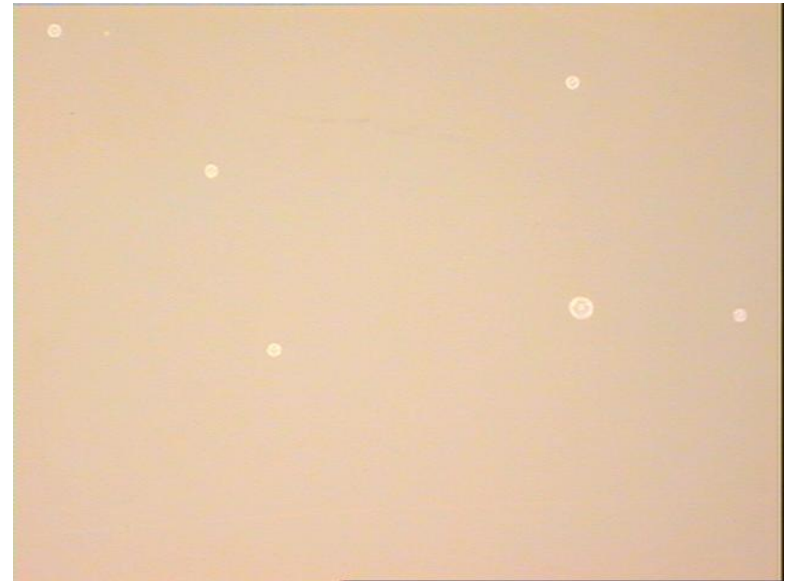
Séparation observée

Séparation des tailles 5.4 et 9.9 mm ($q_A = 0.15 \text{ W/cm}^2$)

Dans l'injecteur:
0.5 g de particules de
diamètre 5.4 mm et
0.5 g de diamètre 9.9
mm (tout n'a pas été
injecté)
86% de taille 5.4 mm



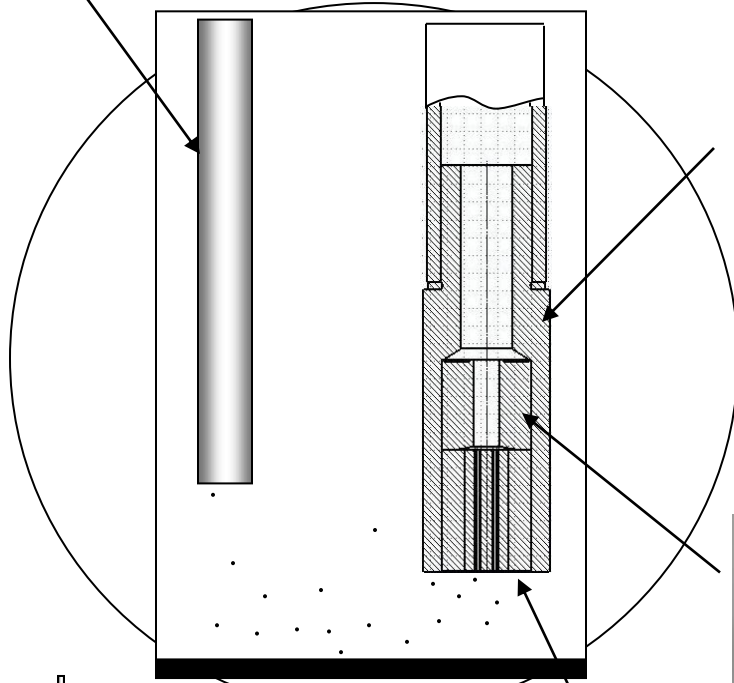
Sur une plaque en verre:
97 % des particules de
taille 5.4 mm
(sur environ 1000
particules)



Sur le chauffeur:
Groupement de particules et particules
isolées
Après dispersion dans du méthanol
~ 45 % des particules de taille 5.4 mm

Extraction des particules après la séparation

Tube
d'injection



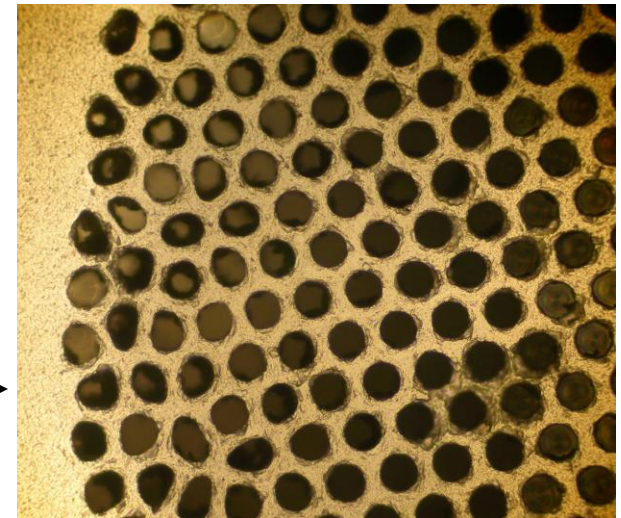
adaptateur en
G10



bain
d'He II

channel en
Plexiglas

chauffeur



Tube multi trous (trous ~ 50 mm d)

Conclusion

Nouvelle technique pour classifier des particules de même densité en créant des flux de chaleur pour déplacer les particules dans différentes régions où elles pourront être recueillies.

Technique fonctionne pour un petit nombre de particules. Nécessité d'effectuer de nombreuses expériences pour déterminer les flux de chaleur appropriés. Nécessité de limiter l'agrégation des particules pour en classifier une plus grande quantité.

La PIV permet d'observer les écoulements internes à l'He II. Certains écoulements uniques se dégagent déjà comme l'absence de couche limite en contre courant et l'écoulement autour d'un cylindre. Pour pouvoir obtenir des valeurs des champs de vitesse des deux composantes de l'He II, une meilleure compréhension des effets de la composante superfluide sur les particules est nécessaire.