



CHANGEMENT DE PHASE DANS UN ÉCOULEMENT TURBULENT

N. Machicoane

Avec D. Chareyron, R. Volk and J.-F. Pinton

Lyon, CNRS et Université de Lyon, Lyon, France

1

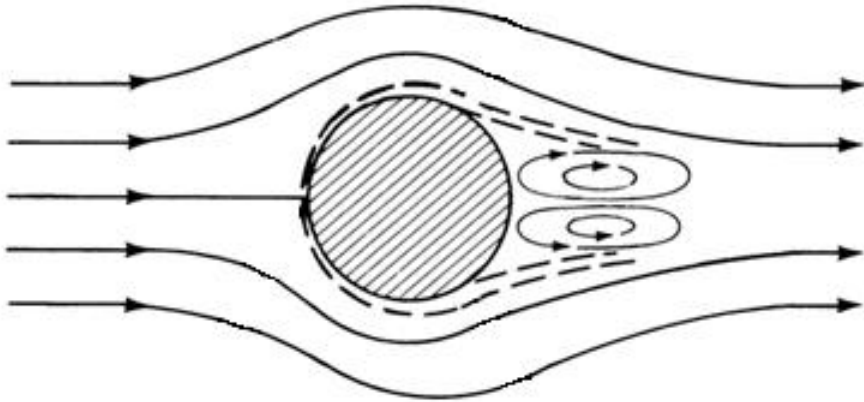
INTRODUCTION

- Évaporation ou fusion d'une particule advectée par l'écoulement
 - Turbulence
 - Interaction particule-écoulement

- Vitesse de fonte d'une bille de glace dans un écoulement turbulent?
 - Fixée
 - Advectée librement



TRANSFERT THERMIQUE ENTRE UNE SPHÈRE ET UN ÉCOULEMENT



$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = -\frac{\nabla P}{\rho_f} + \nu \Delta \vec{V}$$

$$\frac{DT}{Dt} = \kappa \Delta T$$

Cas « laminaire »

○ Nusselt : $Nu = \frac{Q_{tot}}{Q_{diff}}$

○ Ranz & Marshall:

$$Nu = 2 + 0.6\sqrt{Re}Pr^{1/3}$$

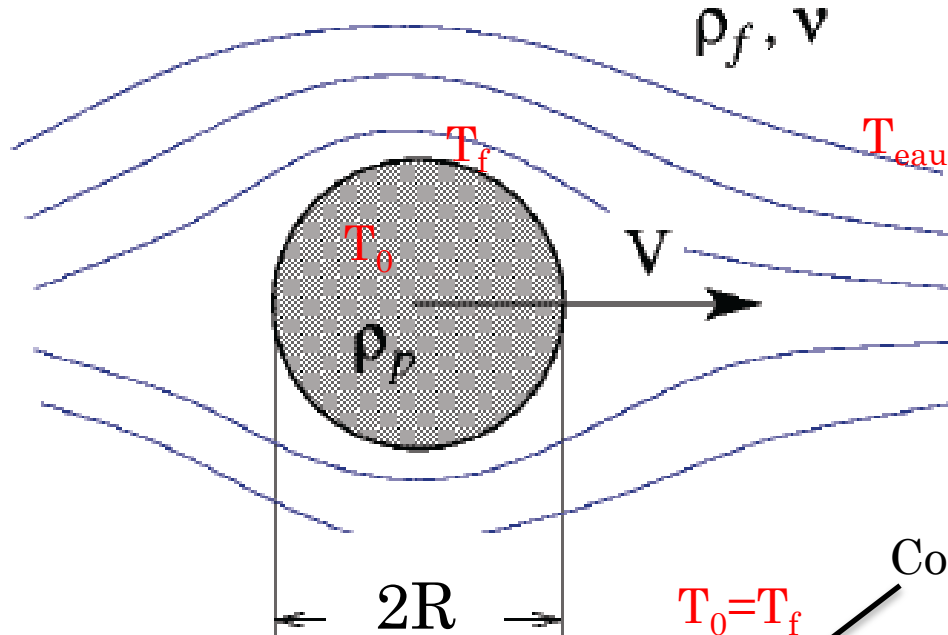
$$Re = \frac{UL}{\nu} \sim [5 - 20] \cdot 10^5$$

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \sim 10$$

Diffusivité thermique (m²/s)

$$D \in [10 - 30] \text{ mm} \sim L_{int}$$

DYNAMIQUE DE FUSION D'UNE BILLE DE GLACE DANS UN ÉCOULEMENT TURBULENT?



Diffusion dans la bille
 Convection forcée en dehors
 ↳ Problème de couche limite

$$\rho_{glace} L_f \frac{dR}{dt} = \underbrace{\lambda_{th} \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_R}_{\text{diffusion}} - \underbrace{h(T_{eau} - T_{fusion})}_{\text{convection}}$$

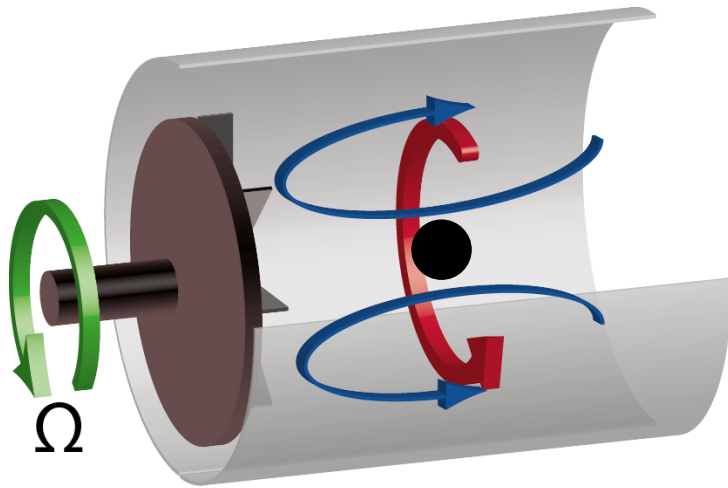
Conductivité thermique ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)

Chaleur latente (J/kg)

Objectif : coefficient de transfert thermique : $h(Re, Pr)$

I/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

CELLULE DE VON KARMAN

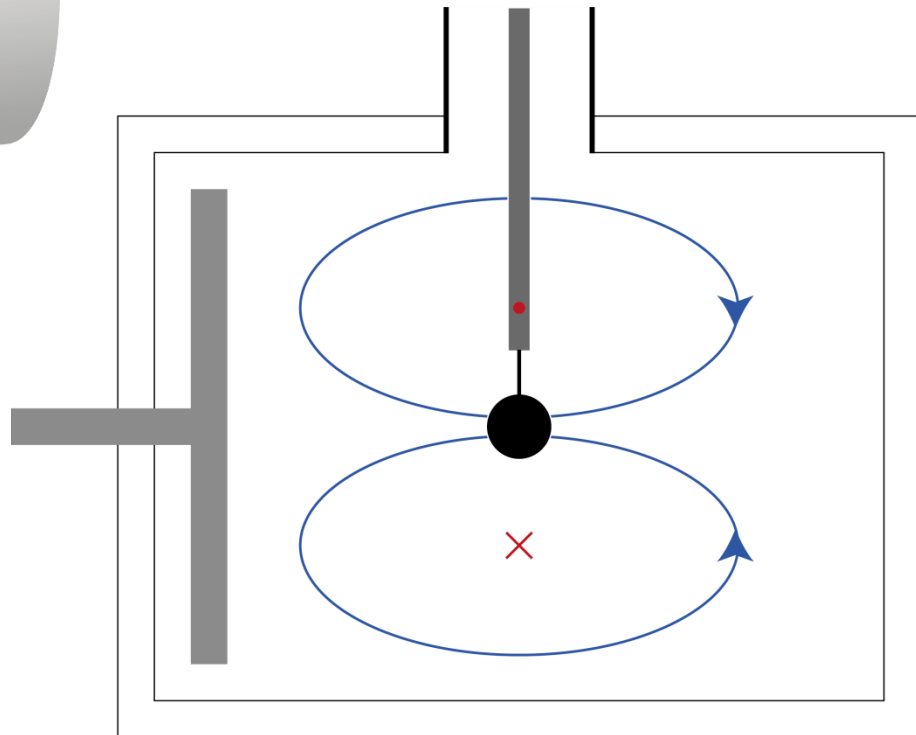


$$\Omega \in [1.5 - 7.3] \text{ Hz}$$

$$\lambda \in [1.5 - 1] \text{ mm}$$

$$Re_\lambda \in [200 - 700]$$

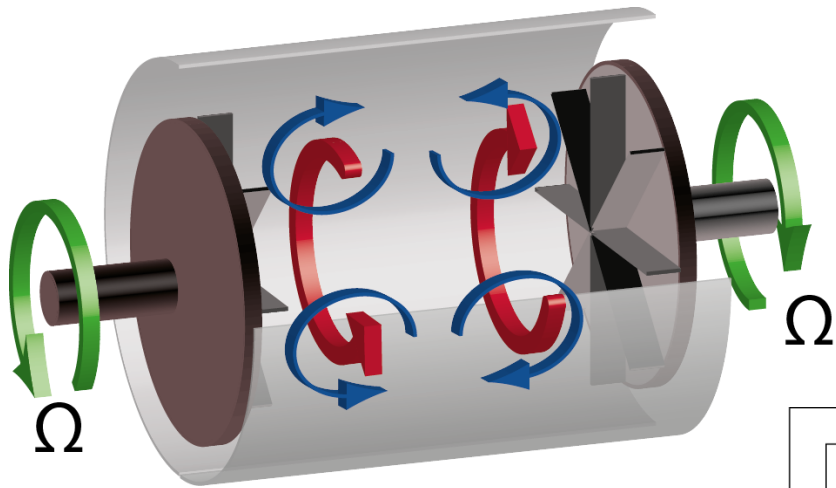
T_{eau} contrôlée



Vent moyen

I/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

CELLULE DE VON KARMAN



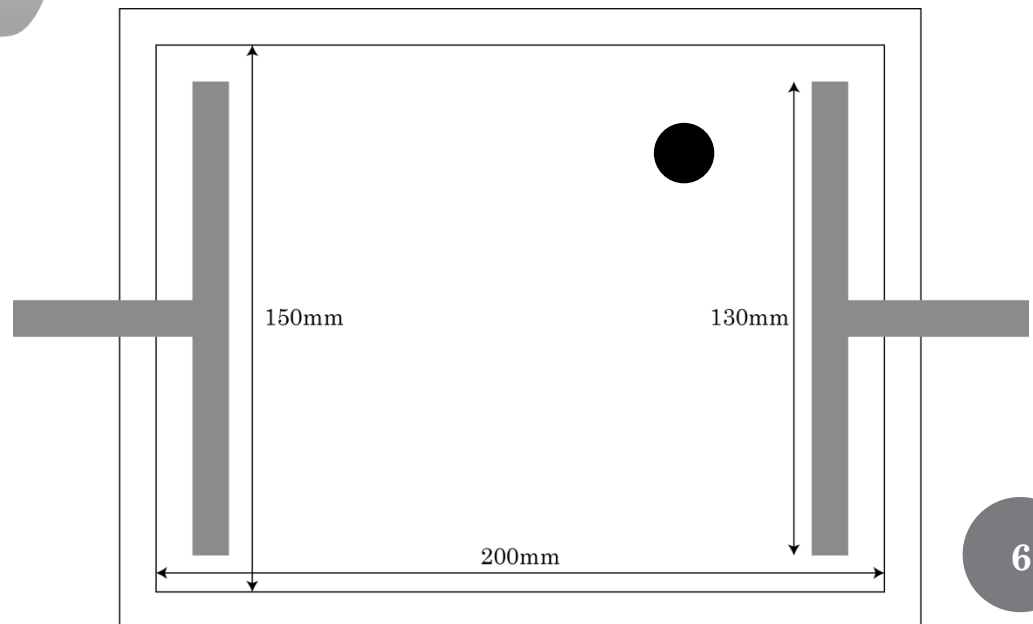
Profondeur : 150mm

$$\Omega \in [1.5 - 7.3] \text{ Hz}$$

$$\lambda \in [1.5 - 1] \text{ mm}$$

$$Re_\lambda \in [200 - 700]$$

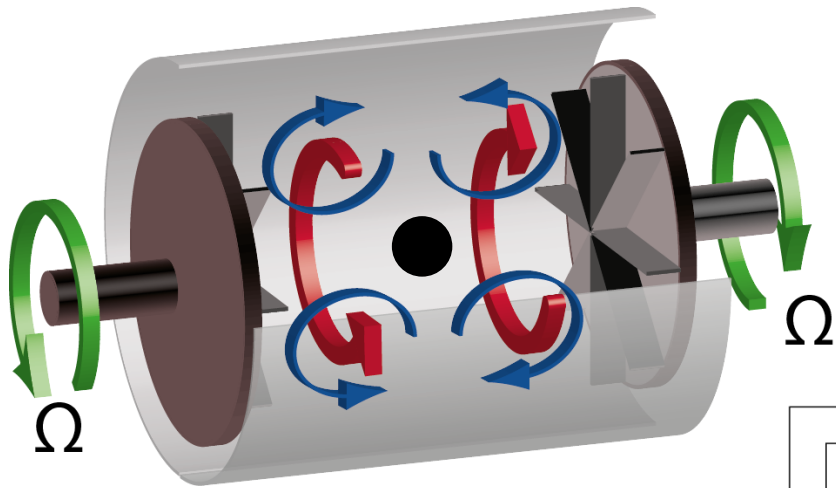
T_{eau} contrôlée



Glaçons librement advectés

I/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

CELLULE DE VON KARMAN

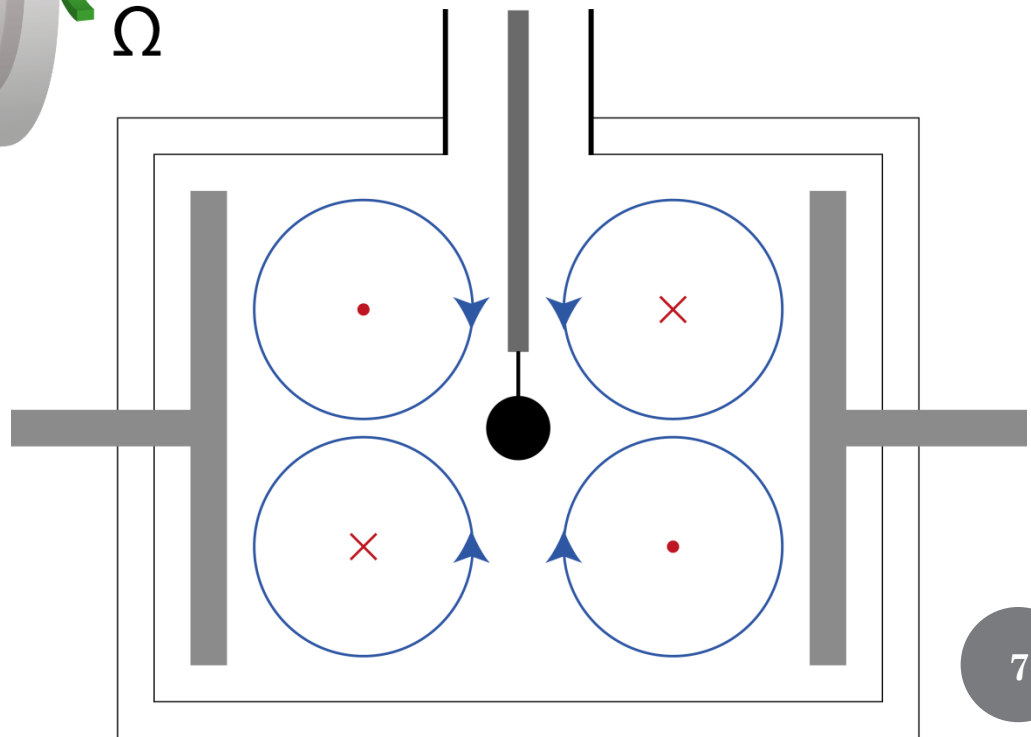


$$\Omega \in [1.5 - 7.3] \text{ Hz}$$

$$\lambda \in [1.5 - 1] \text{ mm}$$

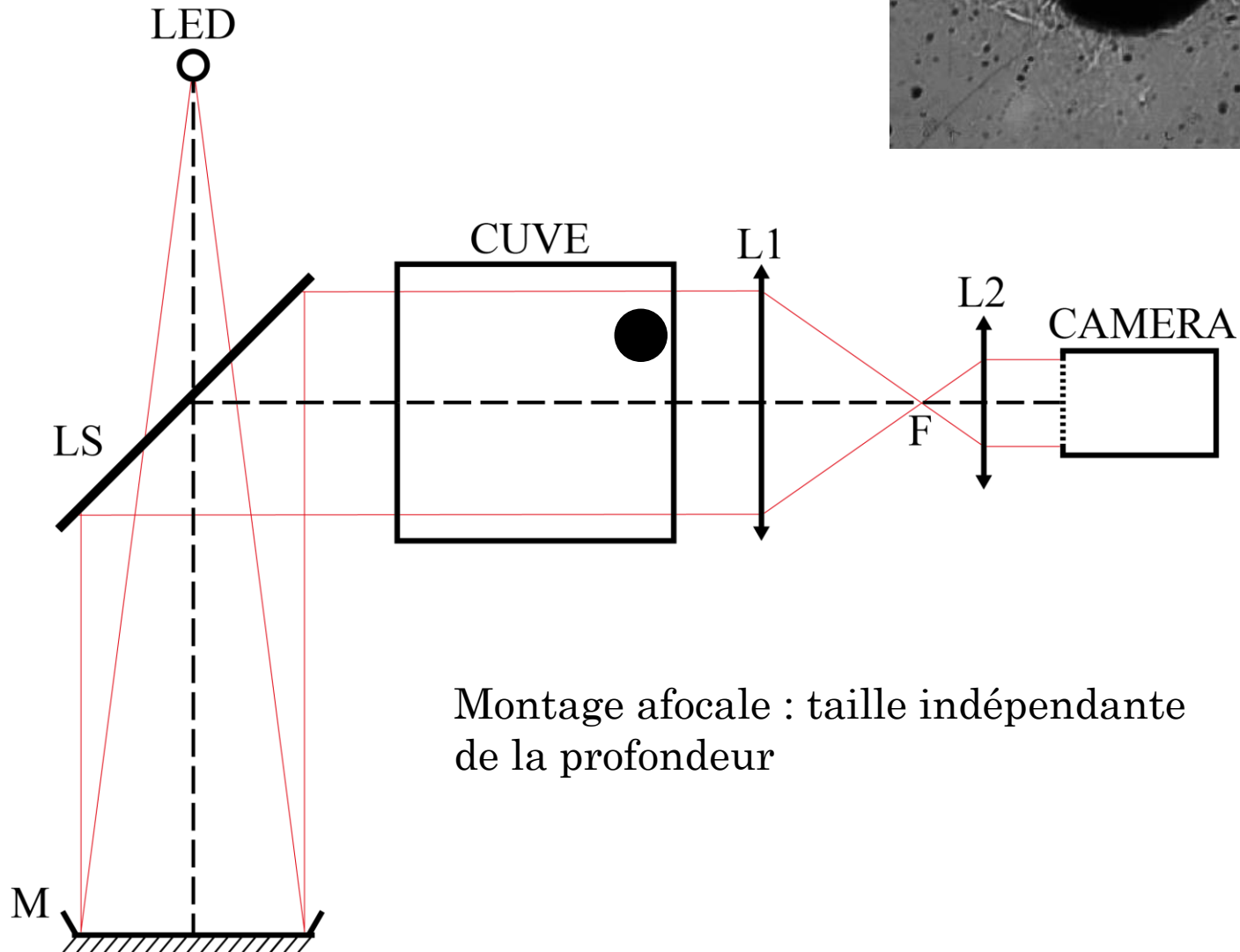
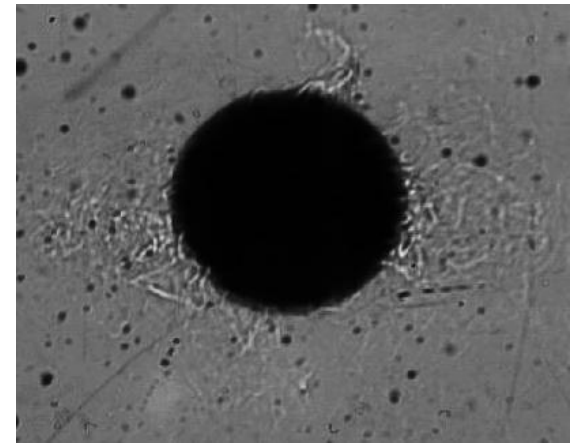
$$Re_\lambda \in [200 - 700]$$

T_{eau} contrôlée



Glaçons fixes

I/ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL MONTAGE D'OMBROSCOPIE



Montage afocale : taille indépendante
de la profondeur

II/ RÉSULTATS

ANALYSE

$T_{interface}$

T_0

$$\left\langle \frac{dR}{dt} \right\rangle = V_{fusion} \quad \text{mesuré}$$

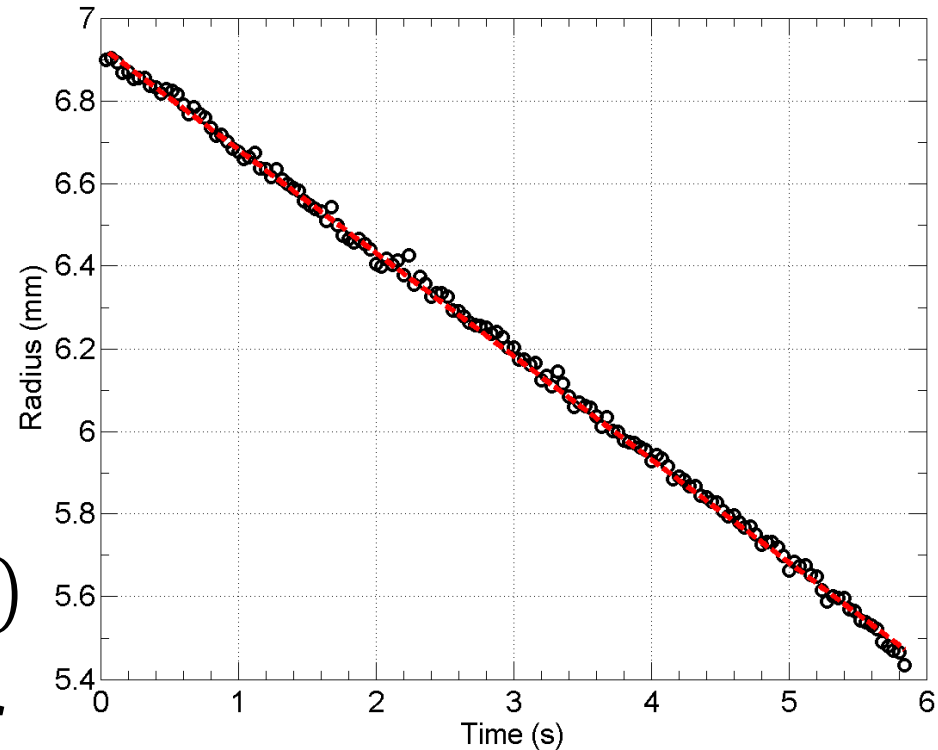
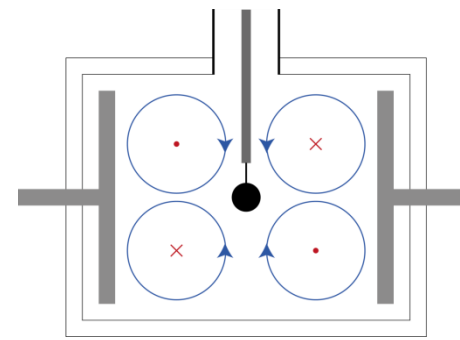
$$T_0 = 0^\circ C$$

$$\rho L_f V_{fusion} = Q/S$$

$$Q/S = h(T_{eau} - T_{interface})$$

$$T_{interface} \approx T_{fusion} = 0^\circ C$$

$$h = \frac{\rho_{glace} L_f V_{fusion}}{T_{eau}}$$

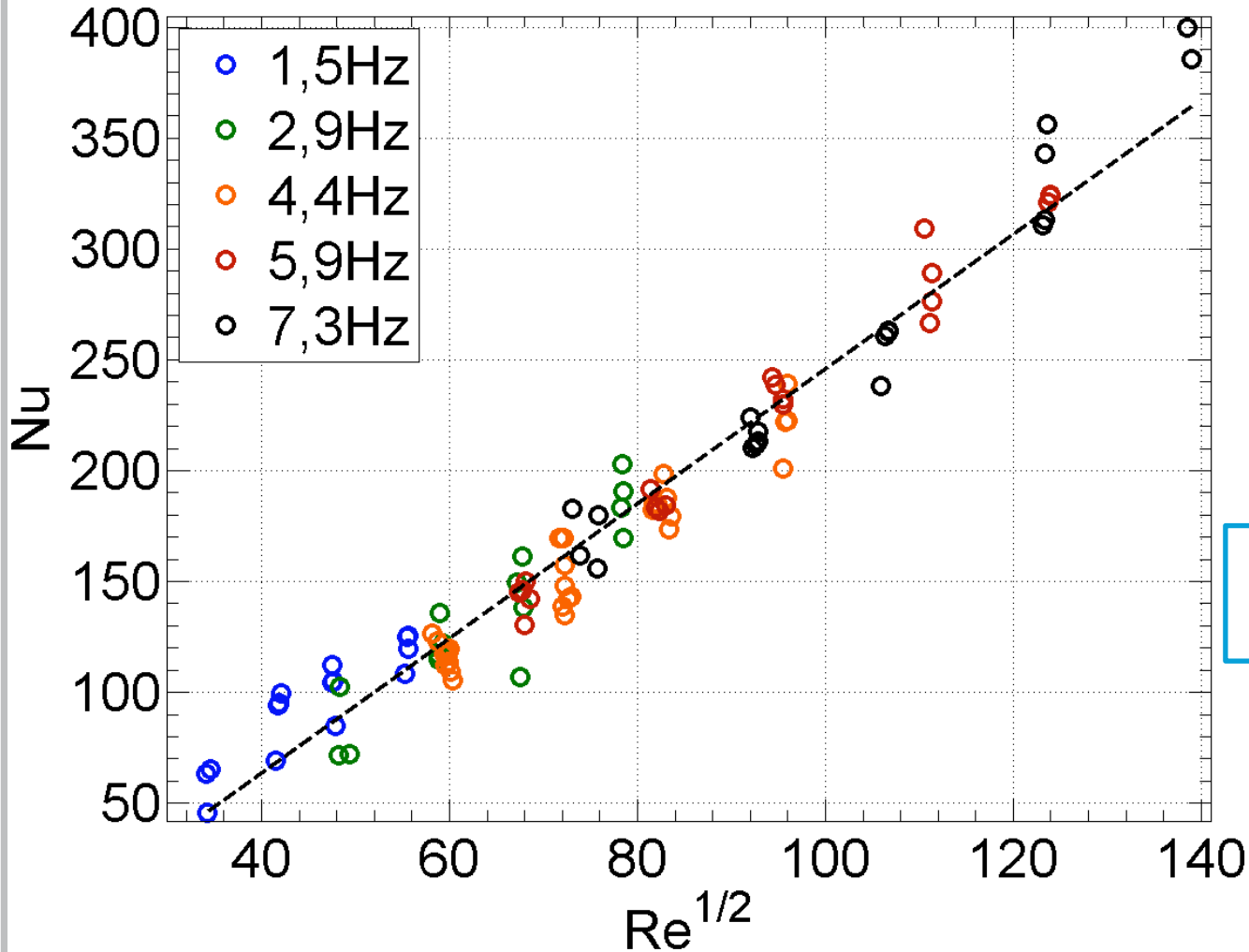
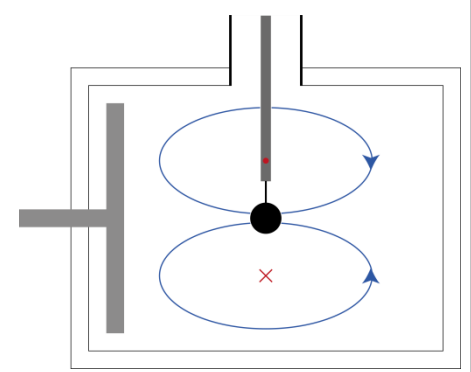


$$D = [10 \ 14 \ 18 \ 24 \ 30] \text{ mm}$$

$$\Omega = [1,5 \ 2,9 \ 4,4 \ 5,9 \ 7,3] \text{ Hz}$$

$$u_{rms} = [0,2 \ 0,4 \ 0,6 \ 0,8 \ 1] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

II/ RÉSULTATS VENT MOYEN

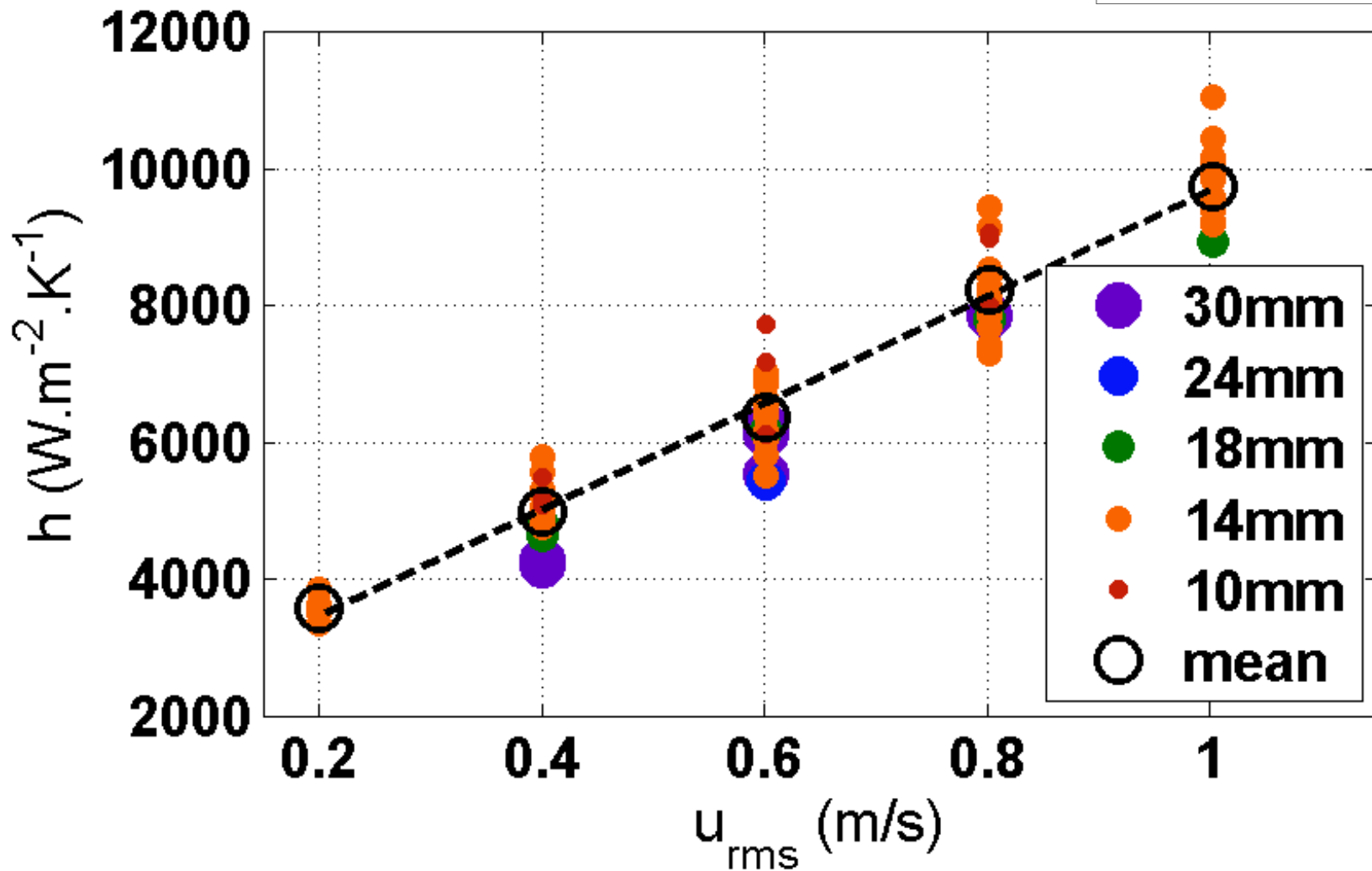
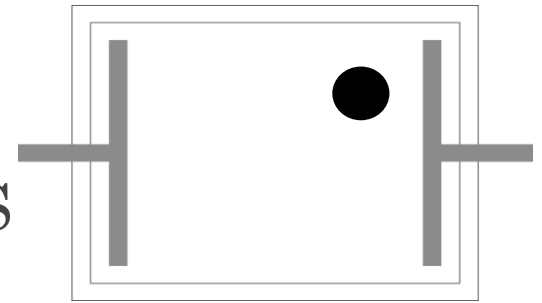


$$Re_D = \frac{UD}{\nu}$$
$$Nu_D = \frac{hD}{\lambda_{th}}$$

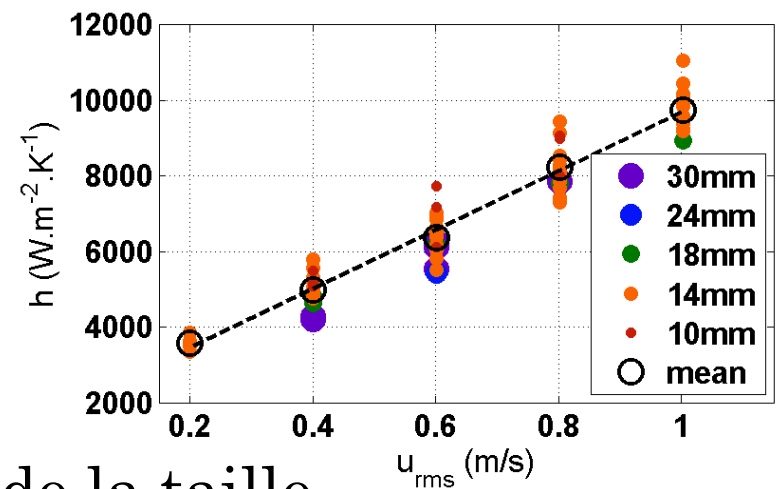
$$Nu_D \sim \sqrt{Re_D}$$

II/ RÉSULTATS

GLAÇONS LIBREMENT ADVECTÉS



II/ RÉSULTATS GLAÇONS LIBRES



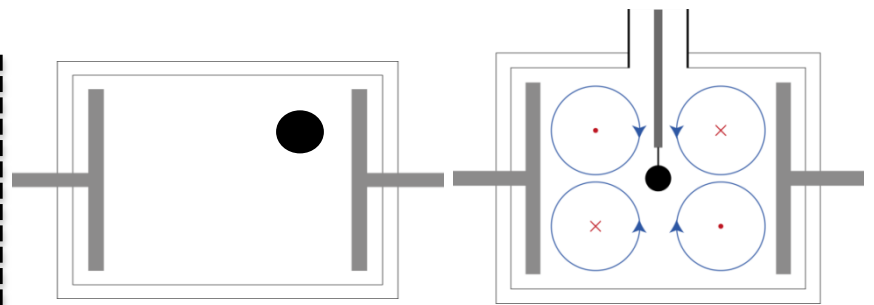
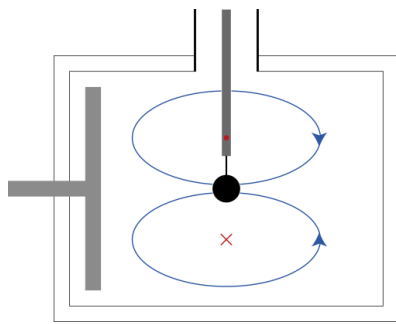
- Pas d'influence systématique de la taille
- Coefficient de transfert thermique proportionnel aux fluctuations de vitesse :

$$h(\cancel{D}, u_{rms}) \propto u_{rms}$$

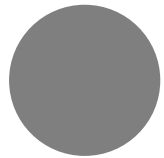
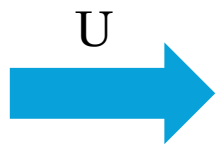
$$Nu_D \propto Re_D \neq \sqrt{Re_D}$$

$$Re_D = \frac{u_{rms} D}{\nu}$$

$$Nu_D = \frac{hD}{\lambda_{th}}$$



○ Couches limites :



D

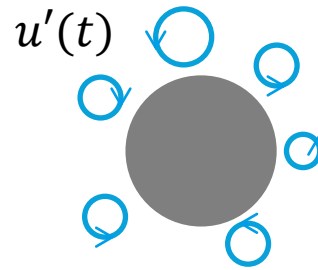
$$\delta \sim \frac{D}{\sqrt{Re}}$$

○ Modèle ($Pr \gtrsim 1$) :

$$Nu_\delta = 1 = \frac{Q_s \delta}{\lambda_{th} \Delta T}$$

$$h = \frac{Q_s}{\Delta T} = \frac{\lambda_{th}}{\delta}$$

$$Nu_D = \frac{hD}{\lambda_{th}} \sim \frac{1}{\delta}$$

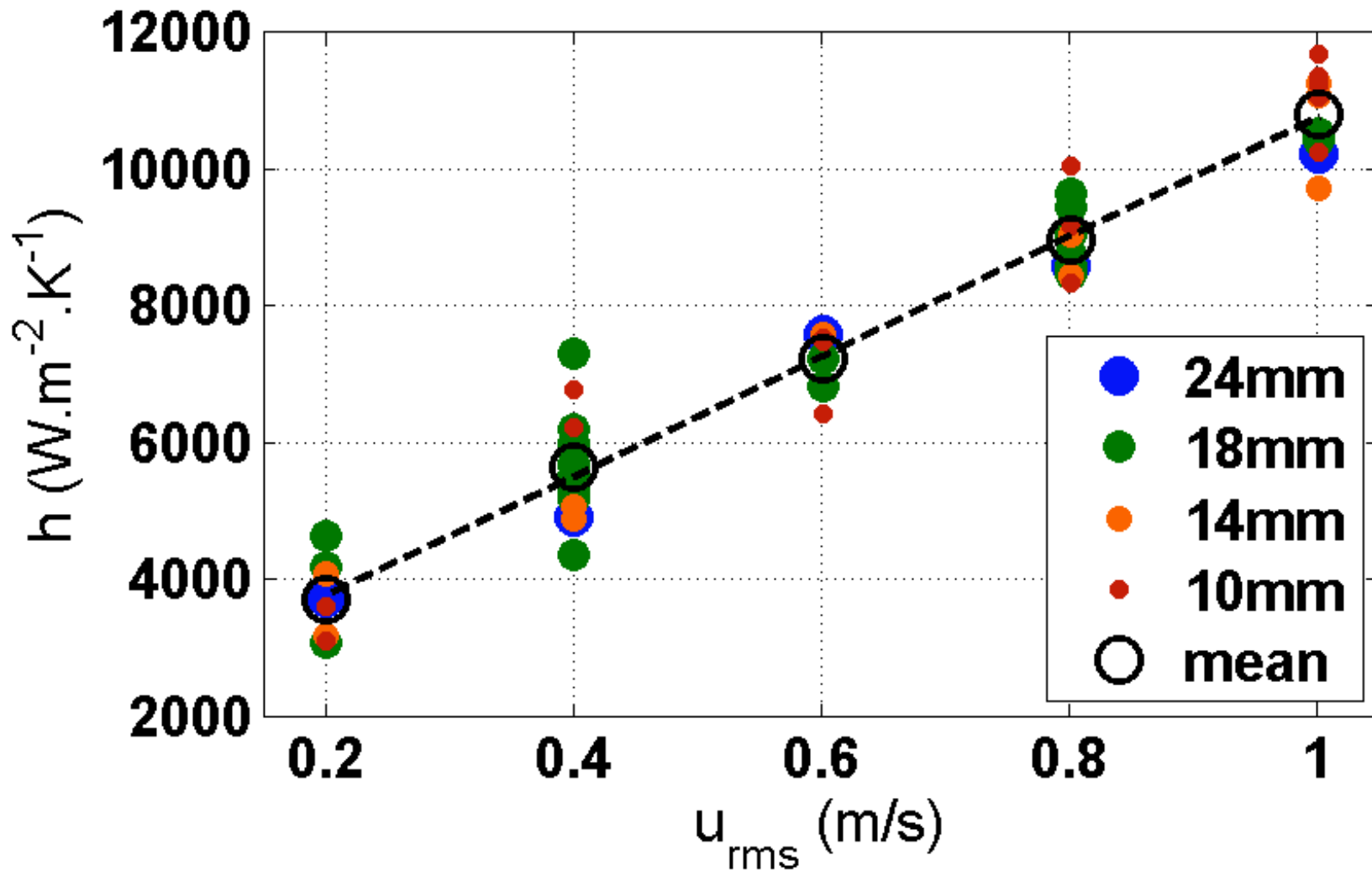
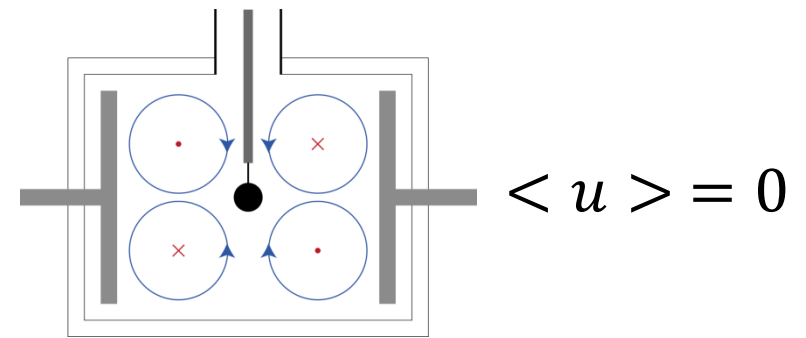


$$\delta \sim \frac{D}{Re}$$

$$Nu_D \sim \sqrt{Re_D}$$

$$Nu_D \sim Re_D$$

II/ RÉSULTATS GLAÇONS FIXES

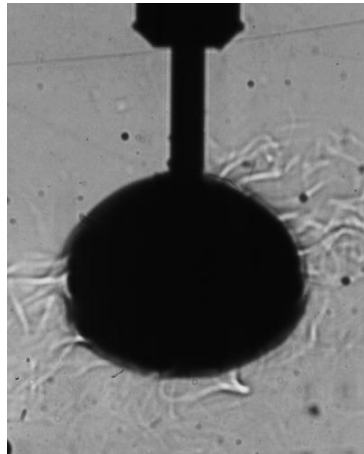


CONCLUSION

- Expérience validée par le cas « vent moyen »
- Cas d'un faible écoulement moyen :
 - $h \propto u_{rms}$
 - $Nu_D \propto Re_D$
 - Légère tendance : les glaçons fixes fondent plus vite que les libres ($\sim 10\%$), mais l'ordre de grandeur est similaire (malgré des dynamiques très différentes)
 - Cas libre : les petits diamètres fondent légèrement plus vite : effet d'exploration préférentielle

CONCLUSION

- Expérience validée par le cas « vent moyen »
- Cas d'un faible écoulement moyen :
 - $h \propto u_{rms}$
 - $Nu_D \propto Re_D$
 - Légère tendance : les glaçons fixes fondent plus vite que les libres (~10%), mais l'ordre de grandeur est similaire (malgré des dynamiques très différentes)
 - Cas libre : les petits diamètres fondent légèrement plus vite : effet d'exploration préférentielle
- Fusion non sphérique pour les glaçons fixes : dynamique de fusion sensible à l'anisotropie de l'écoulement



FLUX PROPORTIONEL À T_{EAU}

