

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* $D > 50\mu\text{m}$

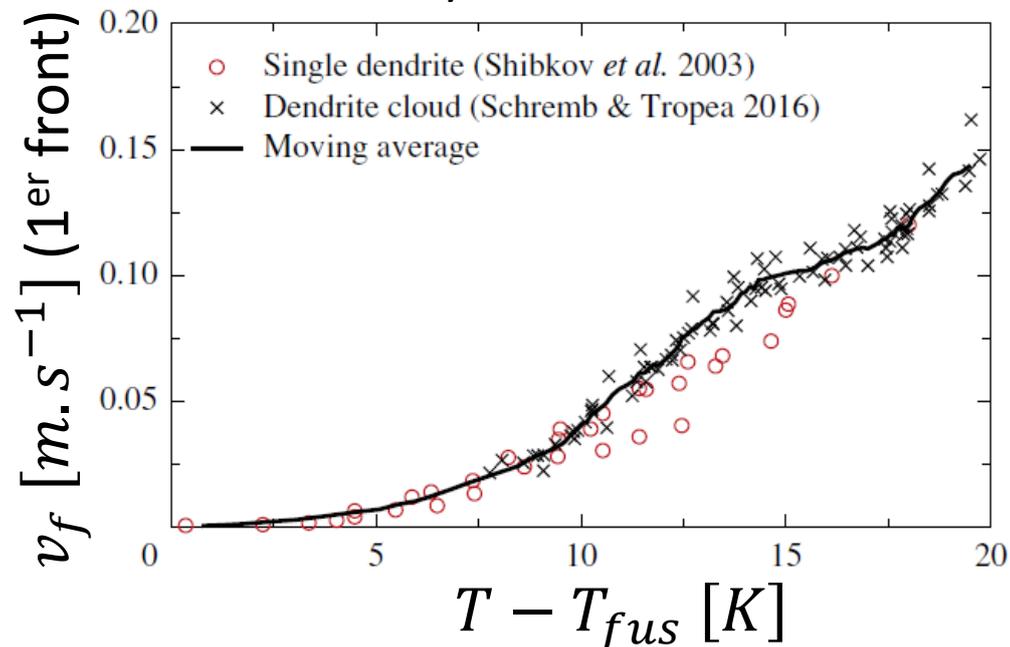
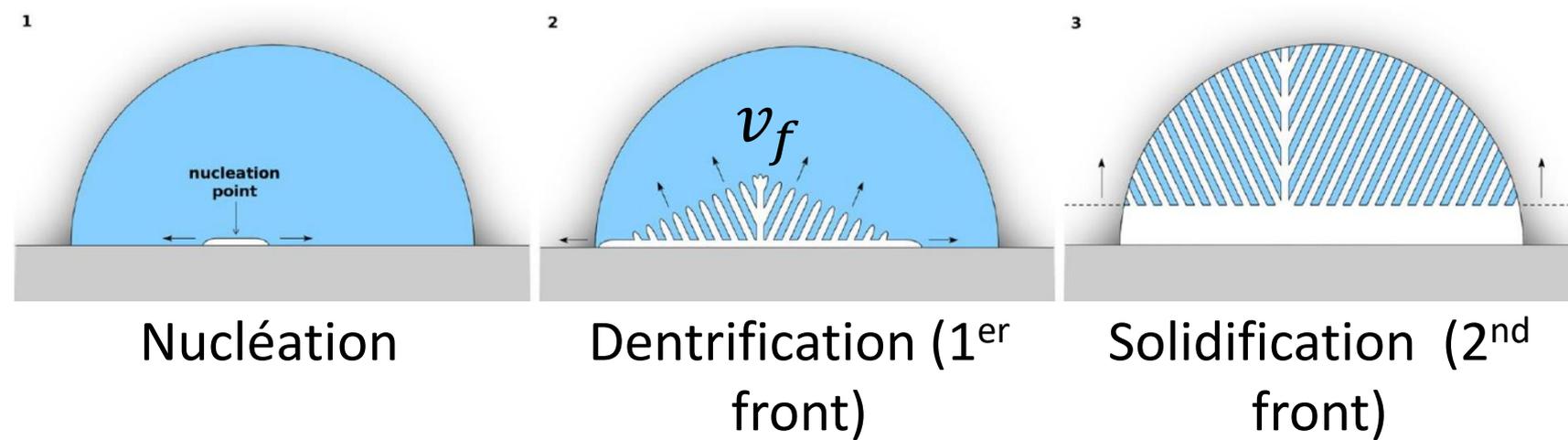
Contexte de l'étude

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?

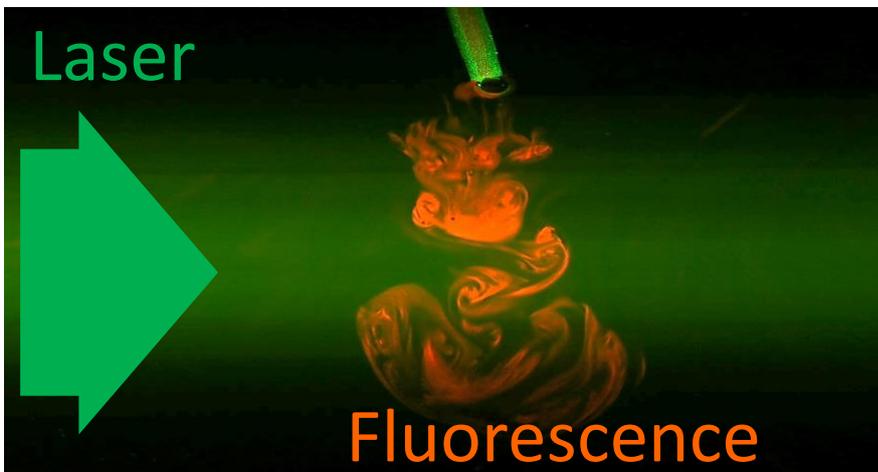
Etude échelle laboratoires

Train de gouttes monodispersées (LEMMA):
Vitesse maximale 12 m/s
Diamètre de 100 à 400 μm
 T_{air} : -56°C minimum

Extension étude conditions aéronautiques givrantes

Soufflerie Givrante (DGA Centre Essai Propulseur)
Vitesse maximale 180 m/s
Diamètre de 40 à 200 μm
 T_{air} : -36°C minimum

I.1 Principe de la thermométrie par LIF



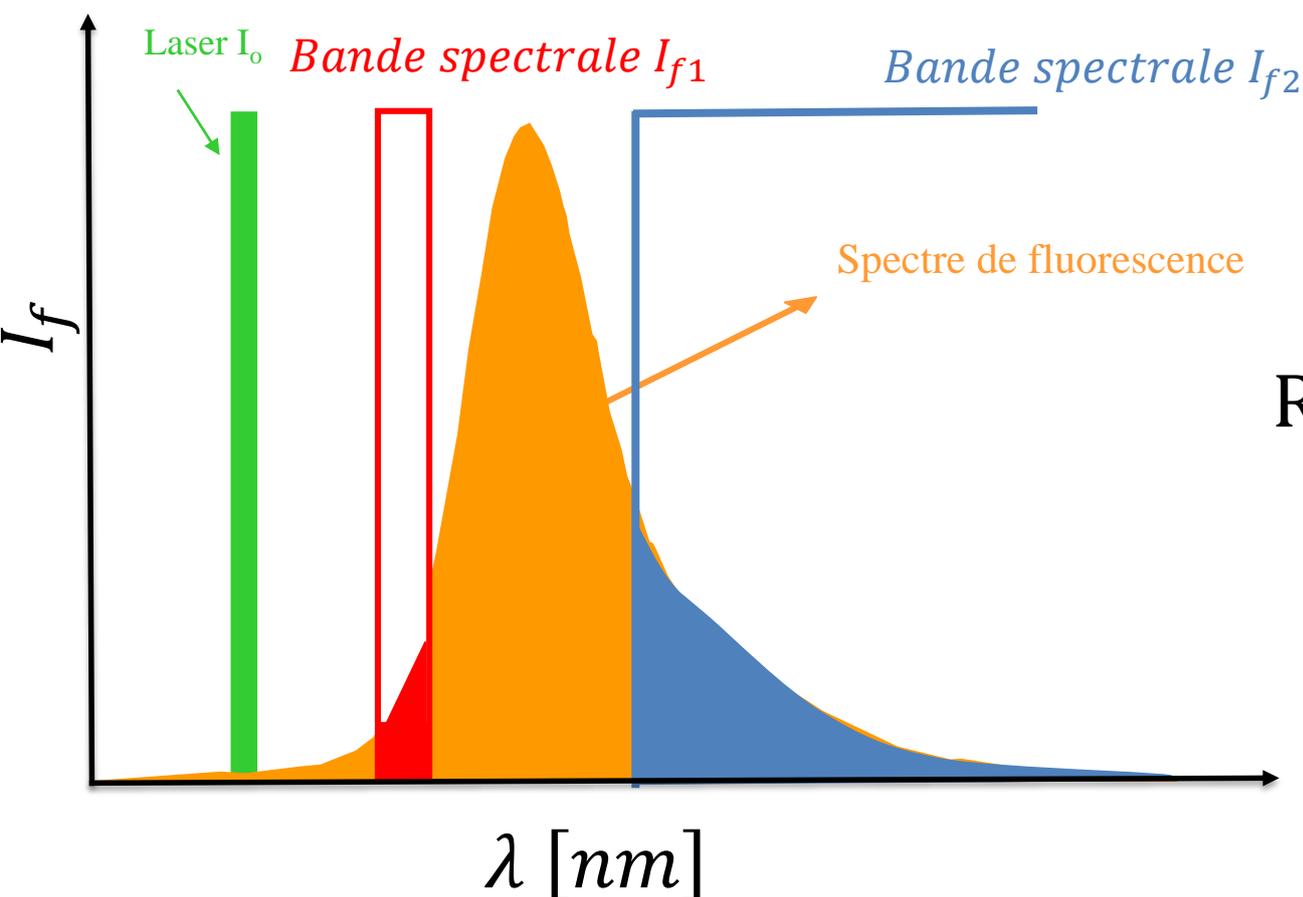
L'intensité de fluorescence I_f :

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

- 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 :

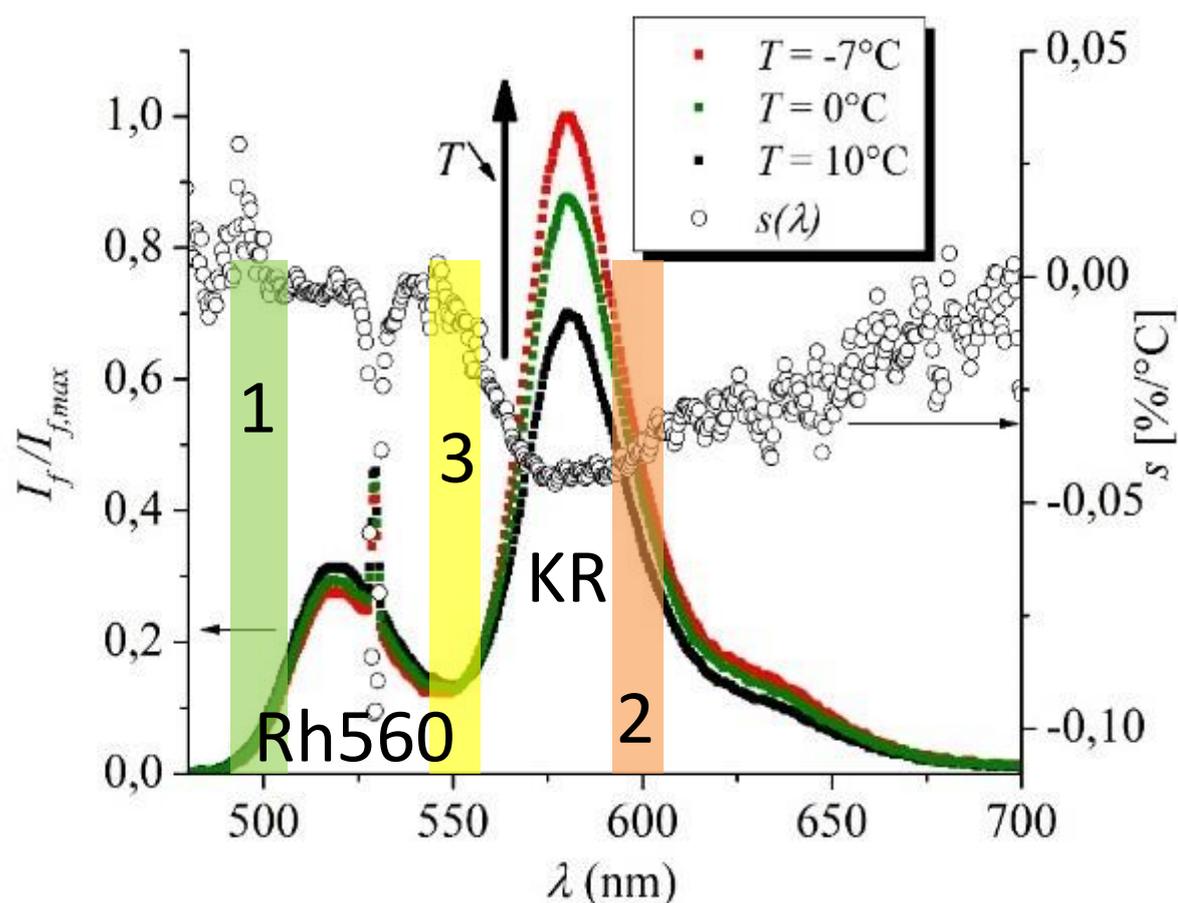
$$R_{12} = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = \frac{C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K_1}{C \cdot V_m \cdot I_0 \cdot K_2} \cdot e^{(s_1 - s_2) \cdot T}$$

- Référence à une température connue T_0 :

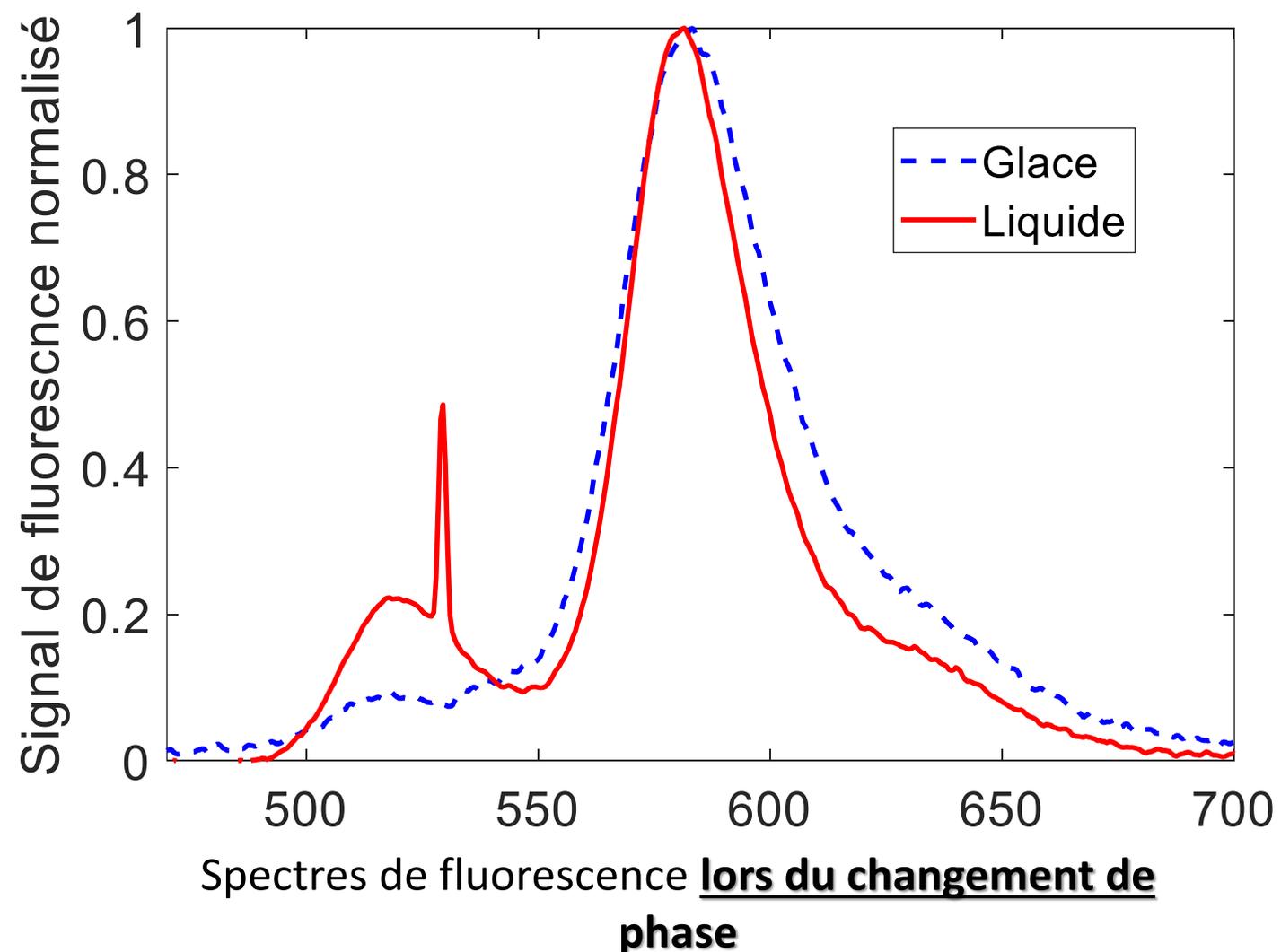
$$\frac{R_{12}(T)}{R_{120}(T_0)} = e^{s_{12}(T - T_0)}$$

I.2 Solution LIF appliquée gouttes surfondues

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



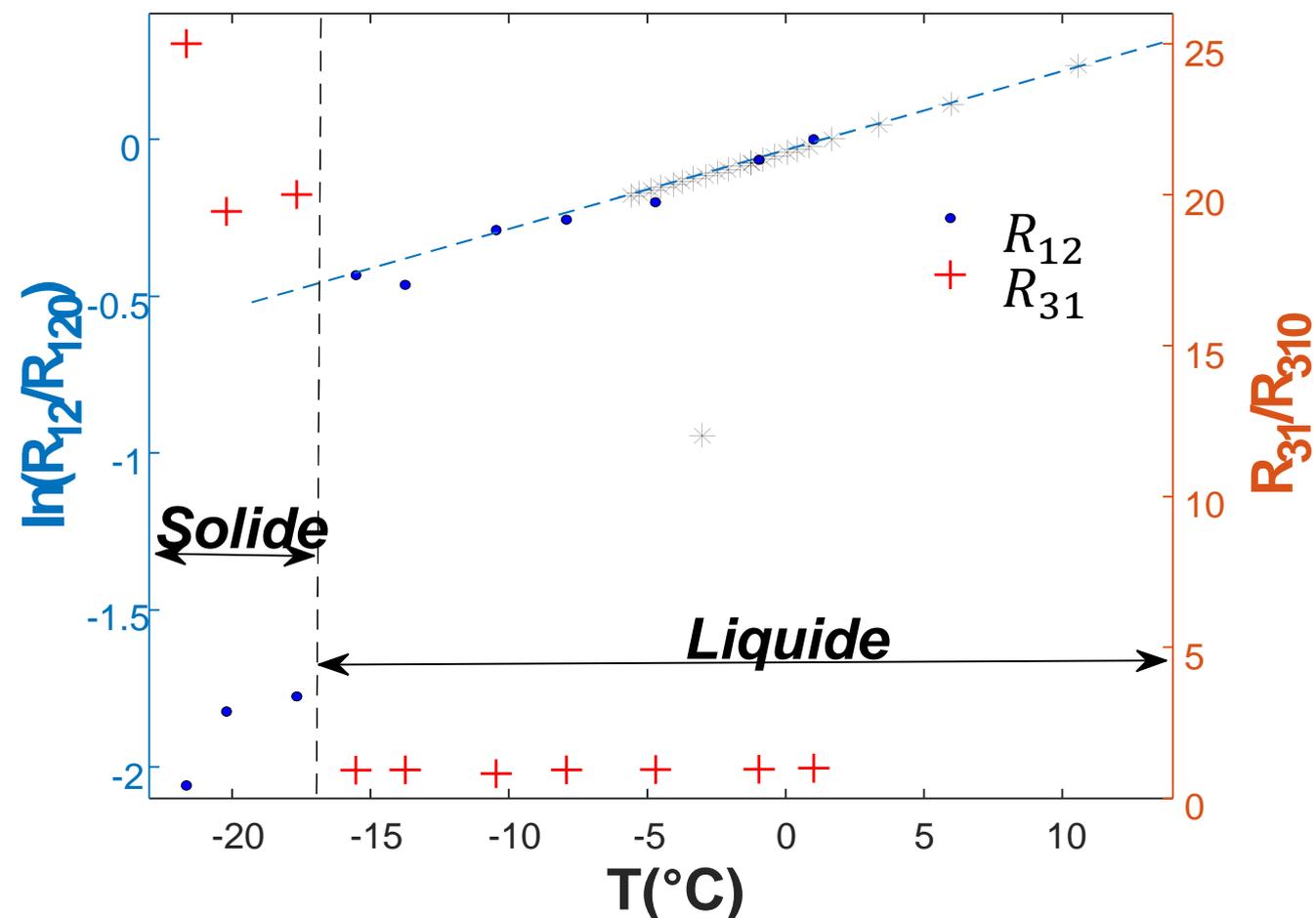
Spectre de fluorescence du mélange pour différentes températures en phase liquide



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

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

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



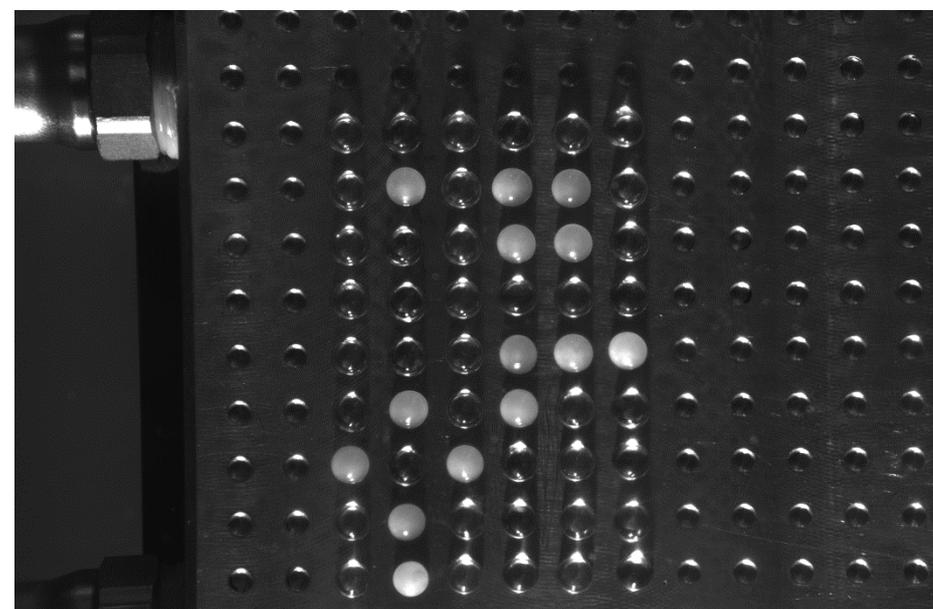
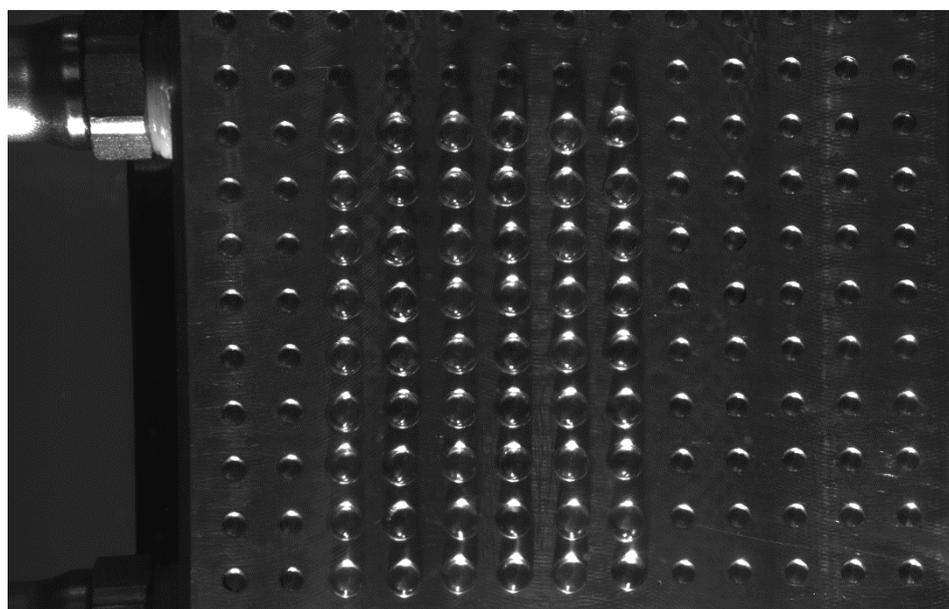
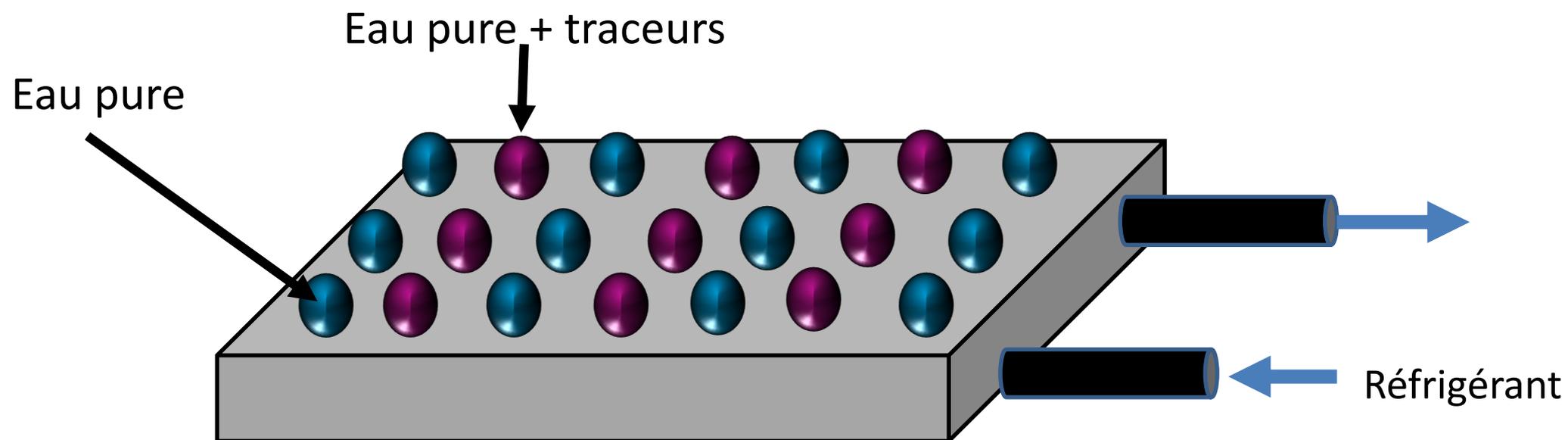
$$s_1 - s_2 = 2.56\%/C$$

Utilisation d'autres techniques :

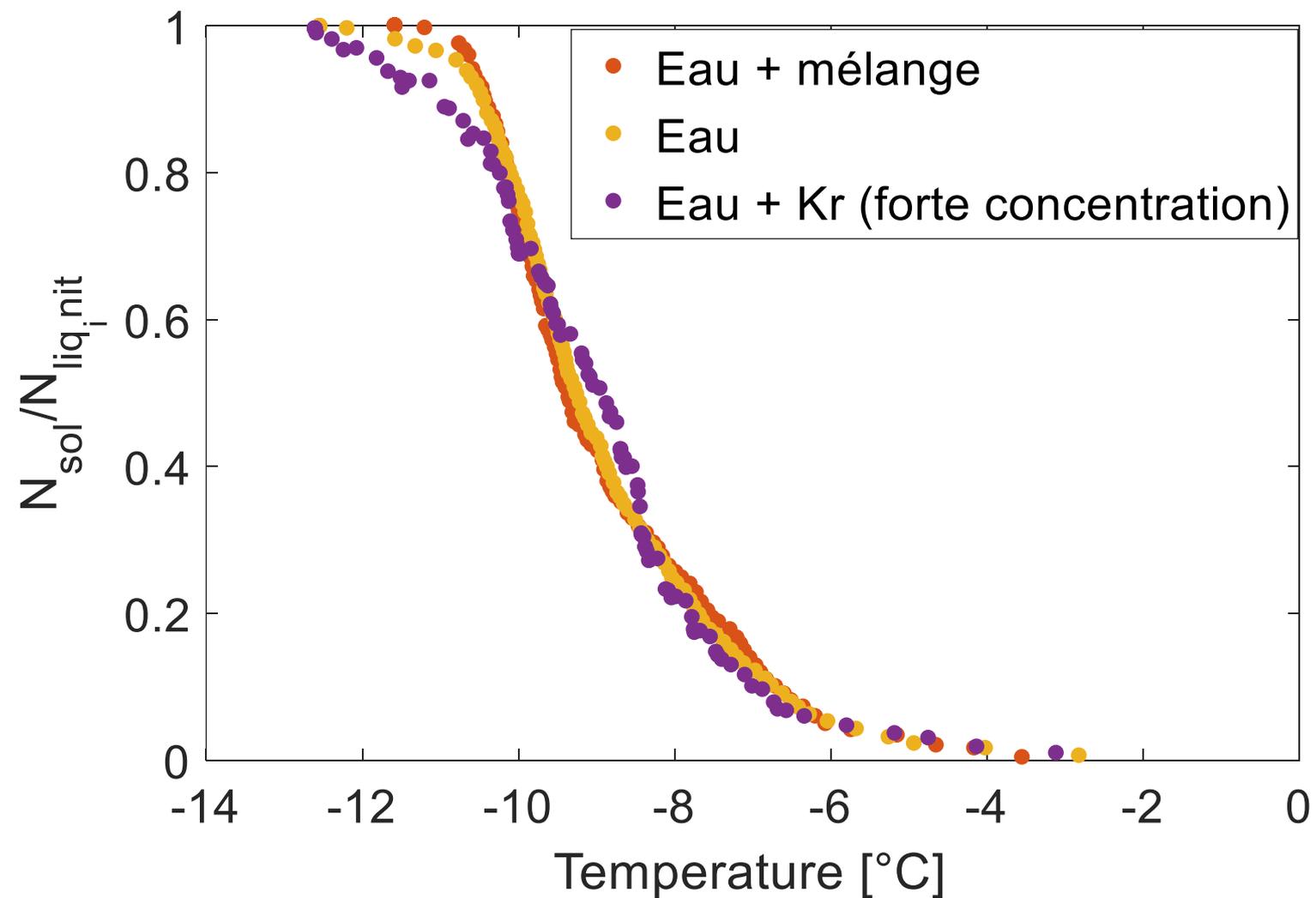
LIF/Raman → Validation sensibilité au changement de phase

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



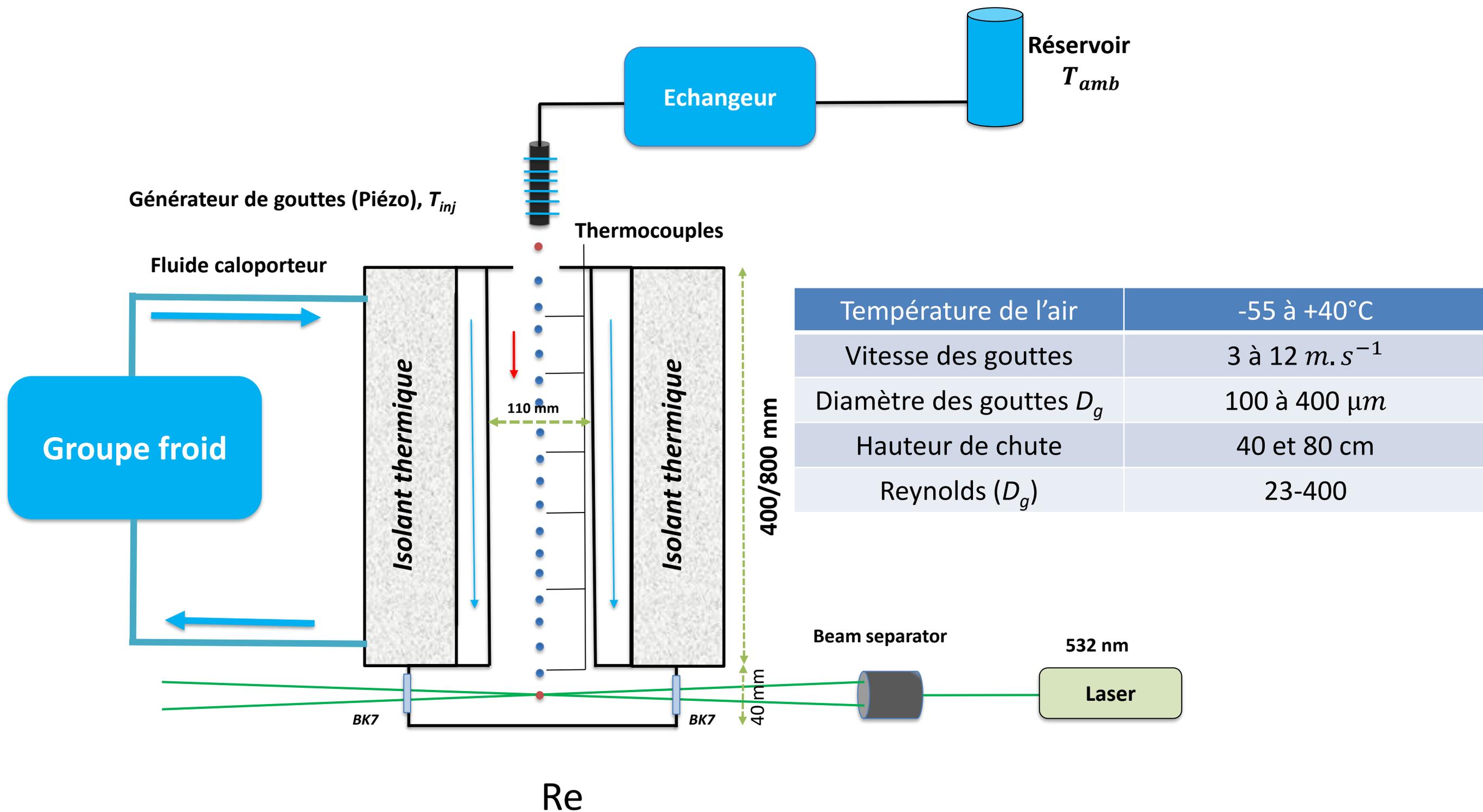
I.4 Influence des traceurs sur la température de solidification de l'eau



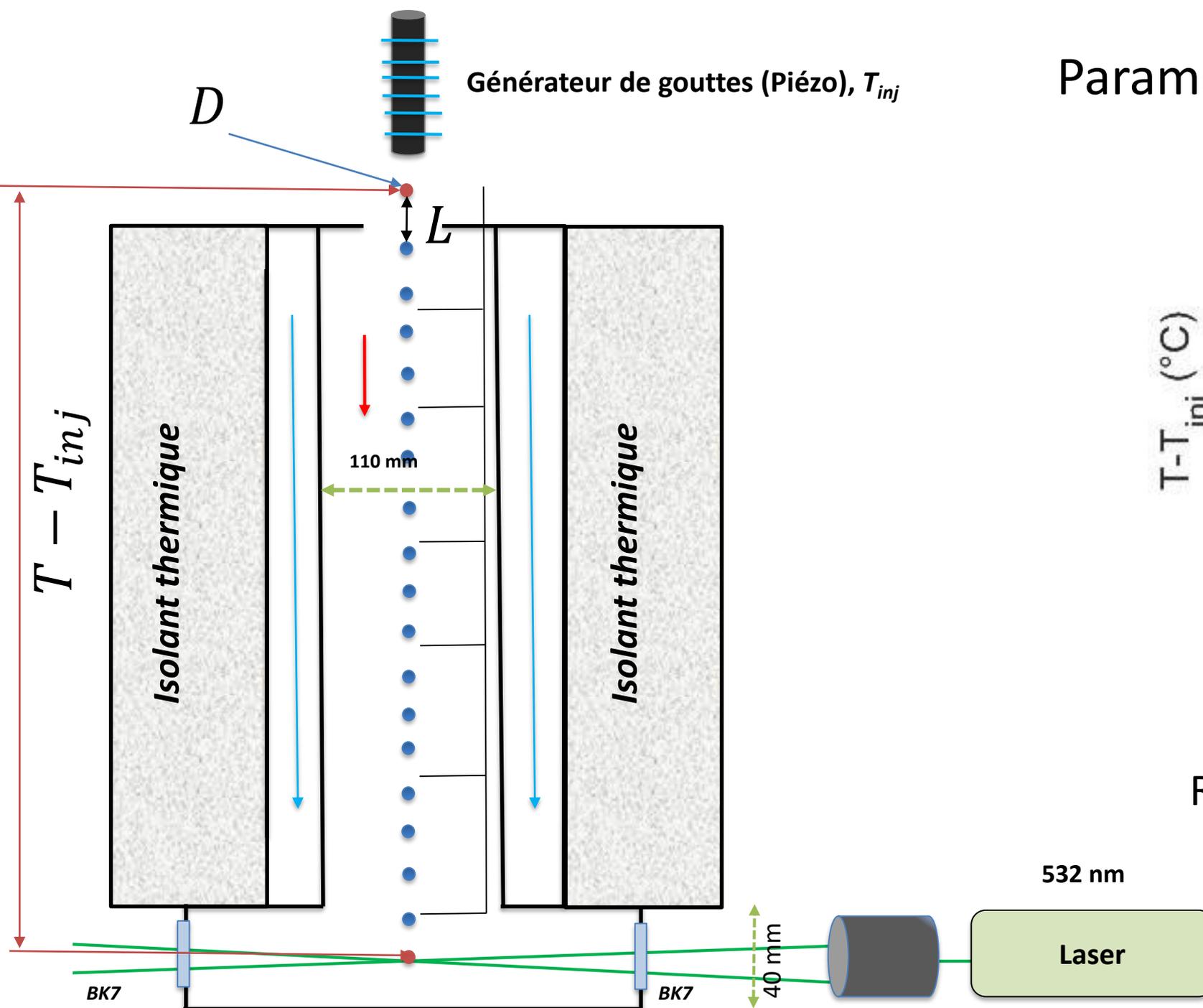
Evolution du rapport *nombre gouttes gelées sur nombre de gouttes initiales* en fonction de la température de surface

➤ Influence des traceurs négligeable

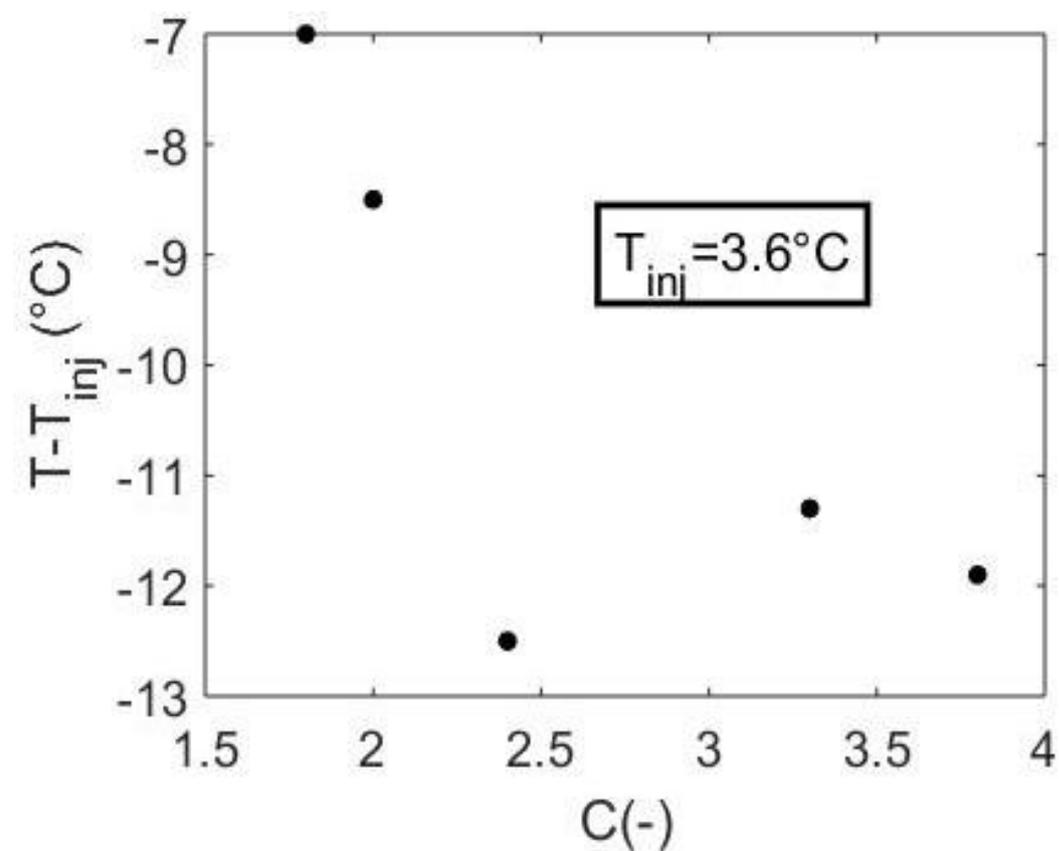
I.5 Etude échelle laboratoire



➤ Principaux résultats

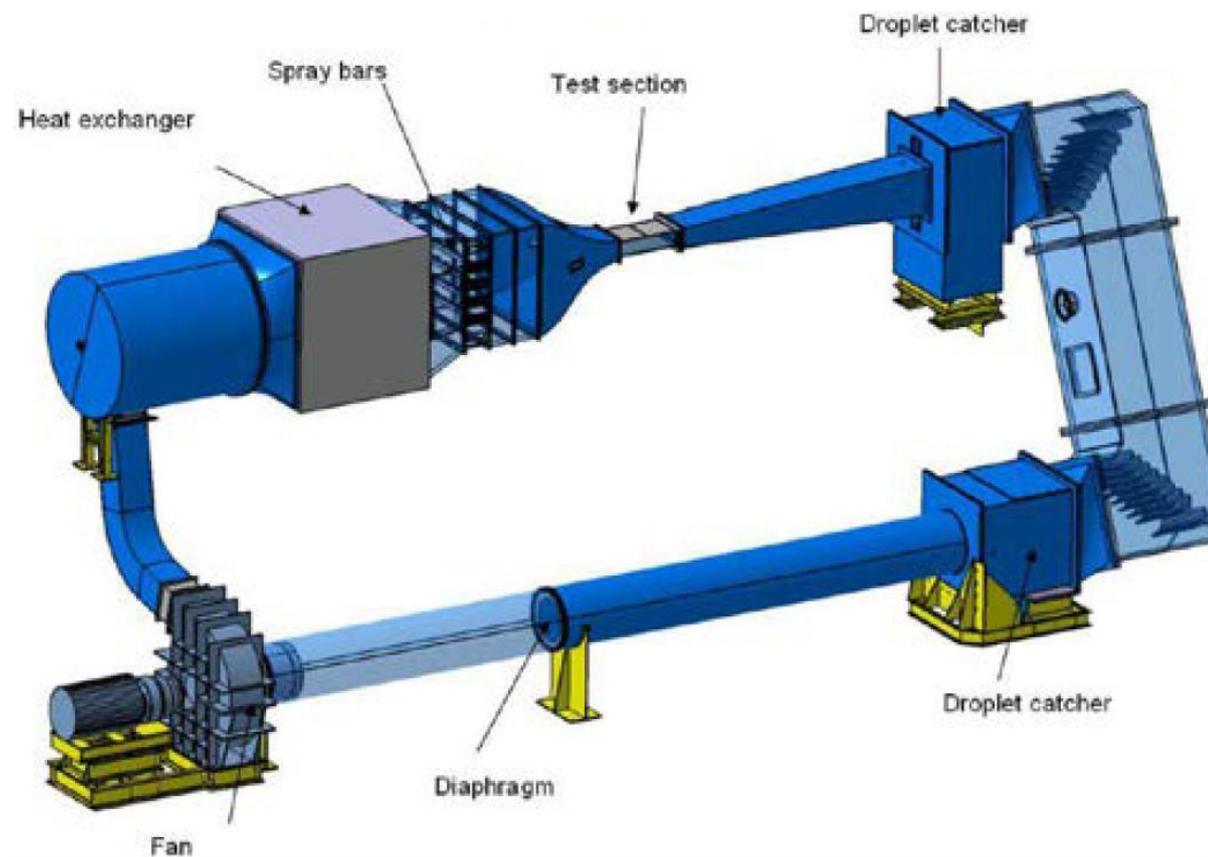


Paramètre de distance : $C = \frac{L}{D_g}$



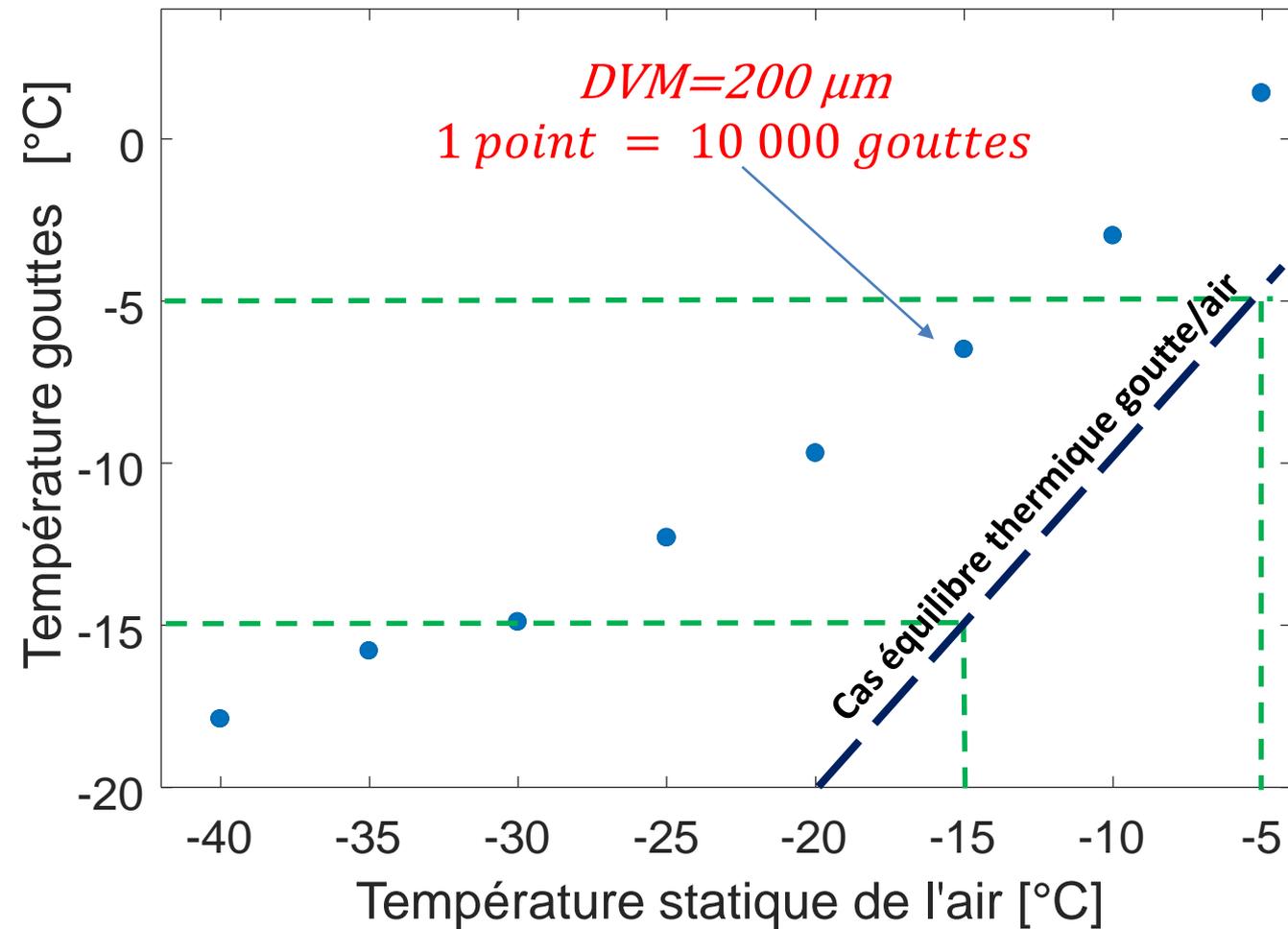
Refroidissement goutte $D_g = 250 \mu\text{m}$ en fonction du paramètre de distance C

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



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

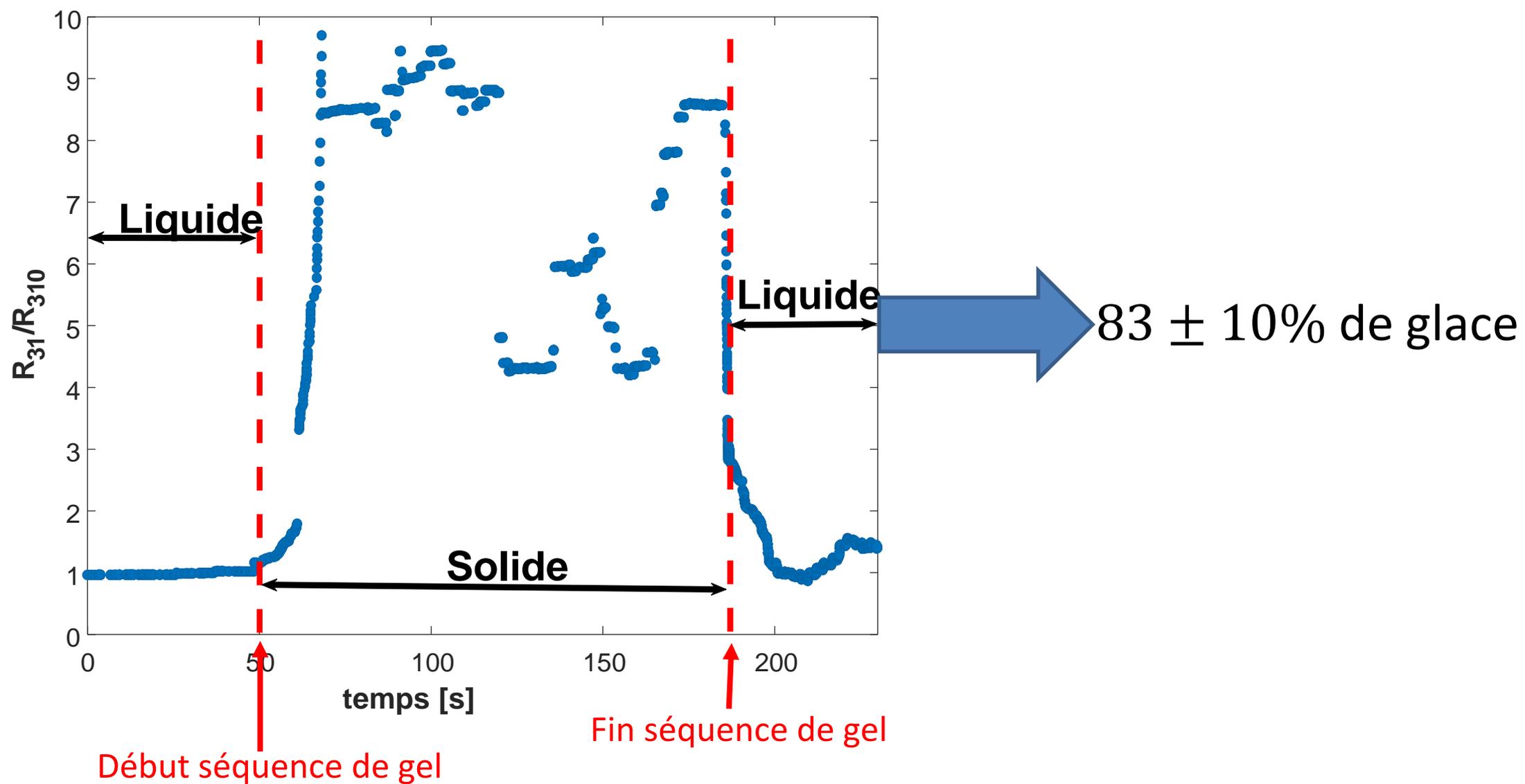
➤ Principaux résultats



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

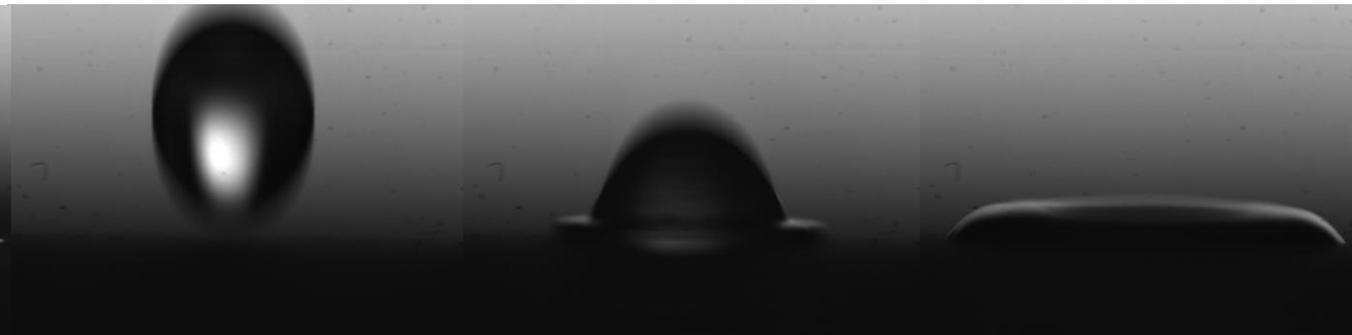


Impact sur aluminium

t=0 ms

t=1 ms

t=5,5 ms



t=10 ms

t=18 ms

t=2200 ms

