

# Caractérisation de gouttes dans des conditions givrantes

**Mehdi STITI**

Directeur de thèse : Fabrice LEMOINE  
Co-directeur de thèse : Alexandre LABERGUE

**GDR TRANSINTER 2019**

# Contexte de l'étude

Problématique générale : Solidification de gouttes surfondues sur paroi

←  
Contexte industriel

- Givrage des avions
  - Certifications en souffleries givrantes
  - Nouvelle norme de certification → **SLD\*** → Création de nouvelles capacités givrantes
  - **Représentativité des nouvelles conditions aéronautiques reproduites?**

👉 Projet NUAGE (Programme ANR/ASTRID)



\* *Supercooled Large Droplet*  $D > 50\mu\text{m}$

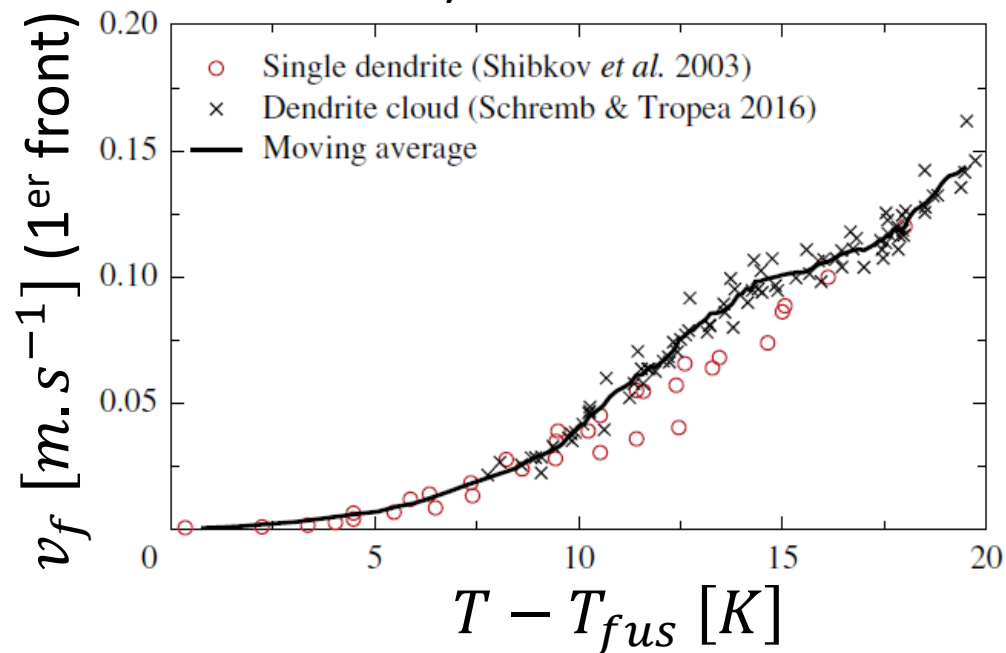
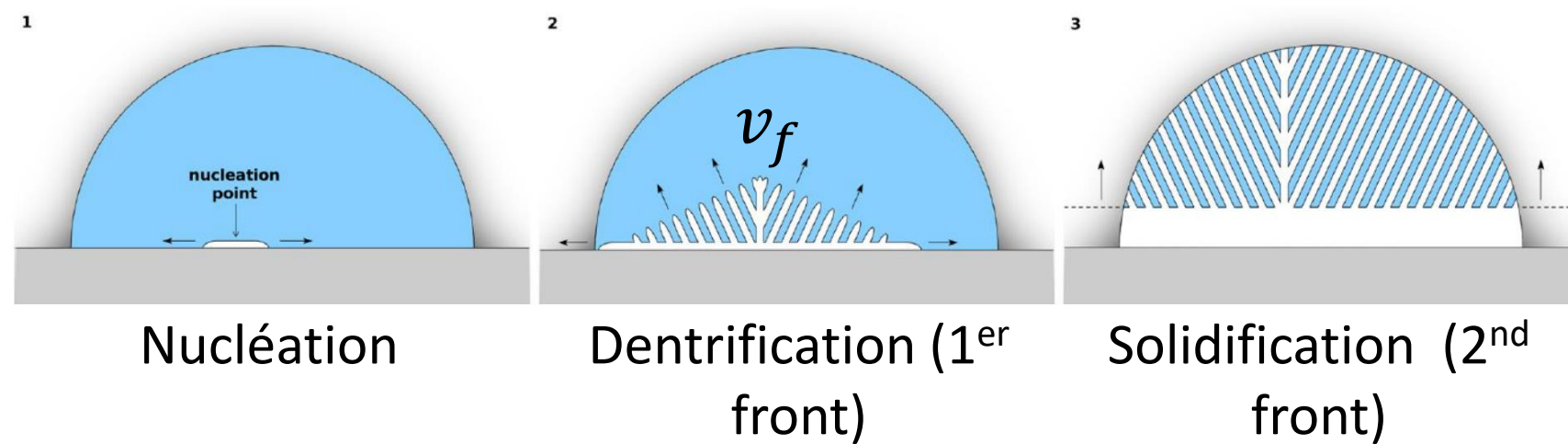
# Contexte de l'étude

Problématique générale : Solidification de gouttes surfondues sur paroi



Contexte académique

- Étude de la solidification d'une goutte d'eau surfondue impactant sur une paroi froide
- **Rôle majeur de la température des gouttes**



Schremb *et al.*, *J. Fluid Mech.* 2018

# Contexte de l'étude

Problématique générale : Solidification de gouttes surfondues sur paroi

Contexte industriel

- Givrage des avions
  - Certifications en souffleries givrantes
  - **Représentativité des conditions aéronautiques reproduites?**

👉 Projet NUAGE (Programme ANR/ASTRID)

Contexte académique

- Étude de la solidification de goutte d'eau surfondue impactant sur une paroi froide
- **Rôle majeur de la température des gouttes**

Développer **des diagnostics optiques** pour la caractérisation de gouttes surfondues (**mesure température + description du changement de phase**)

## Objectif :

Caractériser des gouttes surfondues en écoulement  
dans un environnement froid par Fluorescence  
Induite par Laser (**LIF**)

# I. Caractérisation de gouttes surfondues en écoulement dans un environnement froid par Fluorescence Induite par Laser (LIF)

Technique de mesure basée sur la LIF

- Pour mesure de **température négative**
- Description du changement de phase
- Intrusivité de la technique sur l'état de surfusion?

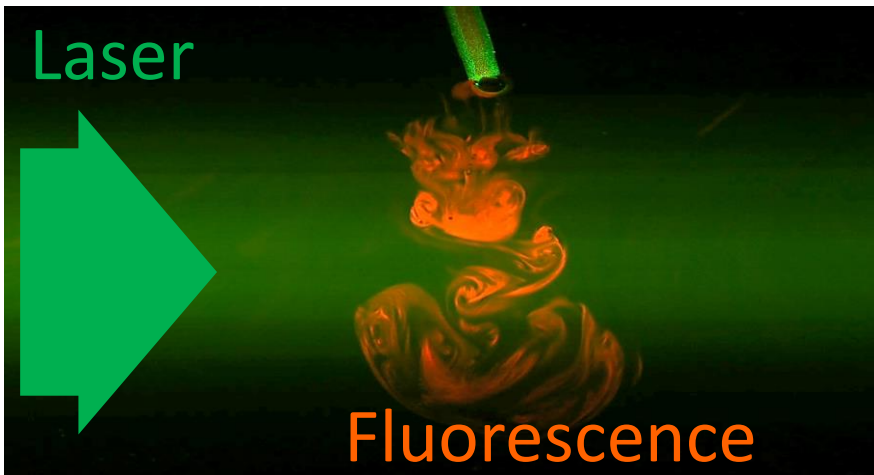
Etude échelle laboratoires

Train de gouttes monodispersées (LEMMA):  
*Vitesse maximale 12 m/s*  
*Diamètre de 100 à 400  $\mu\text{m}$*   
 *$T_{\text{air}} : -56^{\circ}\text{C minimum}$*

Extension étude conditions aéronautiques givrantes

Soufflerie Givrante (DGA Centre Essai Propulseur)  
*Vitesse maximale 180 m/s*  
*Diamètre de 40 à 200  $\mu\text{m}$*   
 *$T_{\text{air}} : -36^{\circ}\text{C minimum}$*

## I.1 Principe de la thermométrie par LIF



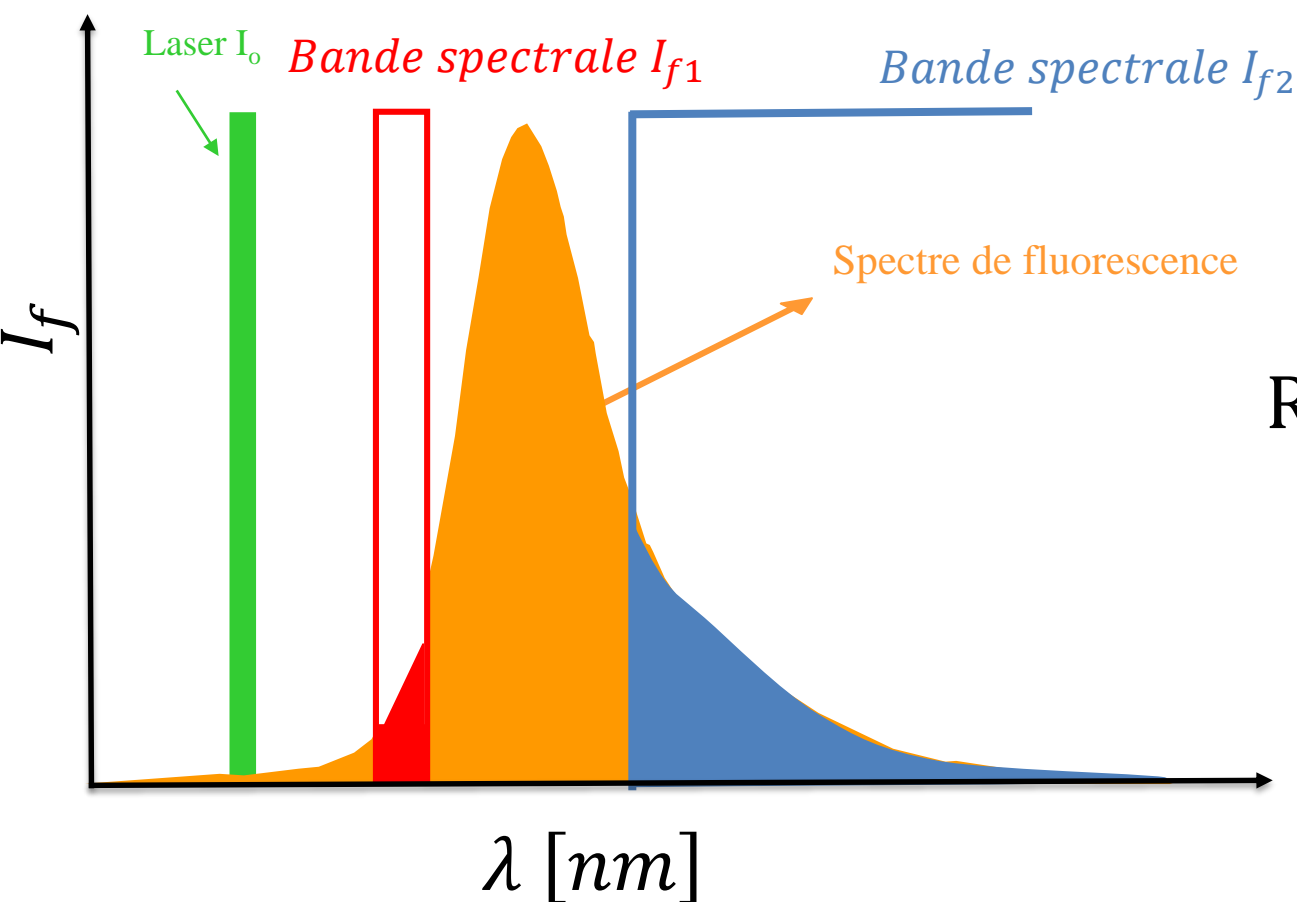
L'intensité de fluorescence  $I_f$ :

$$I_f = C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K \cdot e^{T \cdot s} \leftarrow \text{sensibilité en température } [ \% / ^\circ\text{C}]$$

- Mesure de l'intensité de fluorescence  $I_f$  sur 2 bandes spectrales :

$$I_{f1} = C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K \cdot e^{s_1 \cdot T}$$

$$I_{f2} = C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K \cdot e^{s_2 \cdot T}$$



- Rapport :

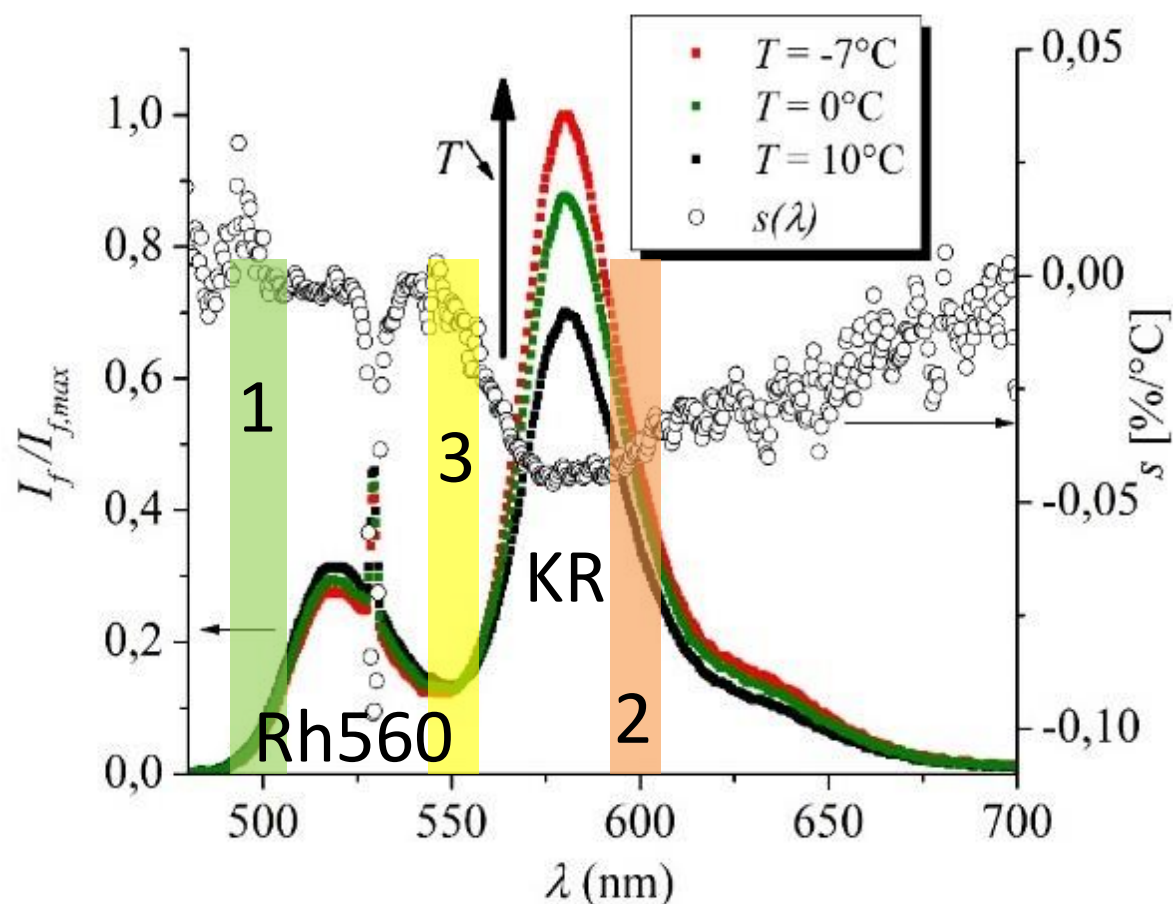
$$R_{12} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K_1}{C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K_2} \cdot e^{(s_1 - s_2) \cdot T}$$

- Référence à une température connue  $T_0$  :

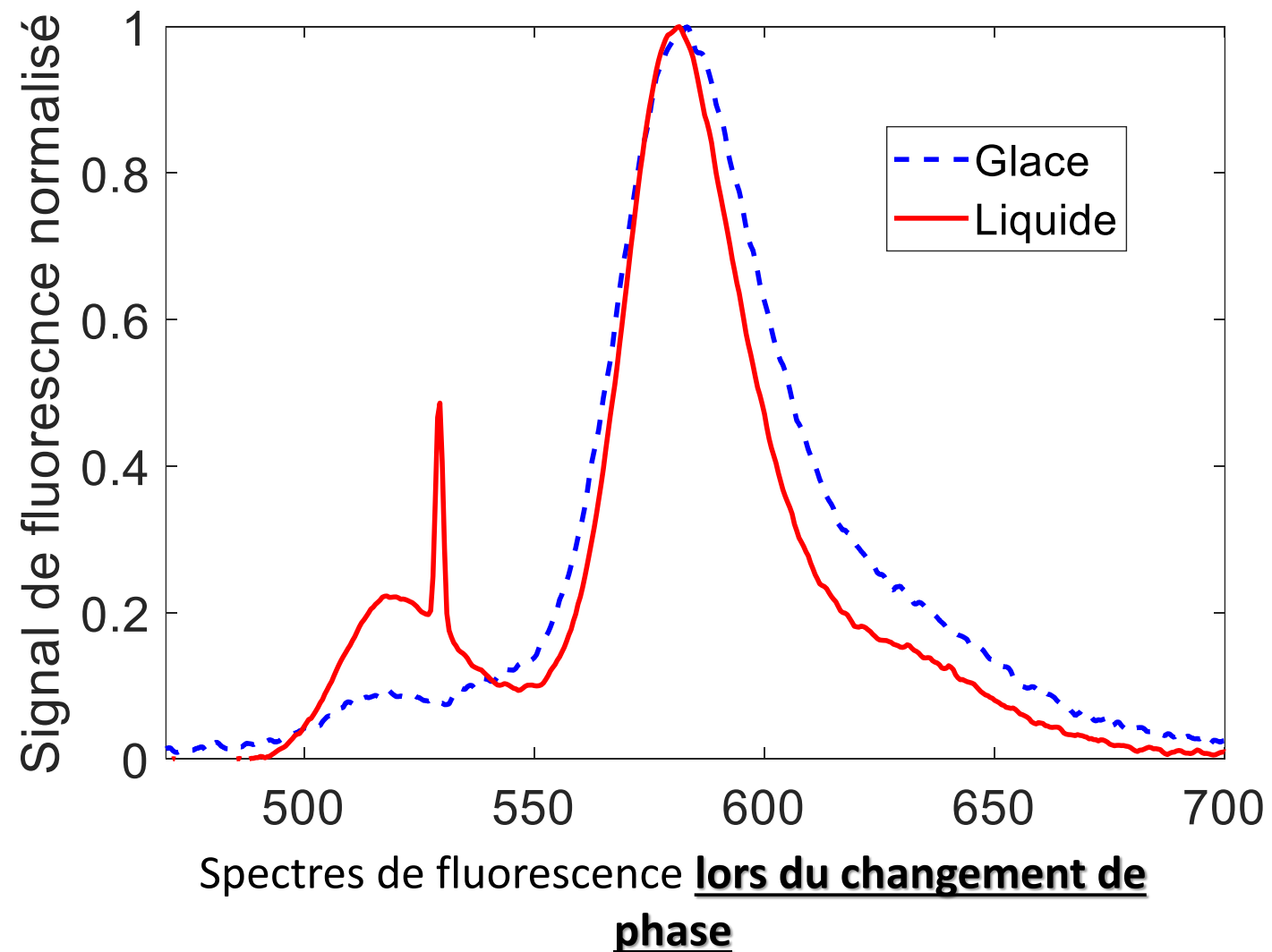
$$\frac{R_{12}(T)}{R_{120}(T_0)} = e^{s_{12}(T - T_0)}$$

## I.2 Solution LIF appliquée gouttes surfondues

Rhodamine 560, *Rh560* ( $5 * 10^{-6} mol. L^{-1}$ ) et KitonRed, *KR* ( $5 * 10^{-7} mol. L^{-1}$ )



Spectre de fluorescence du mélange pour différentes températures en phase liquide

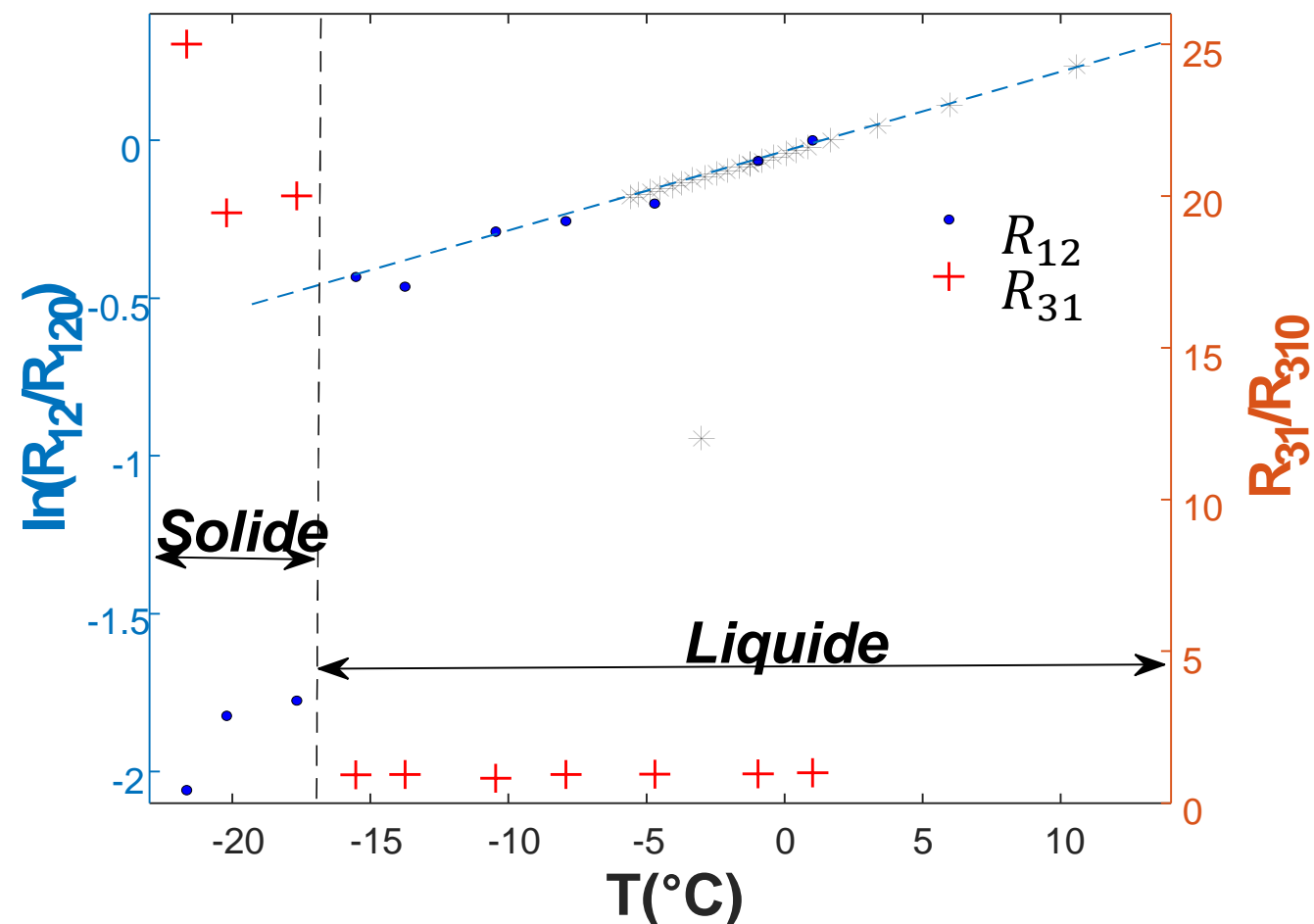


$R_{12} \rightarrow$  Sensible à la température

$R_{31} \rightarrow$  Sensible au changement de phase



## I.3 Calibration en température et changement de phase du mélange



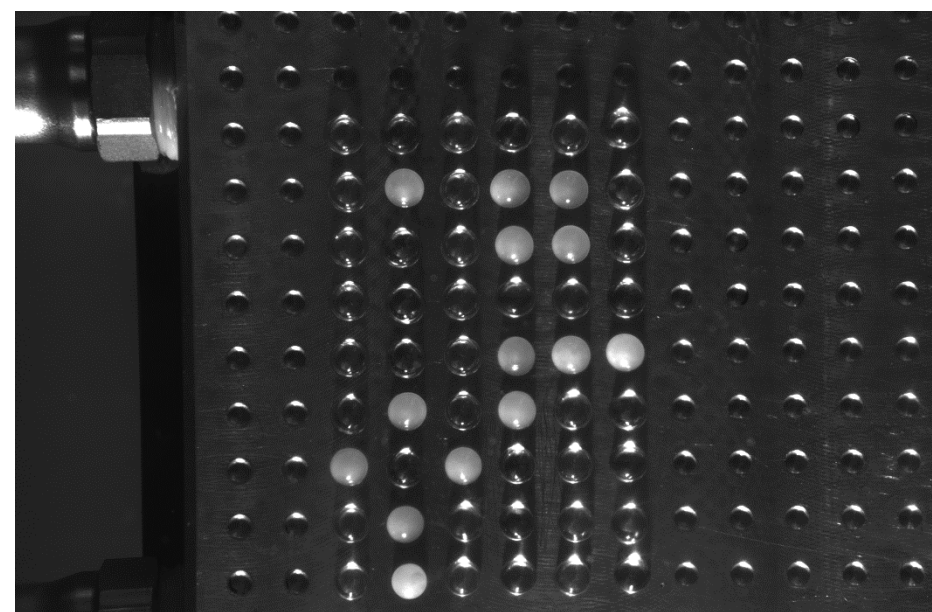
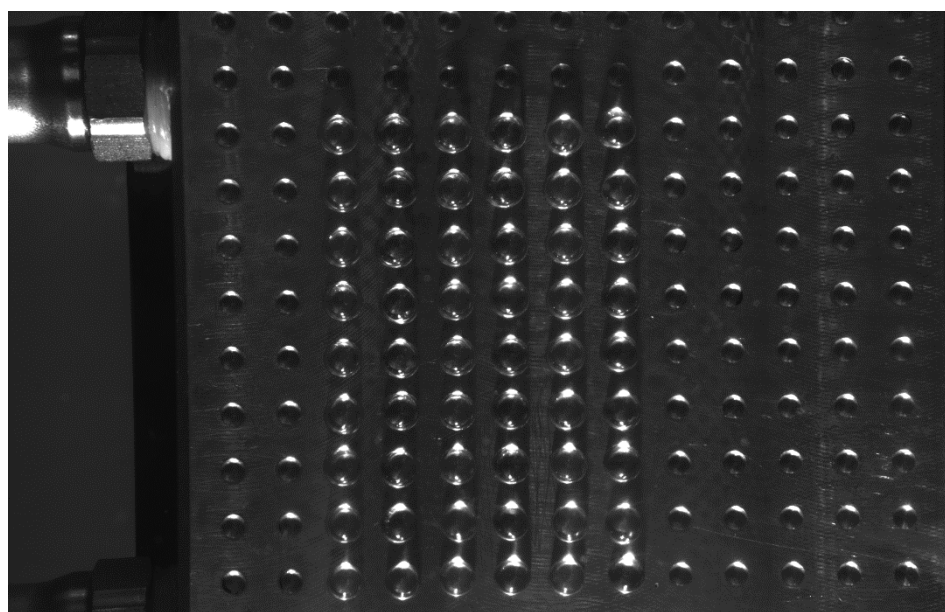
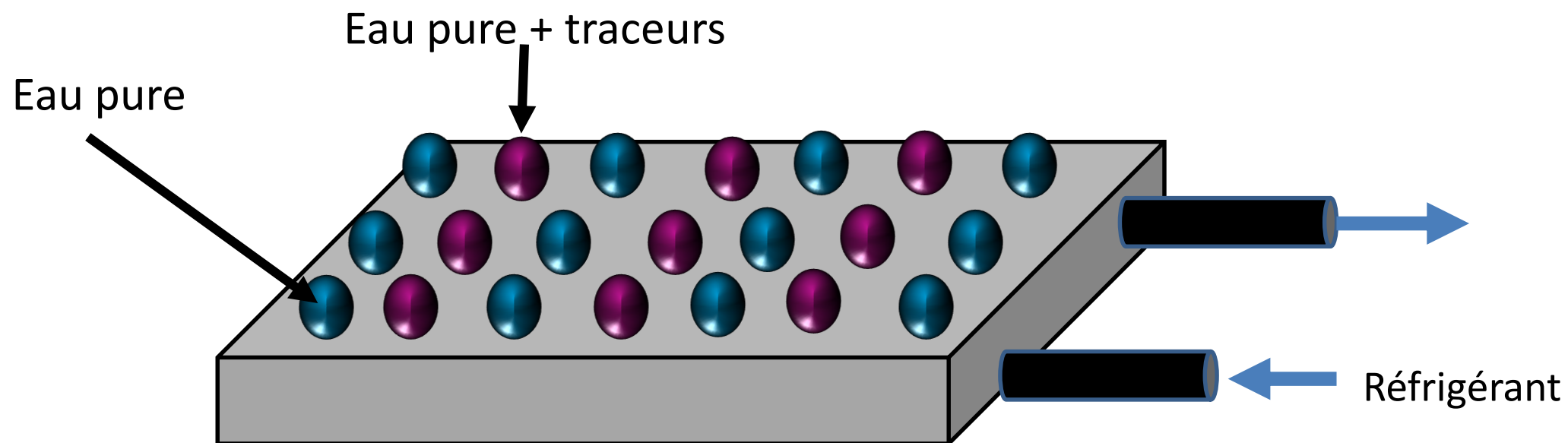
$$s_1 - s_2 = 2.56\%/C$$

Utilisation d'autres techniques :

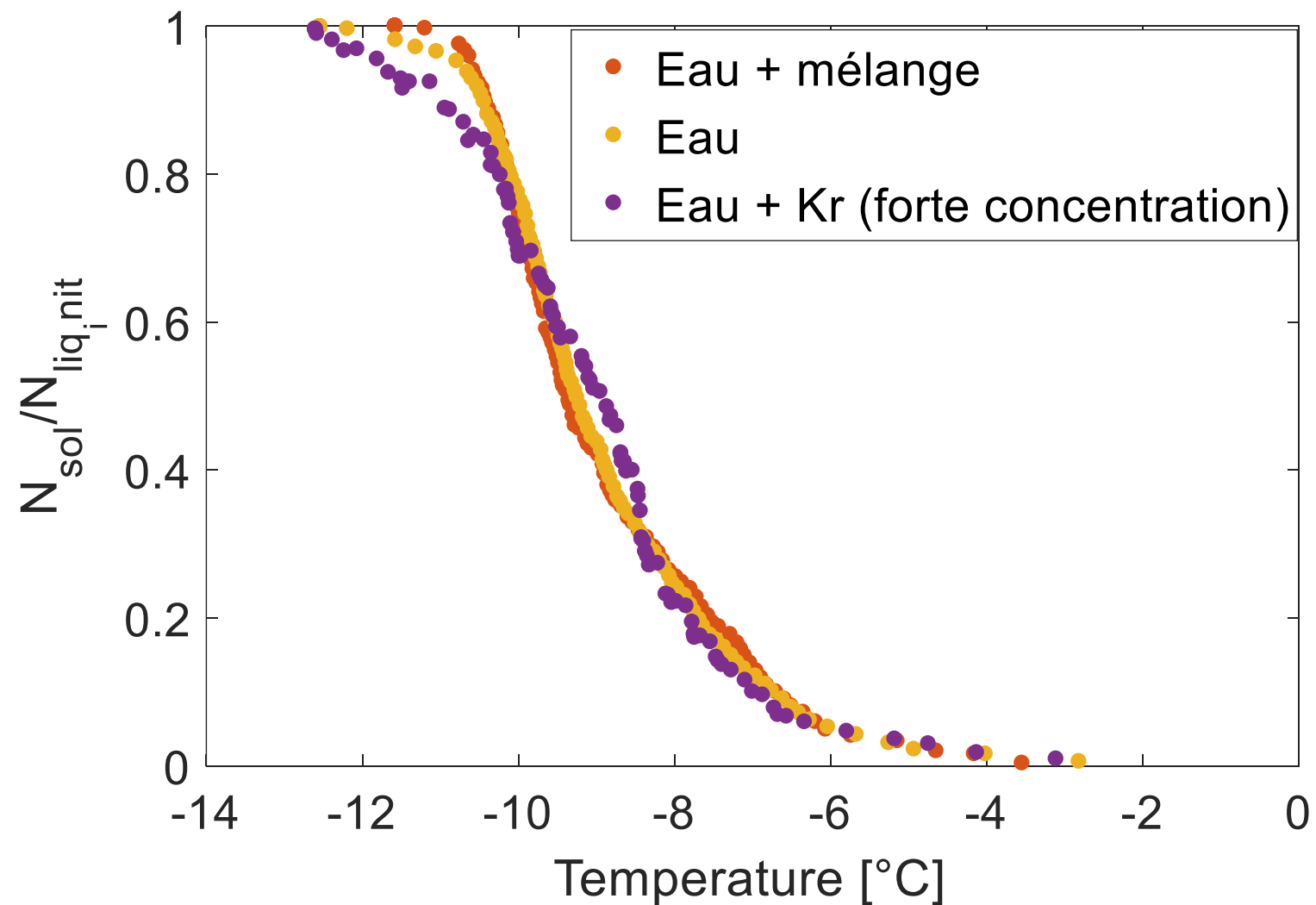
LIF/Raman → Validation sensibilité au changement de phase

LIF/IRM → Calibration de la LIF en fonction de la fraction de glace

## I.4 Influence des traceurs sur la température de solidification de l'eau



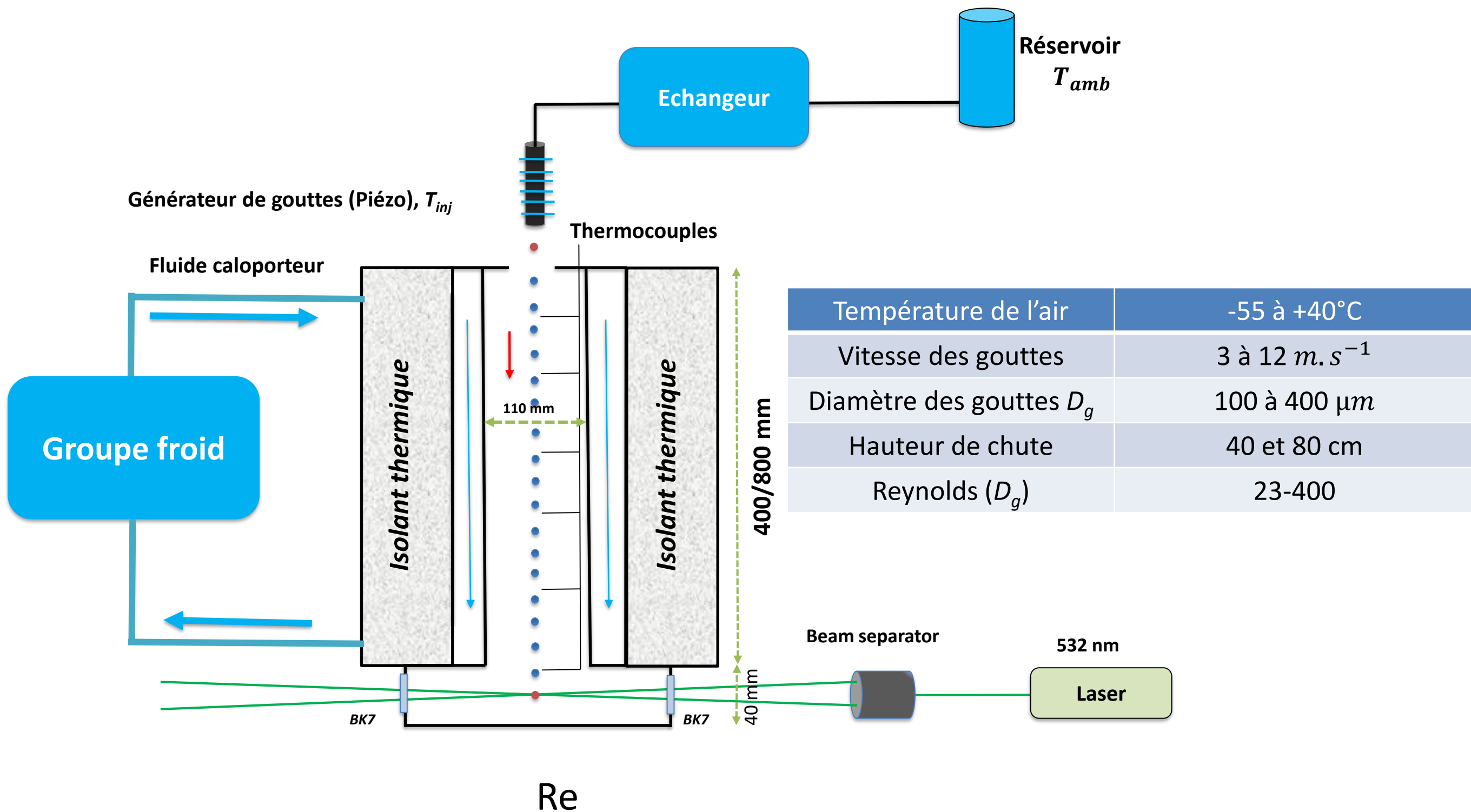
## I.4 Influence des traceurs sur la température de solidification de l'eau



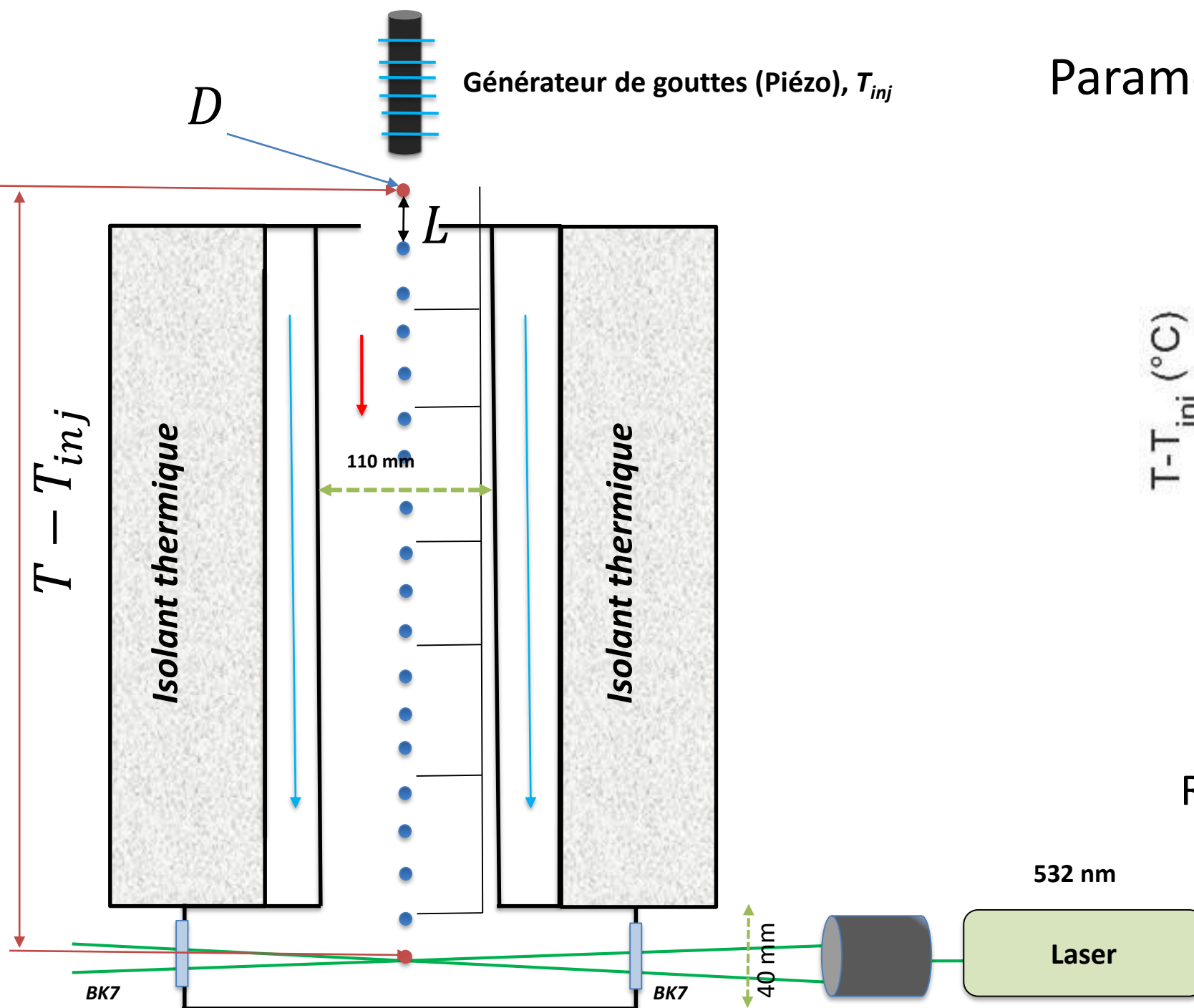
Evolution du rapport *nombre gouttes gelées sur nombre de gouttes initiales* en fonction de la température de surface

➤ Influence des traceurs négligeable

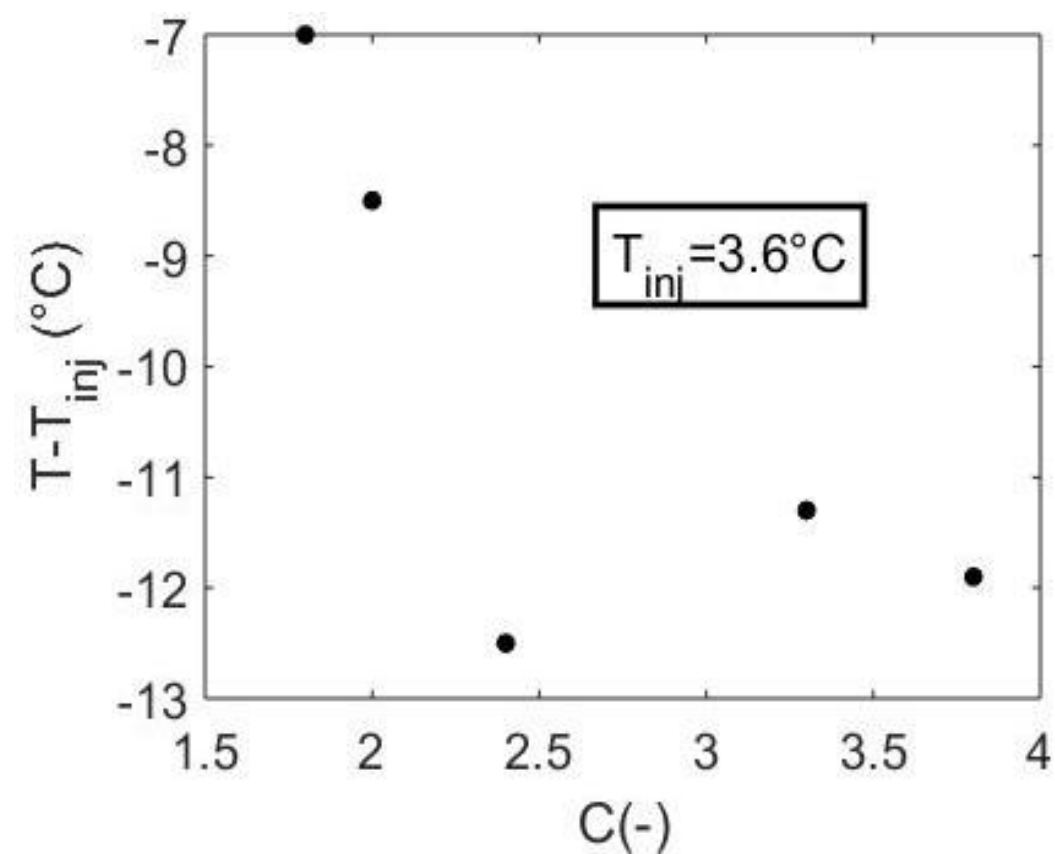
# I.5 Etude échelle laboratoire



## ➤ Principaux résultats

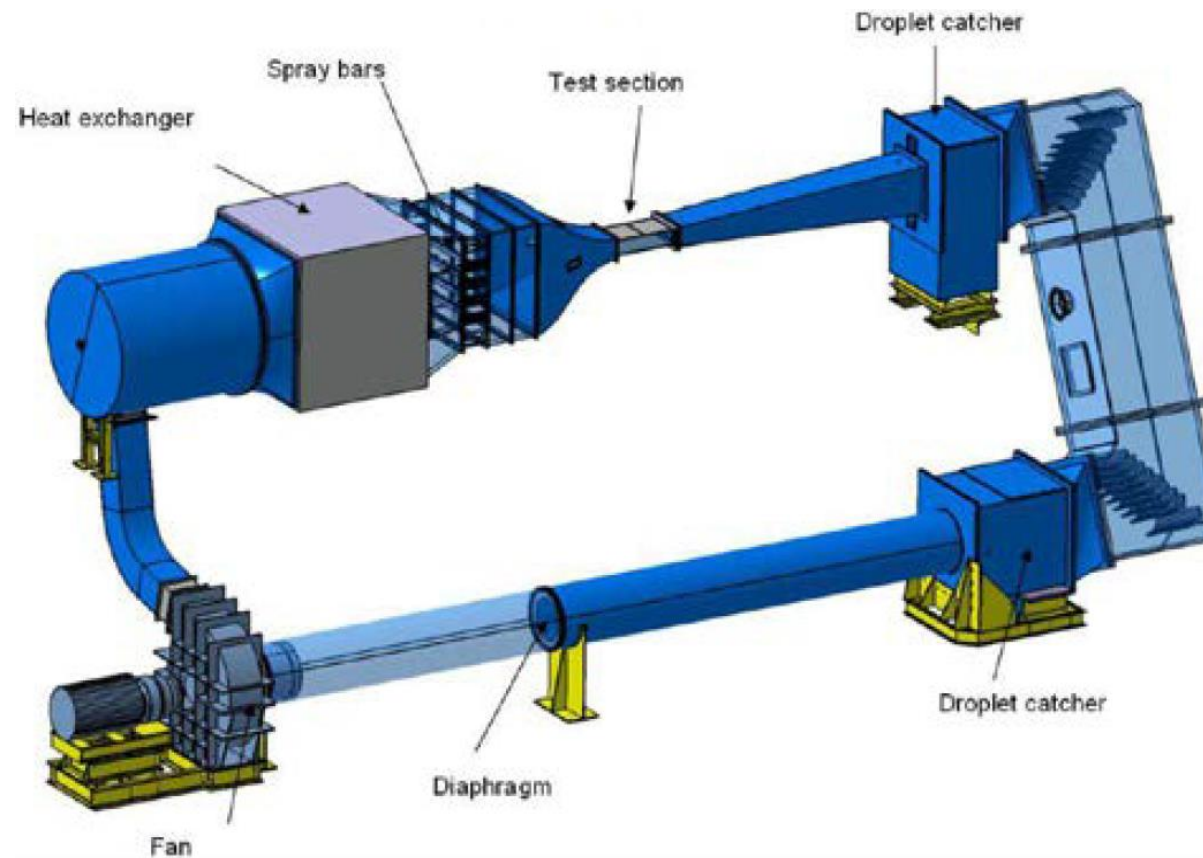


Paramètre de distance :  $C = \frac{L}{D_g}$



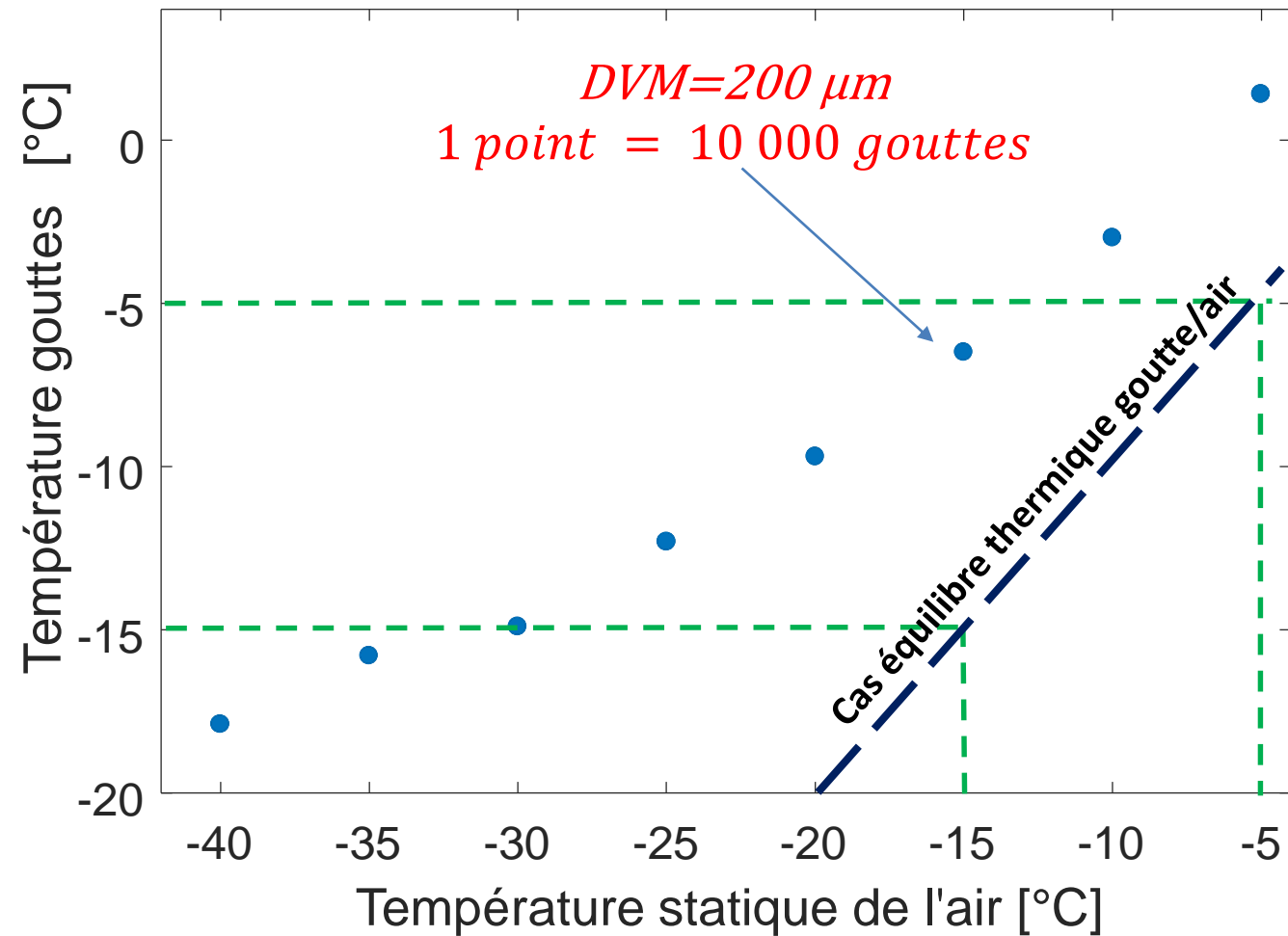
Refroidissement goutte  $D_g = 250 \mu\text{m}$  en fonction du paramètre de distance C

## I.6 Mesures en conditions aéronautiques givrantes (PAG; DGA EP)



Veine d'essais	200*200 mm <sup>2</sup>
Débit massique d'air	2 à 10 kg.s <sup>-1</sup>
<b>Vitesse de l'air</b>	<b>50 à 220 m.s<sup>-1</sup></b>
Teneur en liquide	0,15 à 3 g.m <sup>-3</sup>
<b>Température totale de l'air</b>	<b>-40 à +15 °C</b>
<b>Diamètre Volumique Moyen (DVM)</b>	<b>15 à 200 μm</b>

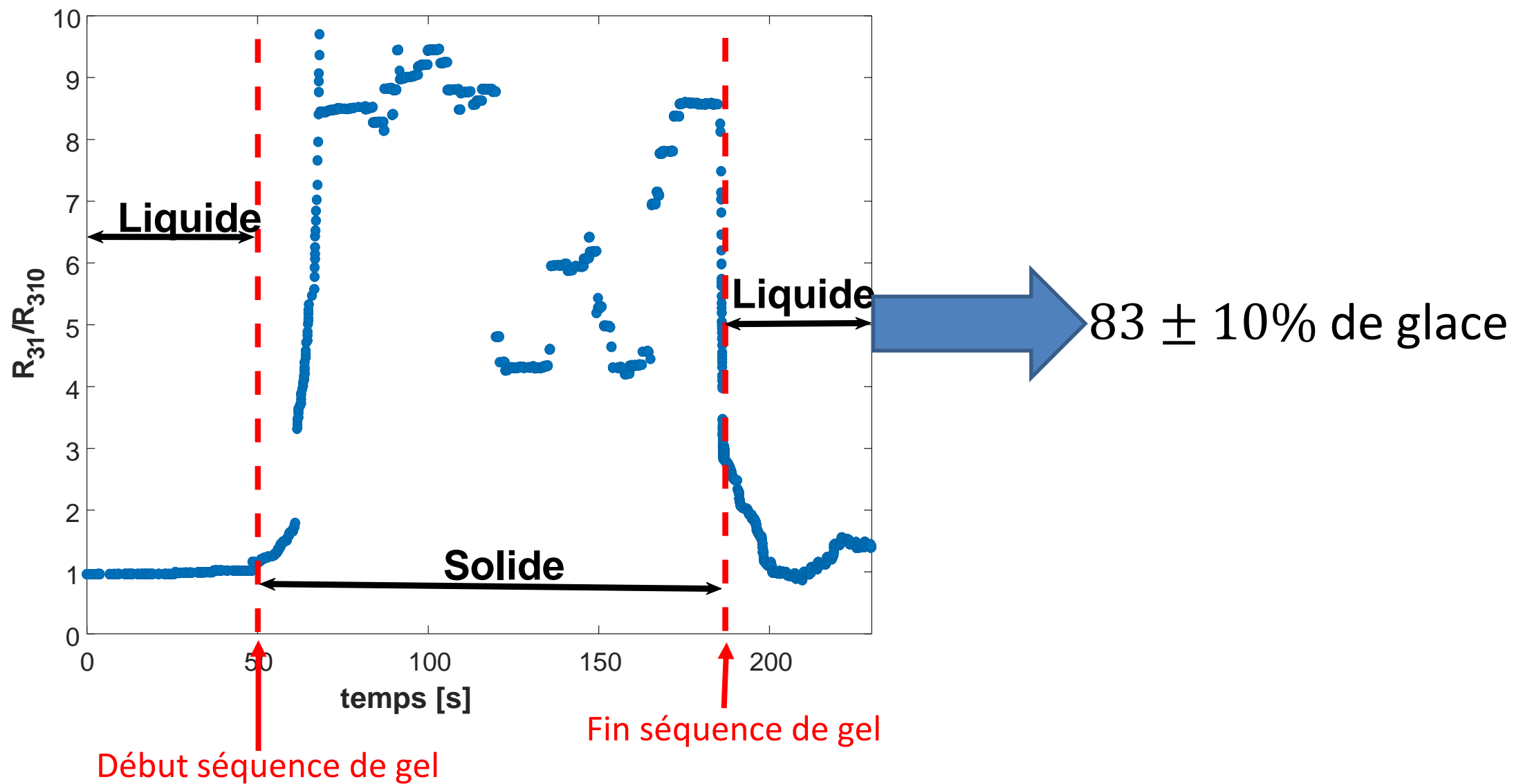
## ➤ Principaux résultats



Evolution de la température des gouttes en fonction de la température statique de l'air ( $Ma = 0.3, v = 100 \text{ m/s}$ )

**Non représentativité des conditions  
aéronautiques givrantes**

## ➤ Principaux résultats



Evolution du rapport  $R_{31}/R_{310}$  en fonction du temps



## Conclusions :

- Mise au point chaîne LIF opérationnelle pour caractérisation de gouttes surfondues: température + description de la solidification
- Tests et validation de la technique en conditions aéronautiques givrantes  
→ Gouttes pas à l'équilibre thermique avec l'air froid ambiant

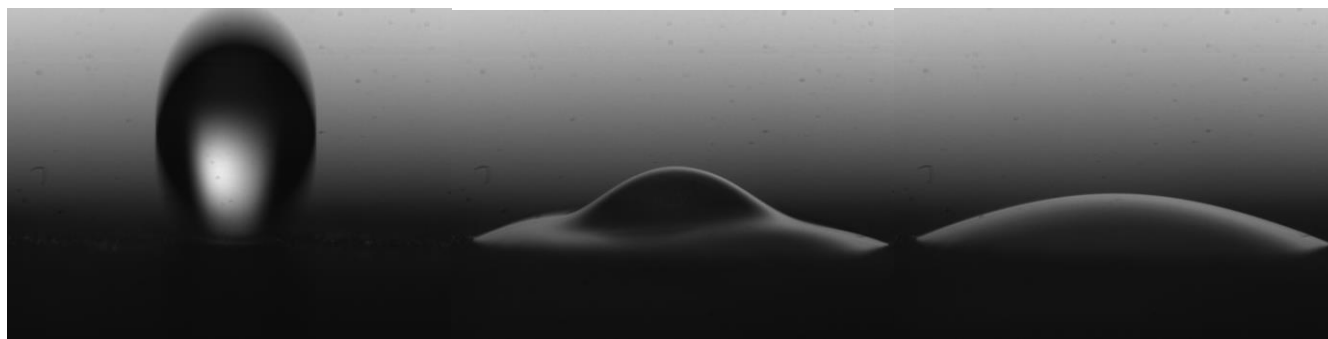
## Perspectives :

Impact sur verre

t=0 ms

t=12 ms

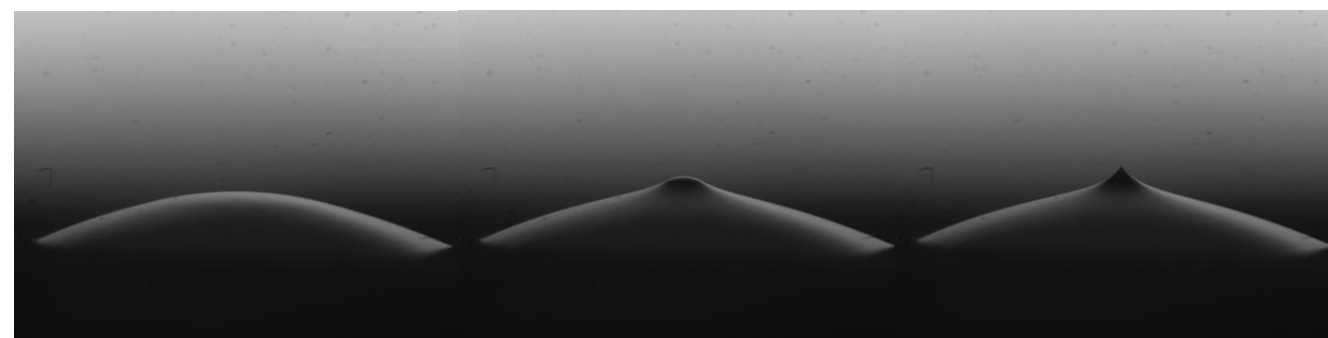
t=29 ms



t=2 s

t=18 s

t=22 s

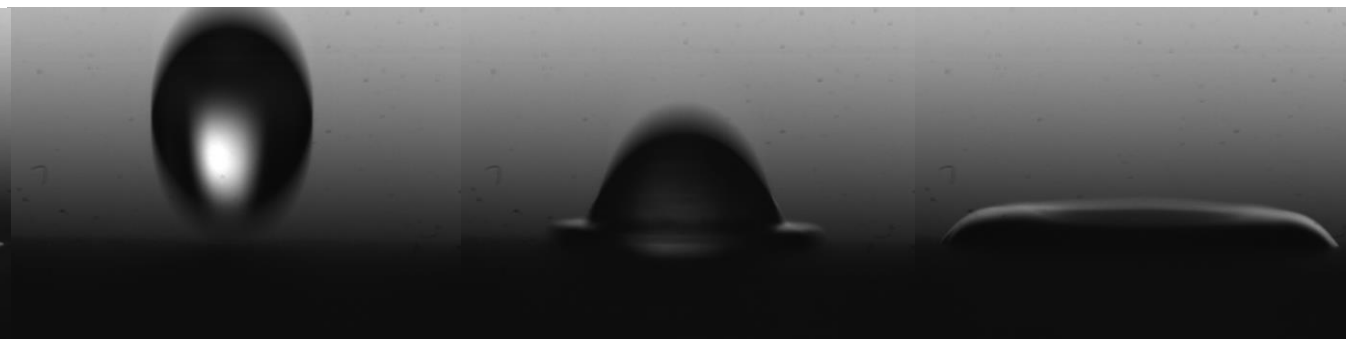


Impact sur aluminium

t=0 ms

t=1 ms

t=5,5 ms



t=10 ms

t=18 ms

t=2200 ms

