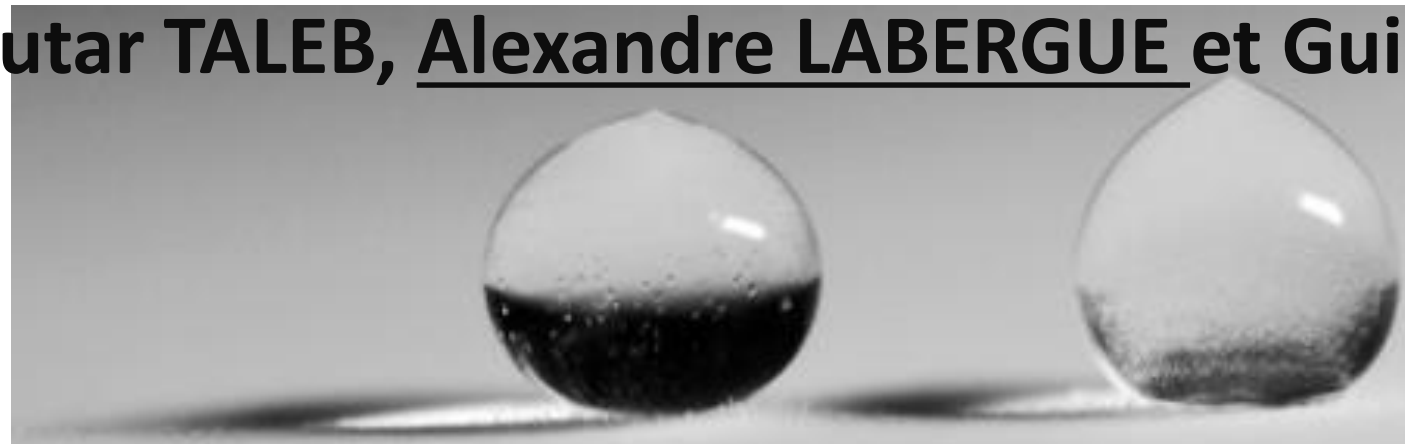


# Focus sur les activités liées au givrage

**Mehdi STITI, Kaoutar TALEB, Alexandre LABERGUE et Guillaume CASTANET**



**Université de Lorraine, CNRS, LEMTA, Nancy, France**

# Introduction et positionnement

Problème n°1:

*givrage*

Solidification de gouttes sur paroi sous-refroidies

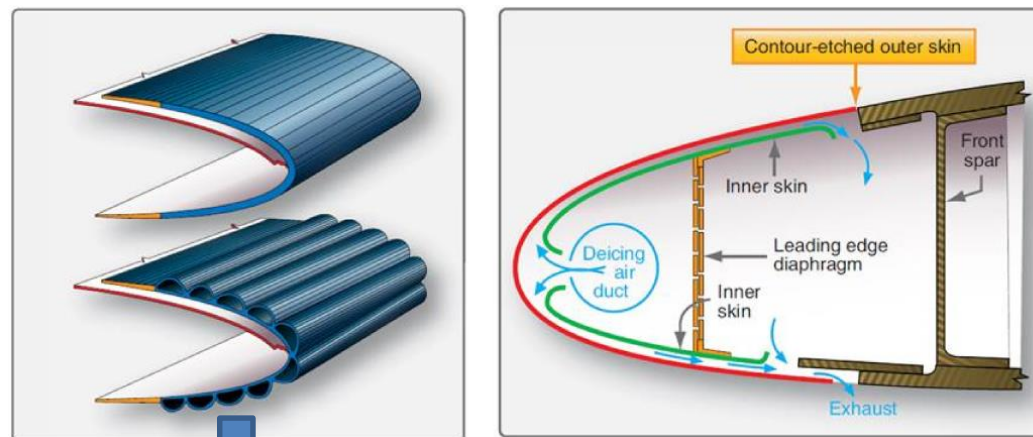


- 👉 Projet NUAGE (ANR/ASTRID; 2015-2019)
- 👉 Thèse de M. Stiti (novembre 2020)

Problème n°2:

*dé/anti-givrage*

Systemes de protection



- 👉 Projet VERGLAS (ANR/ASTRID; 2021-2024)
- 👉 Thèse de K. Taleb (début oct. 2022)

# Introduction et positionnement

Problème n°1:

*givrage*

**Solidification de gouttes  
sur paroi sous-refroidies**

Objectif :

Caractériser l'évolution du front de solidification  
*à l'intérieur* d'une goutte

Problème n°2:

*dé/anti-givrage*

**Systèmes de protection**

Objectif :

Caractériser les transferts de chaleur et de  
masse mettant en œuvre un actionneur plasma

# Introduction et positionnement

Problème n°1:

*givrage*

**Solidification de gouttes  
sur paroi sous-refroidies**

Problème n°2:

*dé/anti-givrage*

**Systèmes de protection**

Méthode :

Développement de diagnostics optiques  
pour accéder :

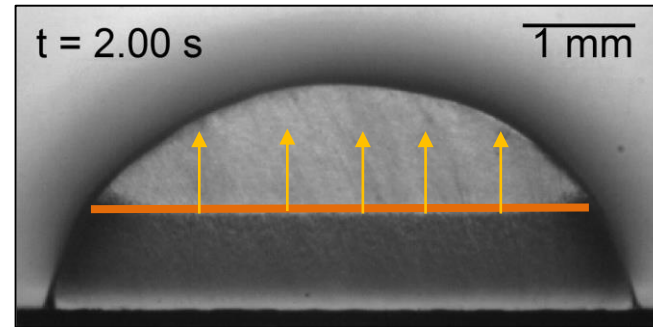
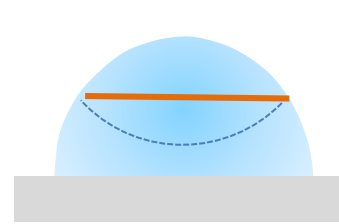
- Changement de phase solide/liquide
- Température phase liquide (et solide?)
- Flux de chaleur pariétaux

⇒ *Techniques de fluorescence Induite (LIF)  
par Laser et de thermographie IR (TIR)*

## **PARTIE 1**

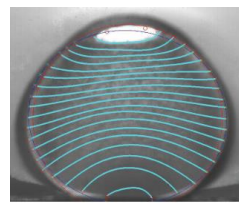
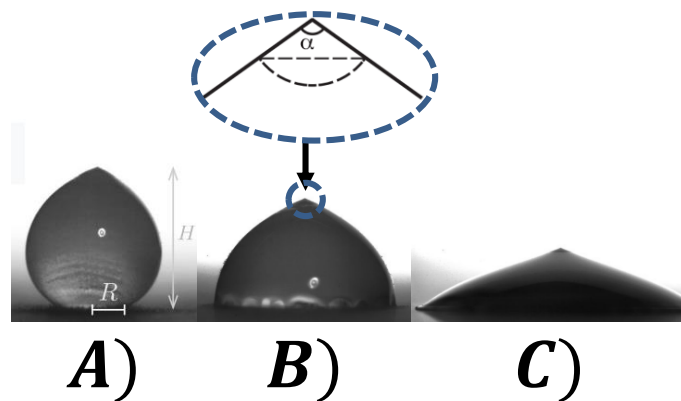
***Evolution du front de solidification d'une goutte par  
Fluorescence Induite par Laser***

## ☐ Ombroscopie



☞ Accès au contour externe du front ou tri-jonction liquide/solide/air

## ☐ Cellule de Hel-Shaw

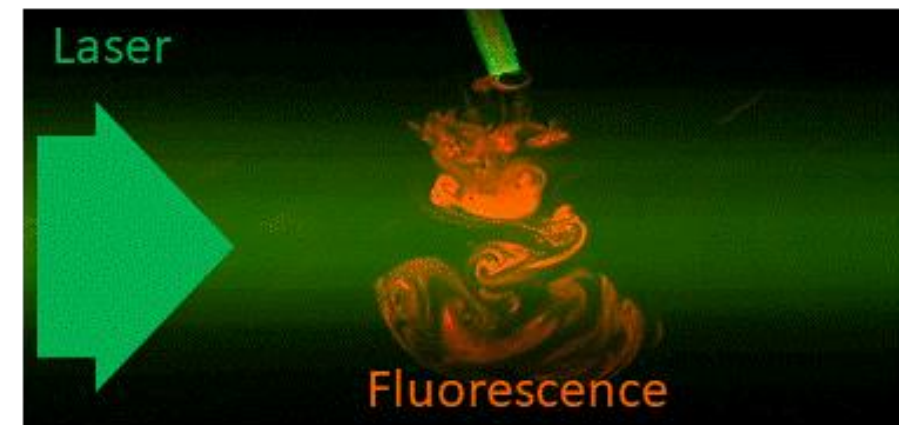
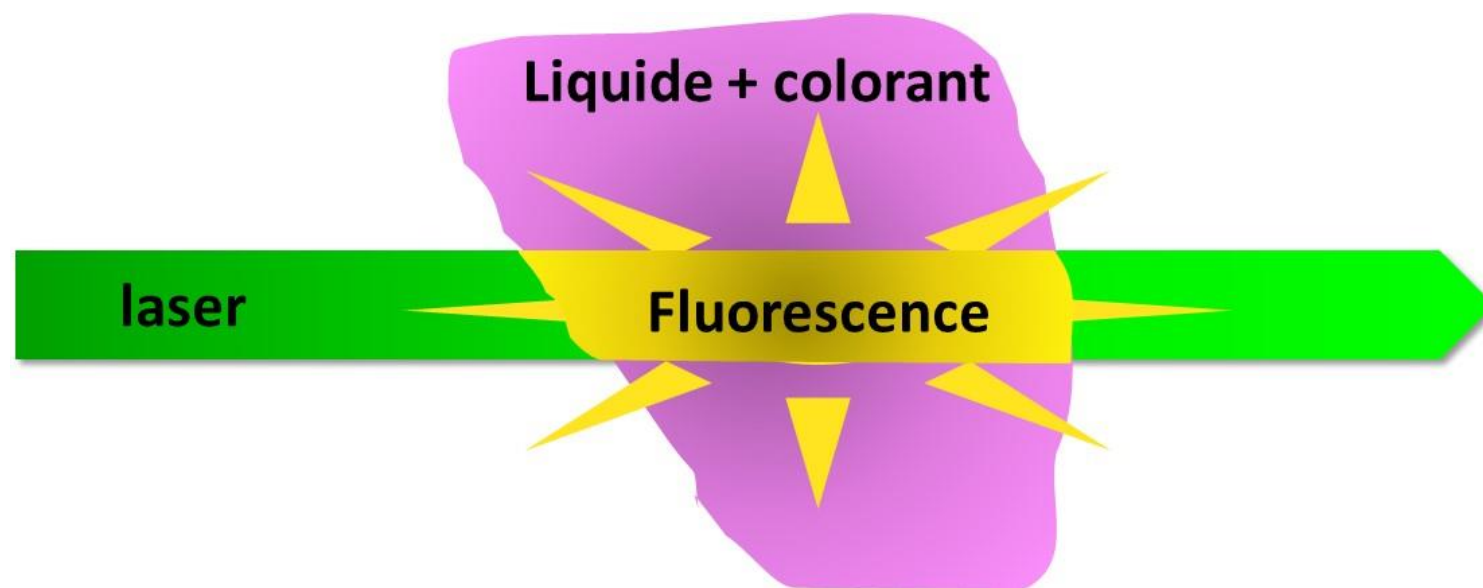


☞ Front sphérique mais technique intrusive

Marin et al. Physical Review Letters, 2014

⇒ Nécessité de la mise en place d'une métrologie non intrusive permettant de mesurer l'évolution de la géométrie du front de solidification à l'intérieur d'une goutte

## Utilisation de l'imagerie LIF (PLIF)

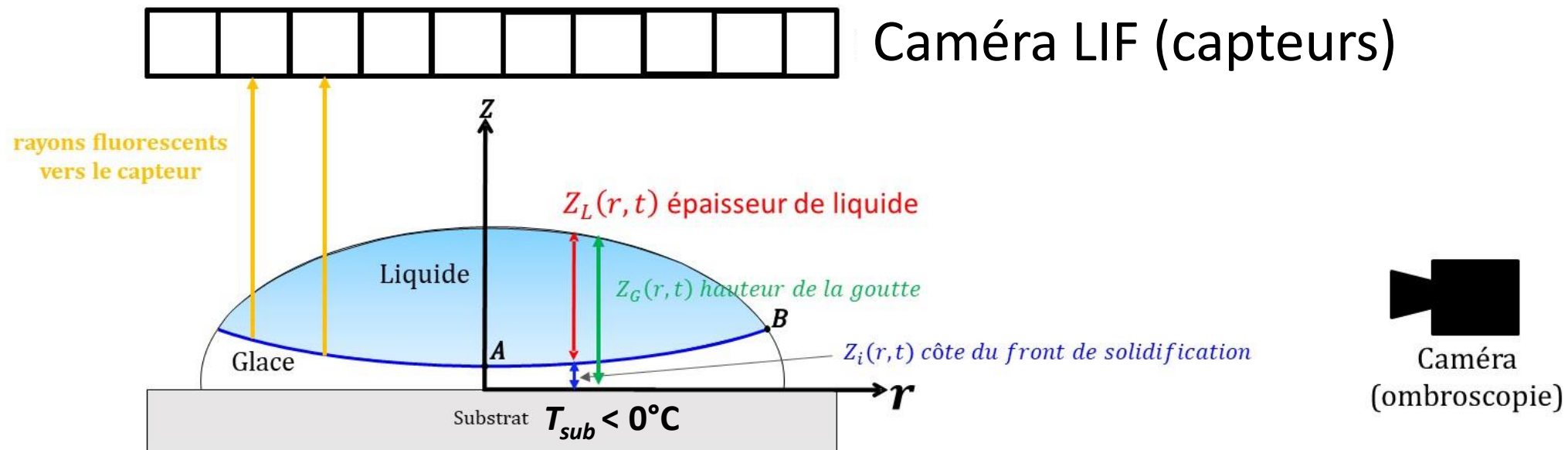


☞ Signal de fluorescent proportionnel au volume de liquide éclairé et glace émet très peu de signal (*Stiti et al, Exp. In Fluids, 2019*)

$$I_f(r, t) = K_{opt} \phi \epsilon c I_0(x, y) V_L$$

**⇒ Application de la PLIF au changement de phase liquide/solide**

## Utilisation de l'imagerie LIF (PLIF)



Signal de fluorescence (caméra rapide LIF):

$$\longrightarrow I_f(r, t) = K_{opt} \phi \epsilon c I_0(x, y) Z_L(r, t)$$

Ombroscopie (seconde caméra rapide):

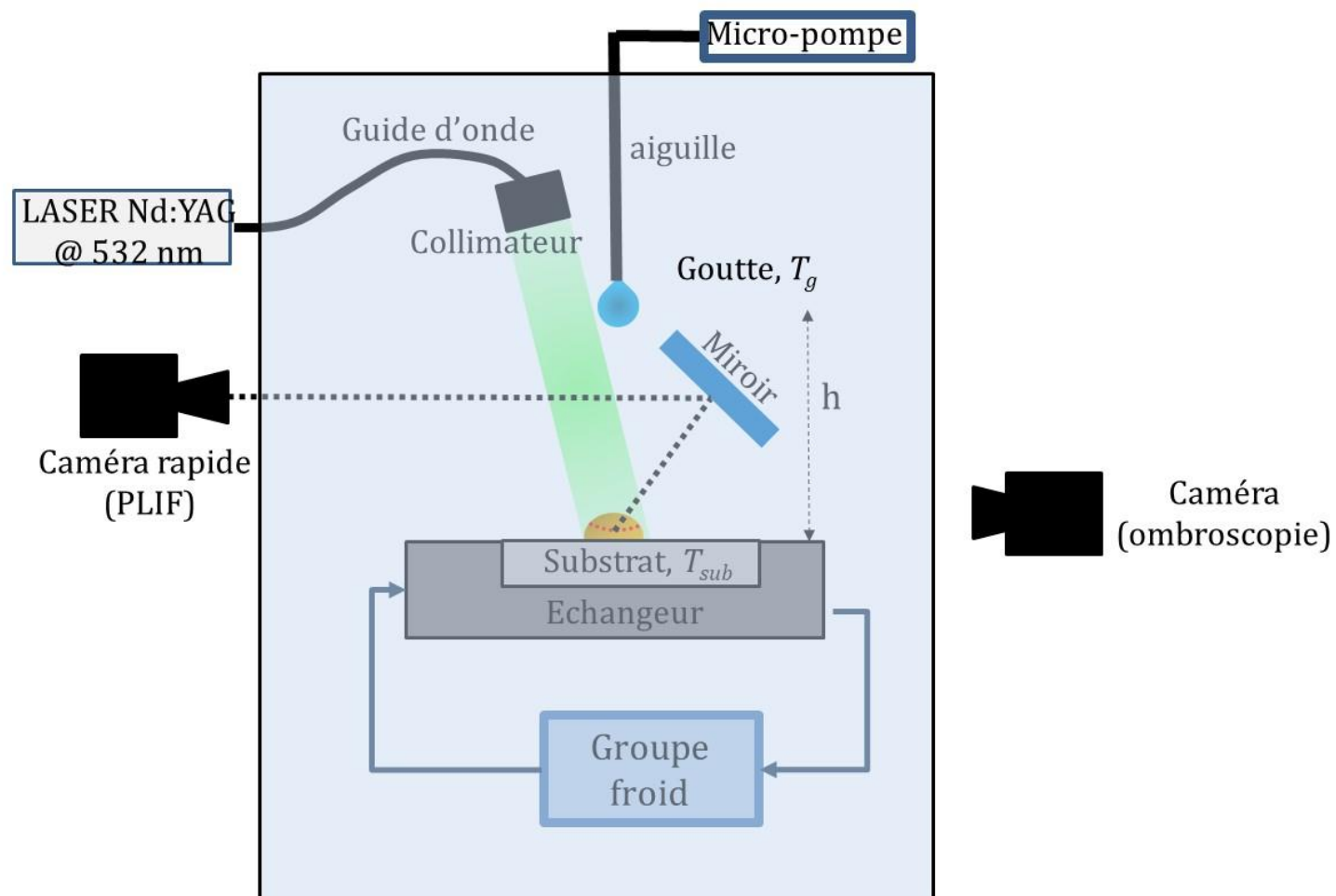
$$\longrightarrow Z_G(r, t)$$

$$\longrightarrow Z_i(r, t) = Z_g(r, t) - Z_L(r, t)$$

☞ **Prise en compte de la dilatation**



# Dispositif expérimental



Traceur: rhodamine 6G (non sensible à la température)

PLIF rapide: 3000 fps

$T_g \sim 20^\circ\text{C}$

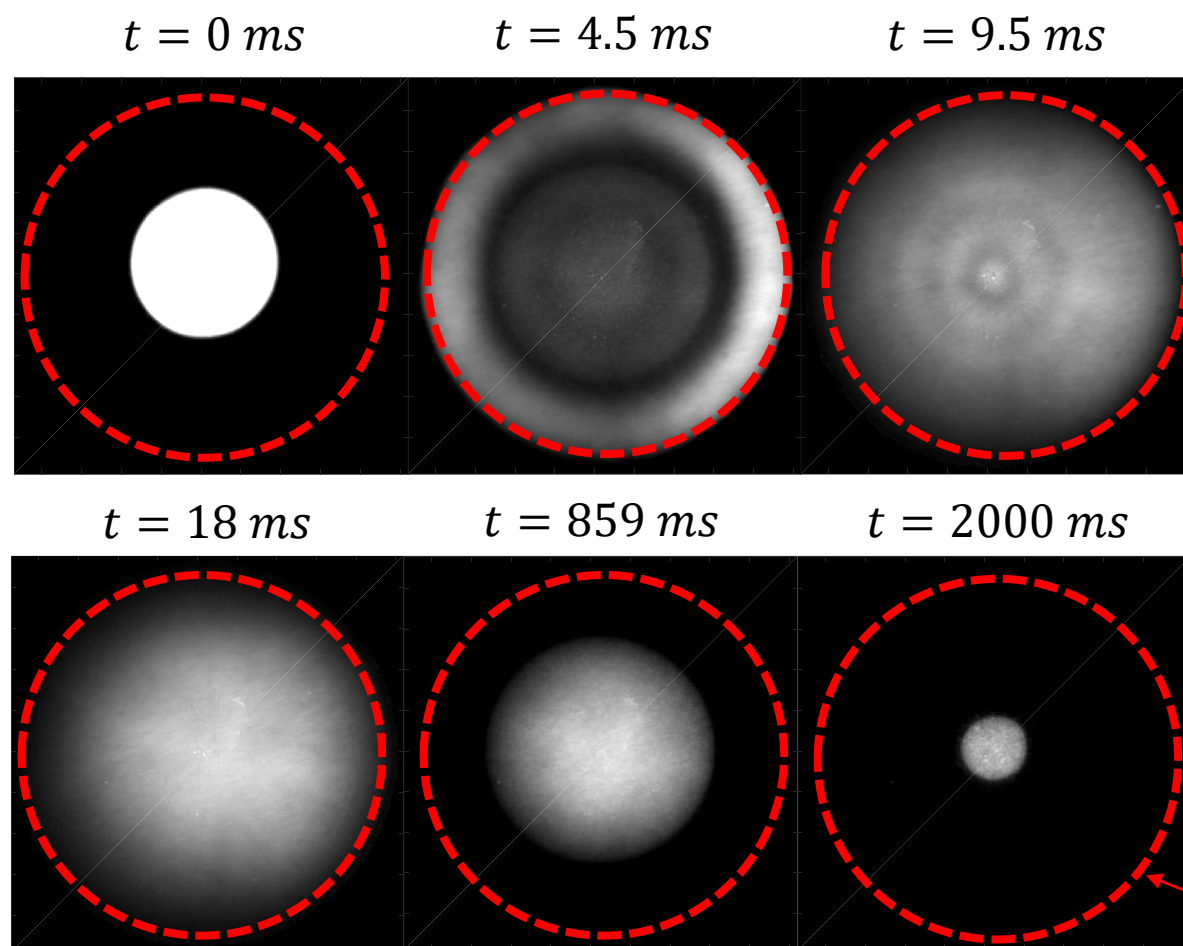
$T_{sub} \text{ mini} \sim -30^\circ\text{C}$

$d_g \sim 2,6 \text{ mm}$

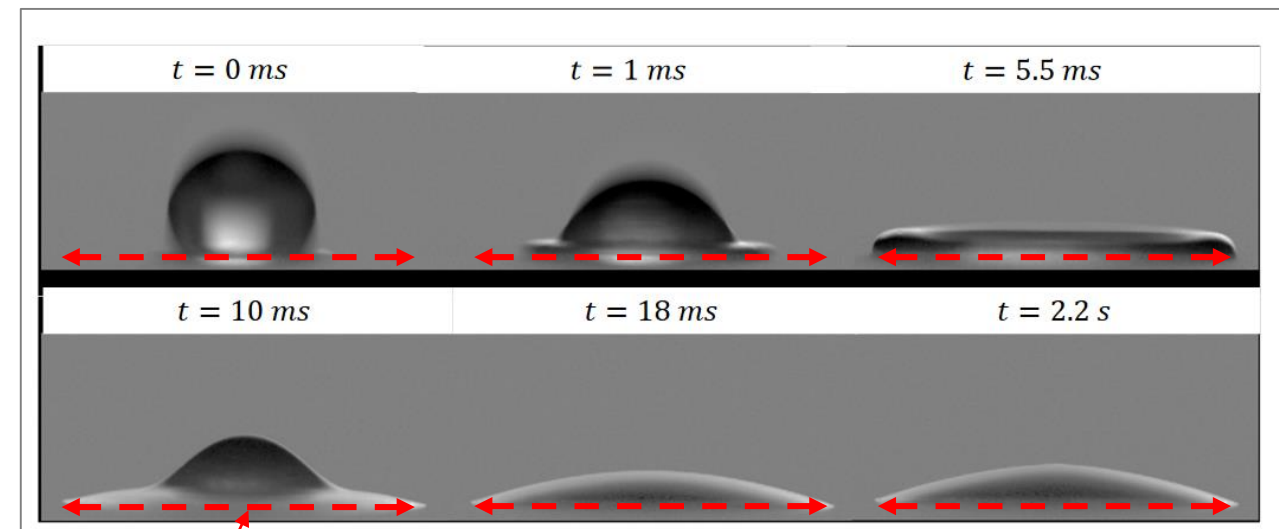
$h \sim 10 \text{ cm} \Rightarrow We \sim 60$

Substrats:  $\varnothing = \sim 2,5 \text{ cm}$ , en duraluminium ou N-BK7

## Exemples typiques d'images PLIF



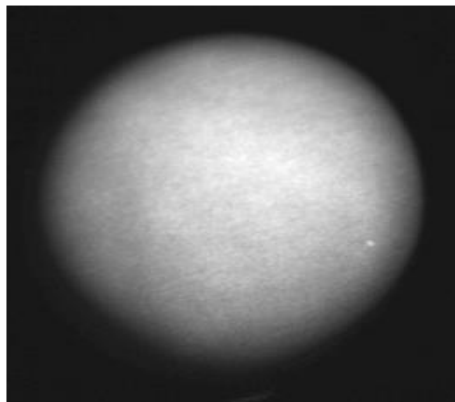
## Ombroscopie



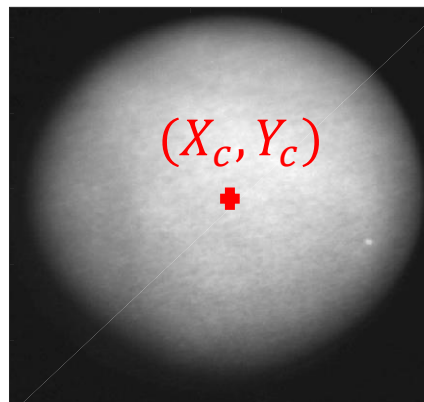
Contour de la goutte avant solidification; diamètre d'étalement max.

# Traitement des images PLIF

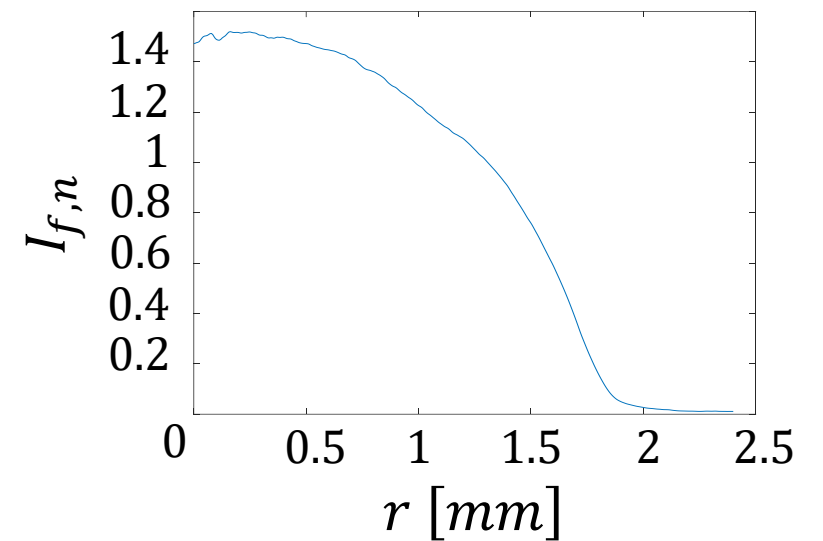
**Etape 1 :** Image distribution laser  $I_0$  (sans goutte)



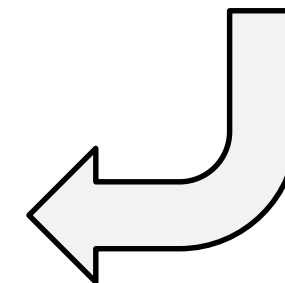
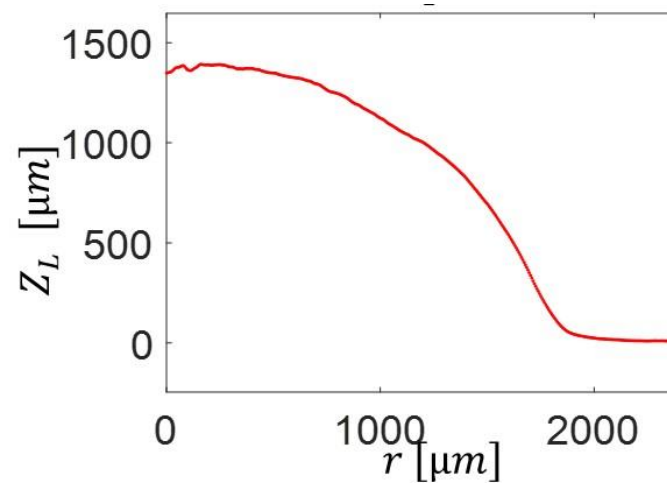
**Etape 2 :** Normalisation par  $I_0$



**Etape 3 :** Moyenne radiale



**Etape 4 :** Conversion en épaisseur absolue

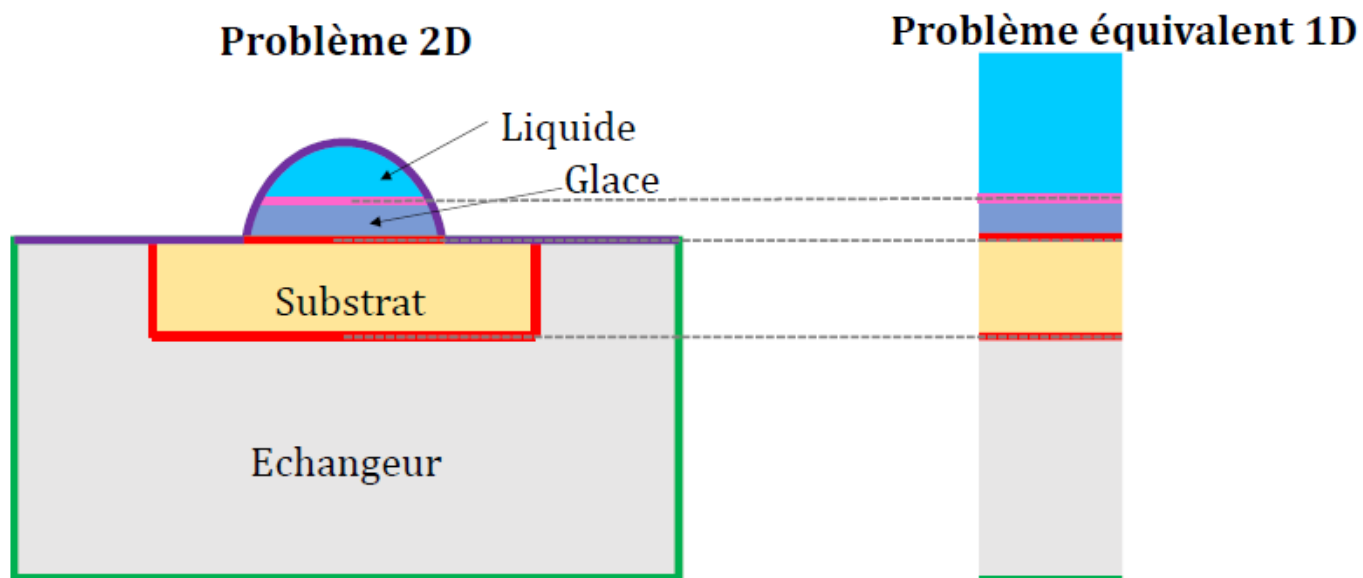


$$S_F = \frac{\int_0^{+\infty} 2\pi r I_{f,n}(r) dr}{V_0}$$

$V_0$ : volume initiale

# Etude numérique

## Résolution 2D du problème de Stefan à deux phases



### Types de conditions aux limites :

- Surface isolée
- Continuité de la température et du flux de chaleur
- Température imposée  $T = T_0$
- Continuité de la température, libération de chaleur latente

### Modèle COMSOL Multiphysics® :

$$\rho C_p \cdot \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \cdot \nabla T)$$

$$C_p = C_{p,solid} \cdot (1 - \mu(T)) + C_{p,liquid} \cdot (\mu(T)) + L_{1 \rightarrow 2} \frac{d\mu}{dT}$$

$$\rho = \rho_{solid} \cdot (1 - \mu(T)) + \rho_{liquid} \cdot (\mu(T))$$

$$k = k_{solid} \cdot (1 - \mu(T)) + k_{liquid} \cdot (\mu(T))$$

Fonction de caractéristique :

$$\mu = 1 \text{ pour } T > T_f$$

$$\mu = 0 \text{ pour } T < T_f$$

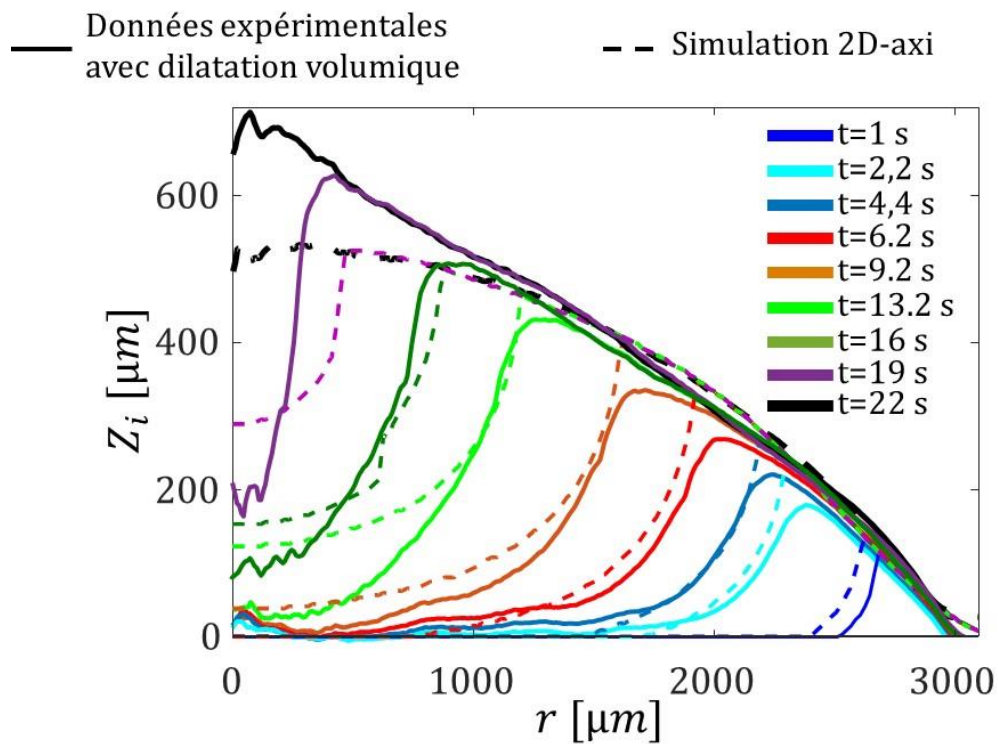
### Limitations :

- Pas de phase mixte  $\rightarrow$  pas de  $0 < \mu < 1$
- Dilatation volumique non modélisée

# Exemples de résultats

## Comparaison N-BK7/Duraluminium

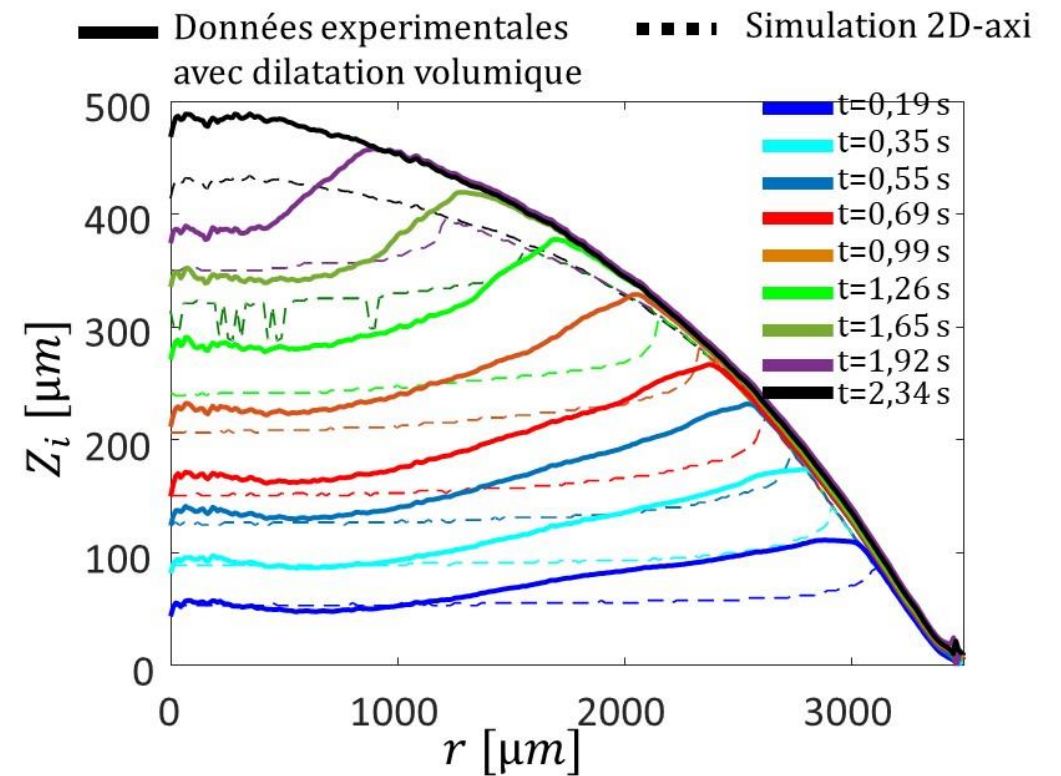
**Impact sur du verre N-BK7**  
*Mauvais conducteur de la chaleur*



$T_g = 18^\circ\text{C}$   
 $T_{sub} = -10^\circ\text{C}$   
 $We = 65$

Stiti et al. IJHMT, 2020

**Impact sur du duralium**  
*Bon conducteur de la chaleur*



## **PARTIE 1**

***Etude des mécanismes de conversion électrothermique d'un actionneur plasma pour le contrôle du givrage***

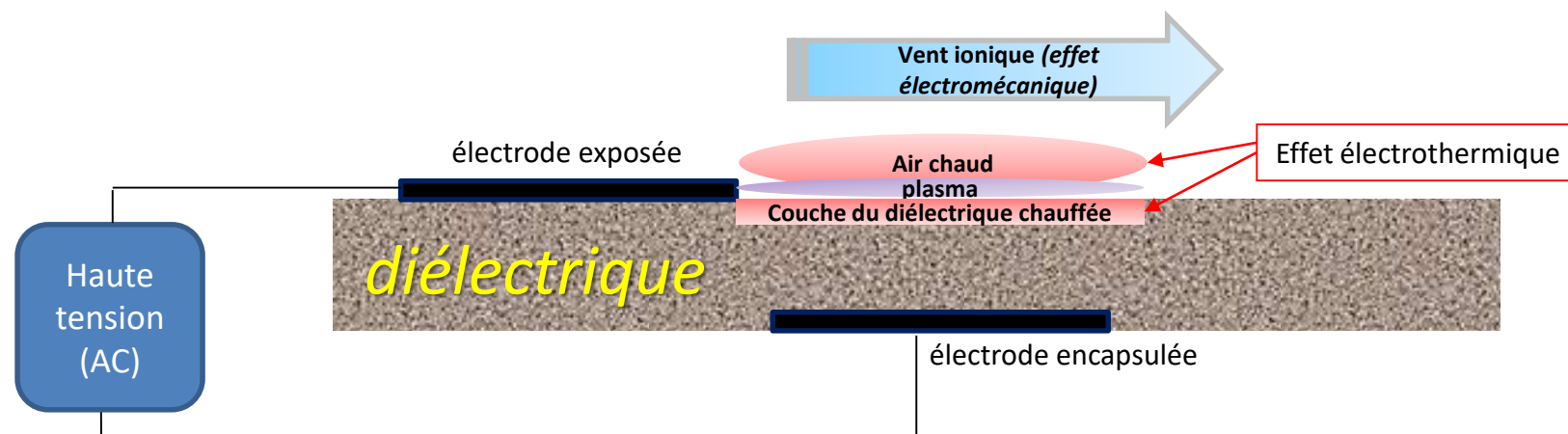
## Objectif du projet VERGLAS

Développement d'un nouveau système de protection contre les risques de givrage en associant deux méthodes/systèmes

- i- Actionneur plasma de type Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) → *sources de chaleur*
- ii- Structuration de surface pour limiter accrétion de glace

⇒ Nécessité d'identifier et caractériser les différents transferts de chaleur et de masse mis en jeu

## Principe de l'actionneur DBD



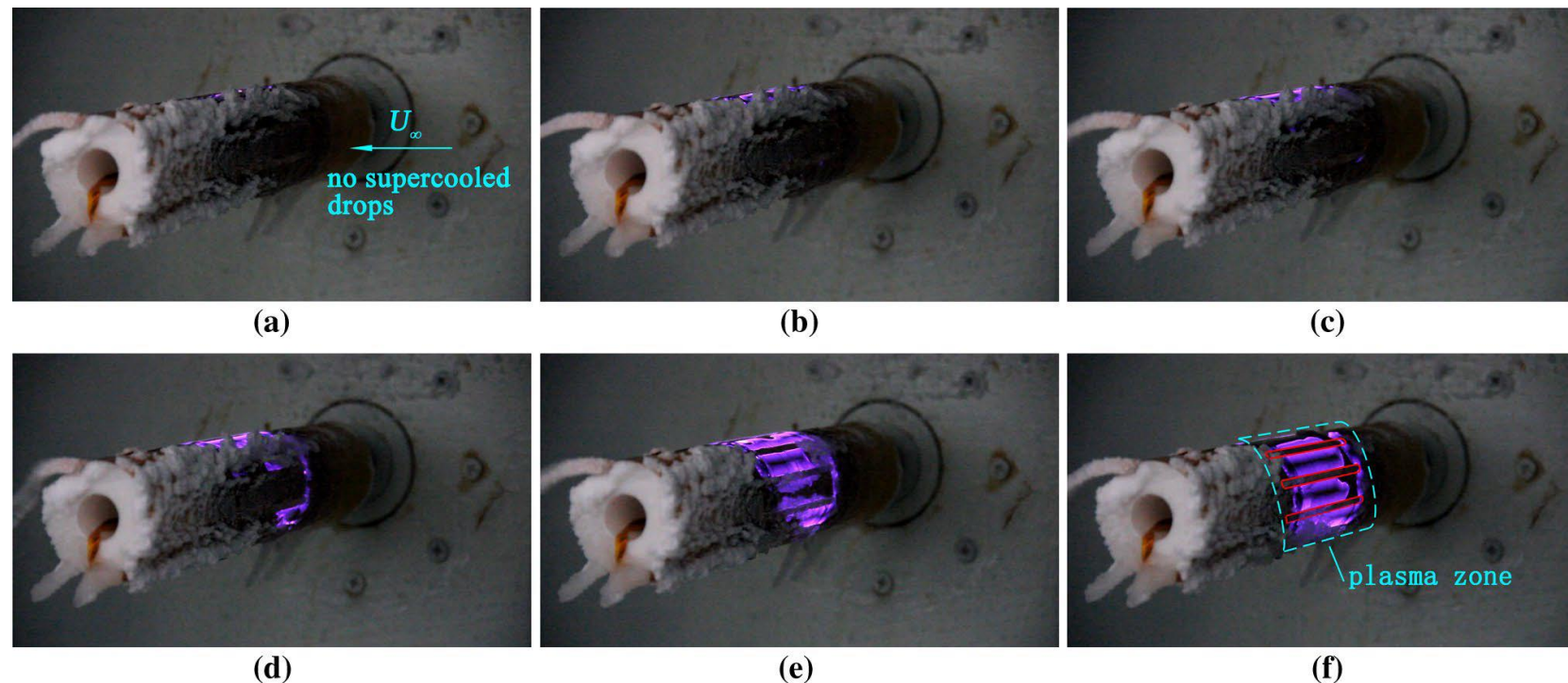
## Objectif du projet VERGLAS

Développement d'un nouveau système de protection contre les risques de givrage en associant deux méthodes/systèmes

- i- Actionneur plasma de type Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) → *sources de chaleur*
- ii- Structuration de surface pour limiter accrétion de glace

⇒ **Nécessité d'identifier et caractériser les différents transferts de chaleur et de masse mis en jeux**

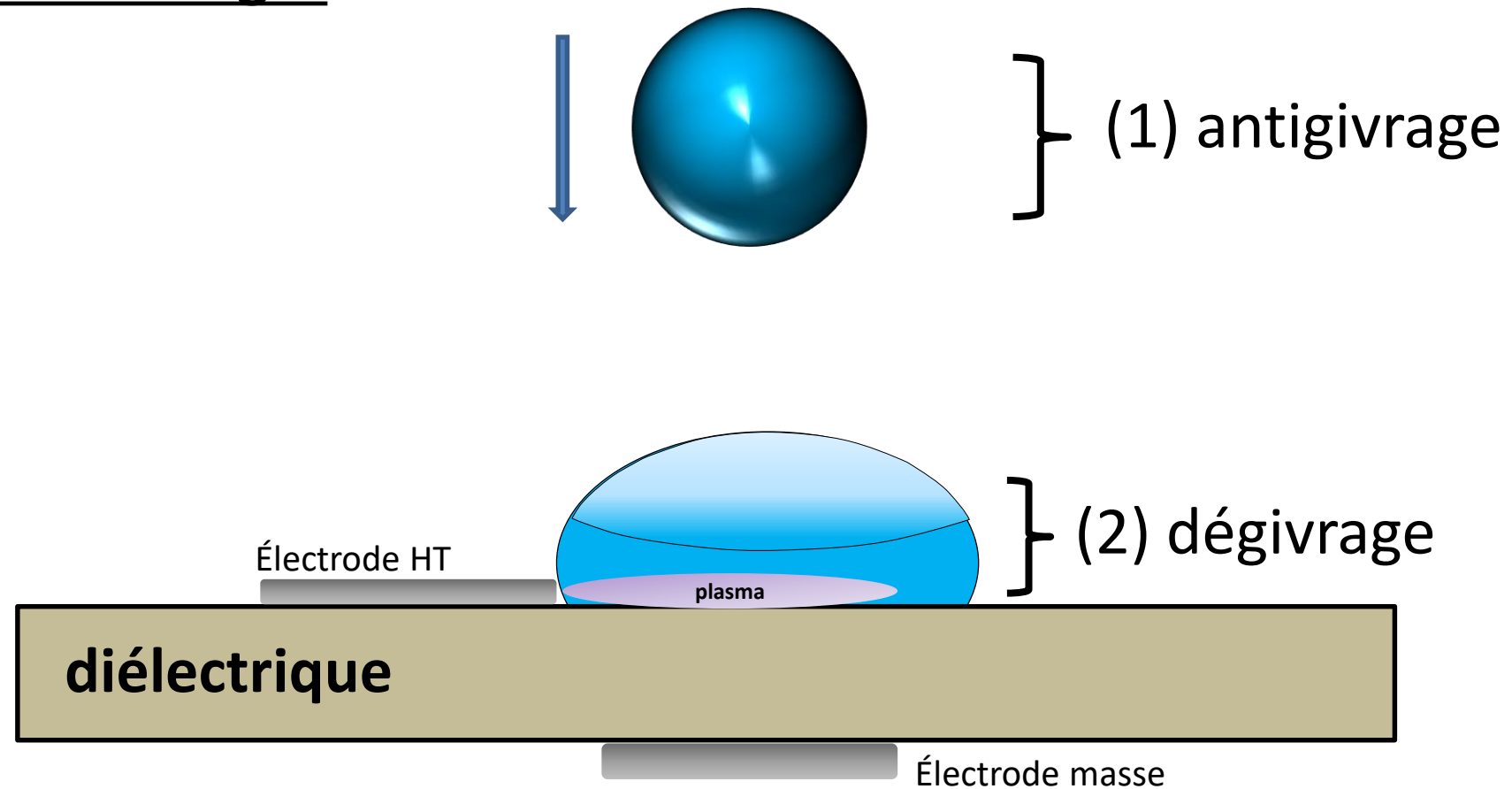
## Principe de l'actionneur DBD



Jinsheng C. et al., Exp Fluids (2017)



## 2 modes d'actions envisagés



### Antigivrage

But rechercher: empêcher accrétion de glace → *impact goutte/paroi*

⇒ durée d'observation ~ ms

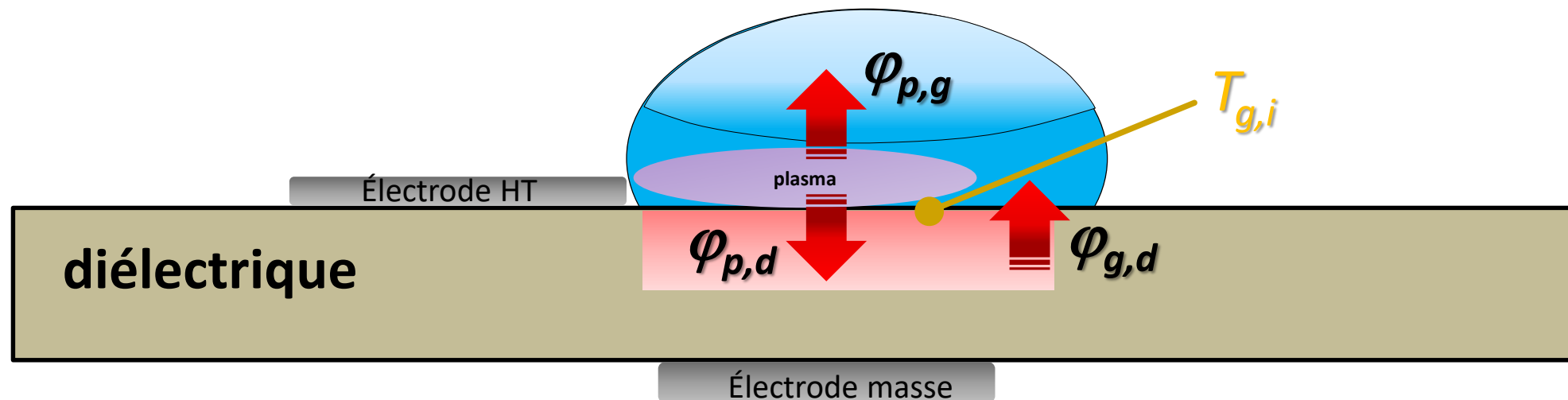
### Dégivrage

But rechercher: supprimer glace → *problème de fusion*

⇒ durée d'observation ~ s

## Première étape du projet

- Expérience de référence avec surface diélectrique non structurée
- Mode dégivrage → *goutte déposée et préalablement solidifiée*



## Techniques de mesures mis en œuvre

- Température phase liquide par thermométrie par LIF2c2d :
  - (1) à l'interface goutte/diélectrique  $T_{g,i}$  ⇒ vue de dessous à travers le diélectrique
  - (2) Ou sur l'épaisseur de la goutte  $T_g$  ⇒ vue de côté
- Flux total à l'interface du diélectrique par  $\varphi_{p,d} + \varphi_{g,d}$  par TIR

Focus sur la LIF2c2d vue de dessous

# Principe de la thermométrie par LIF2c2d

$$I_f = K_{opt} K_{spec} I_0 c V e^{sT}$$

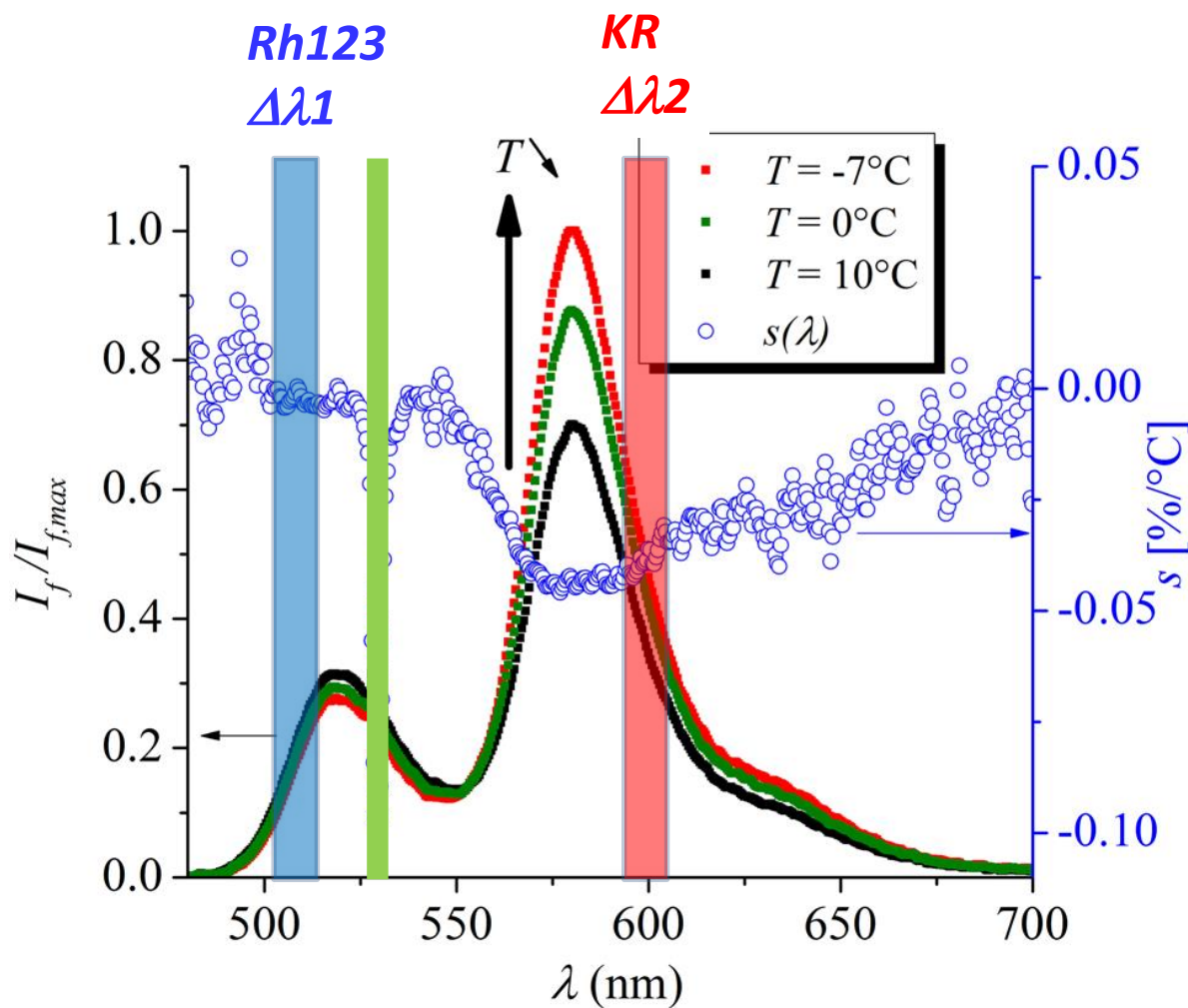
s: sensibilité en température en %/°C

**Colorant 1 (Rh123) et Bande 1,  $\Delta\lambda_1$**

$$I_{f1} = K_{opt1} K_{spec1} I_0 c_1 V e^{s_1 T}$$

**Colorant 2 (KR) et Bande 2,  $\Delta\lambda_2$**

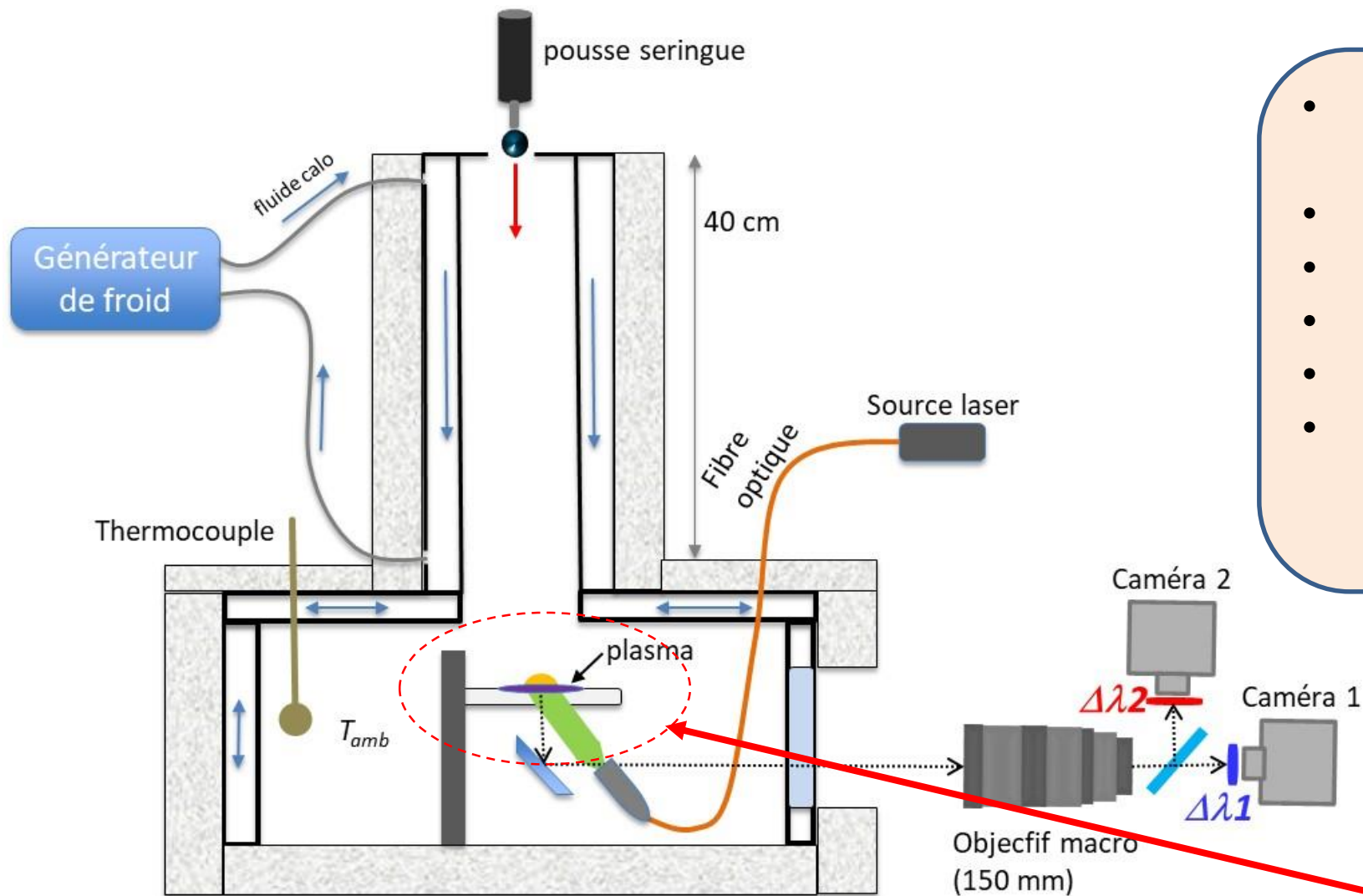
$$I_{f2} = K_{opt2} K_{spec2} I_0 c_2 V e^{s_2 T}$$



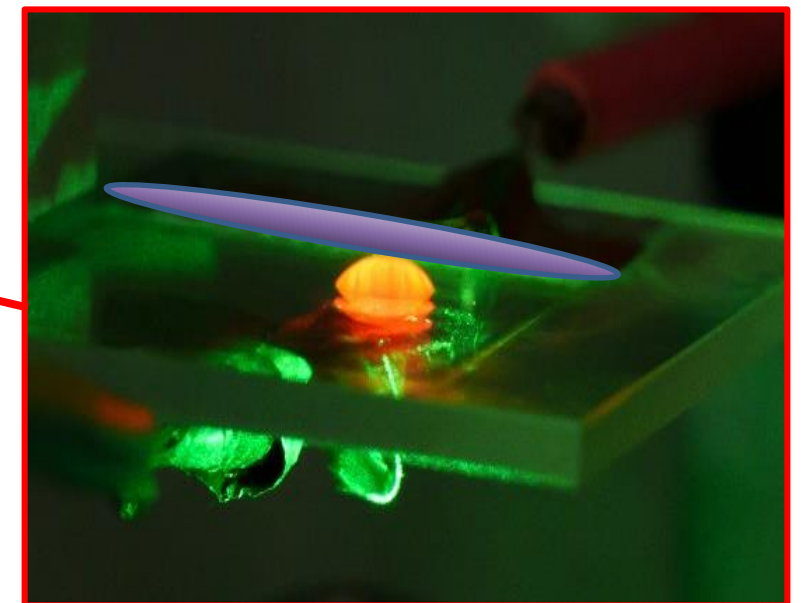
Référence  $R_{f,120}$  à  $T_0$  connue

$$\frac{R_{f,12}}{R_{f,120}} = e^{(s_1 - s_2)(T - T_0)}$$

# Dispositif expérimental

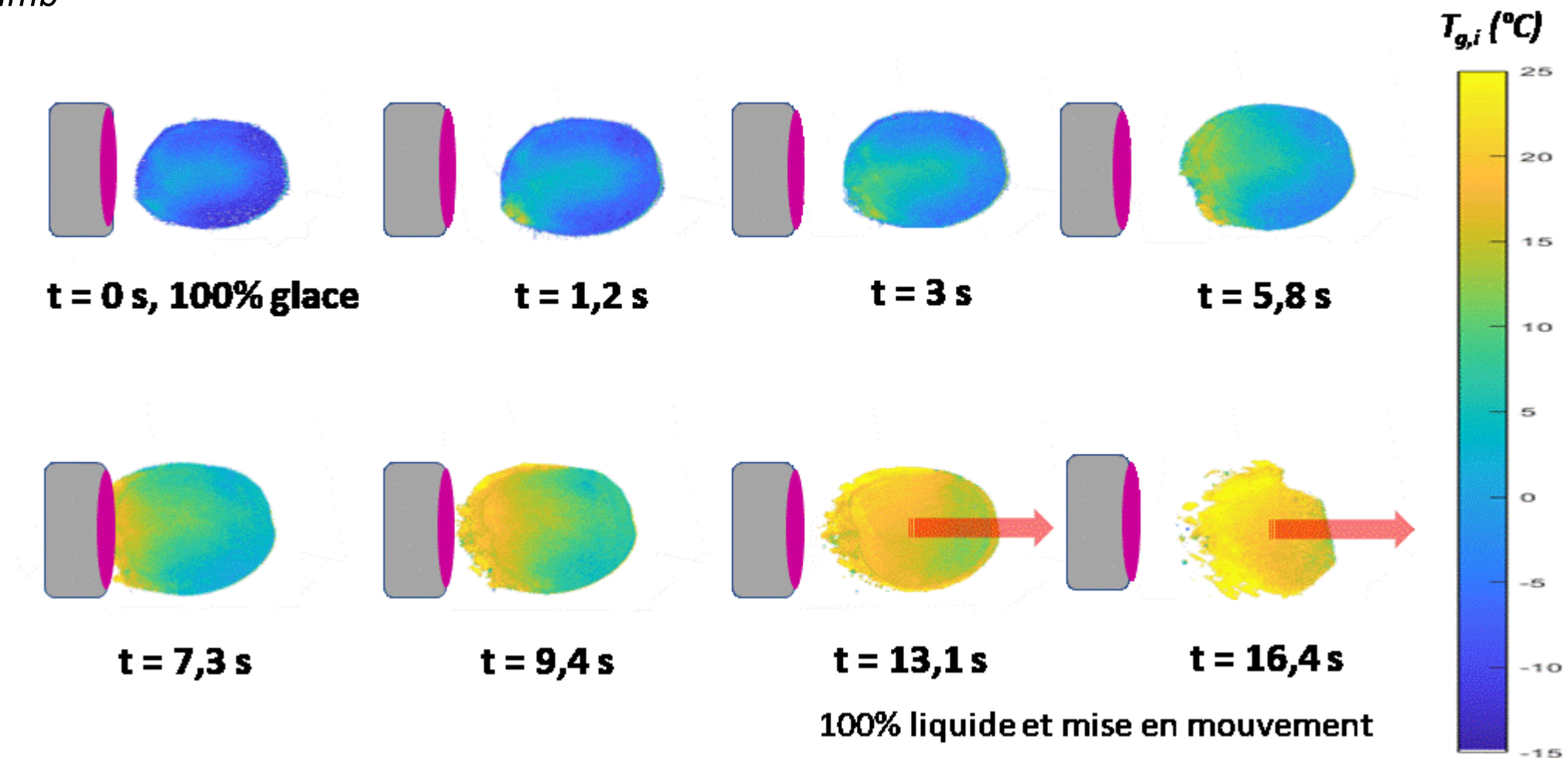


- Caméras 1 et 2 :  
*Hamamatsu, 3 fps (300ms), 500X500 pxl*
- Laser continu 532 nm, 5W max.
- $T_{amb}$  mini  $\sim -30^{\circ}\text{C}$
- $d_g \sim 2,5$  mm avant impact
- Diélectrique *transparent*: carré saphir 2.5 cm
- DBD :  
*Électrode masse en ITO (transparent)*  
 $f = 10$  kHz et Amplitude HT = 7000V



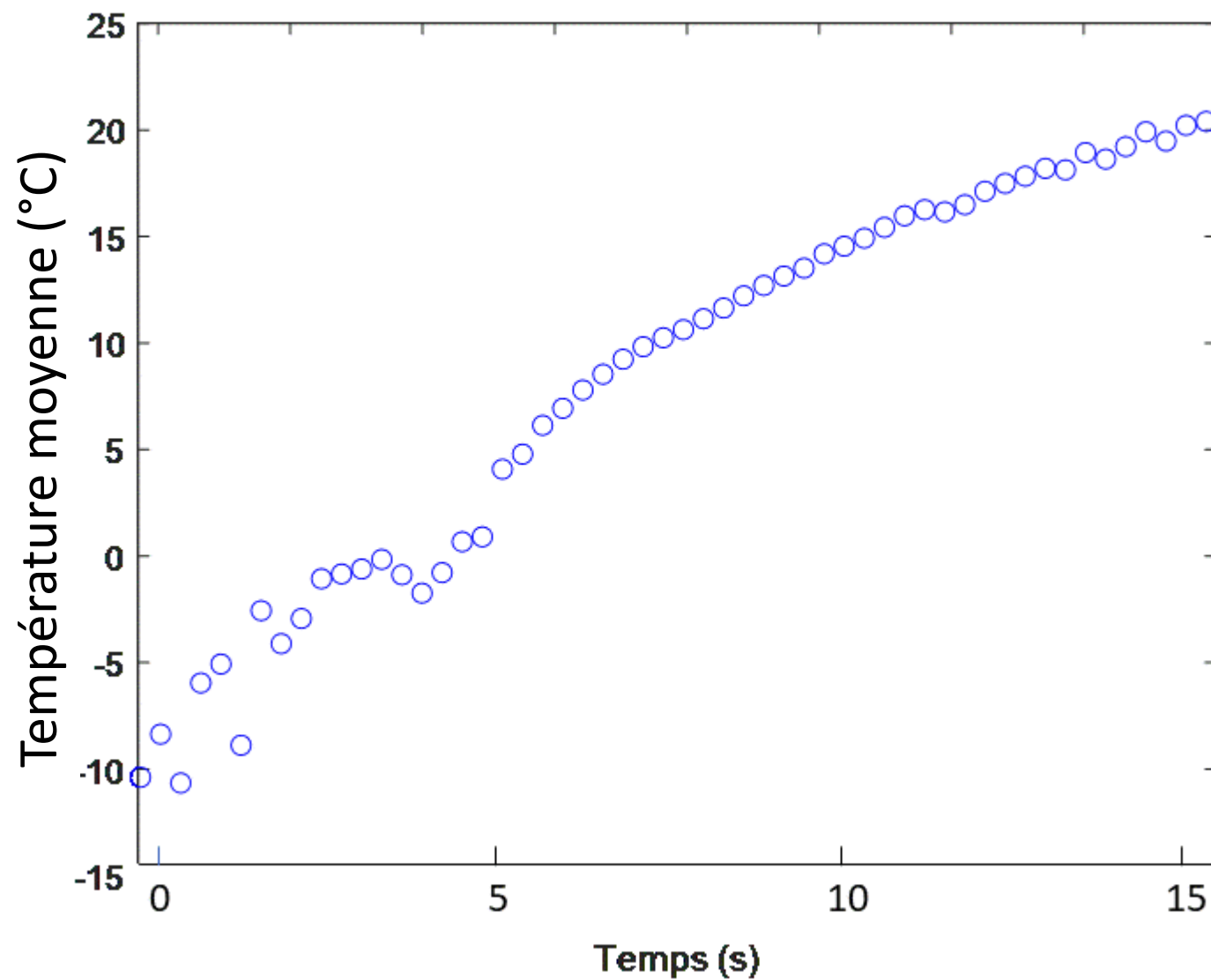
# Premiers résultats

- Vue de dessous, *ie* à travers le substrat
- $T_{amb} = -21,8^{\circ}\text{C}$



## Premiers résultats

- Vue de dessus, *ie* à travers le substrat
- $T_{amb} = -21,8^{\circ}\text{C}$

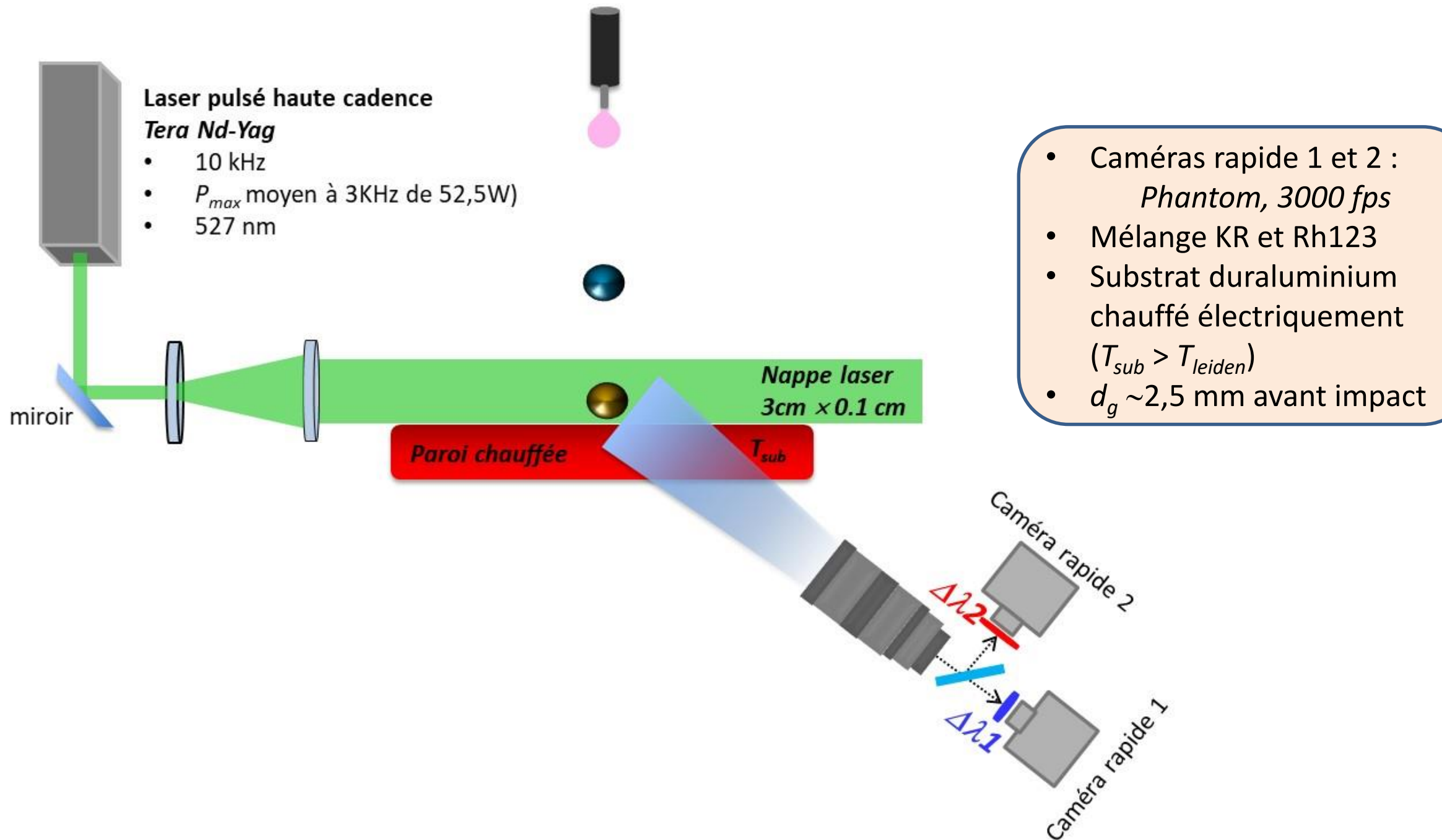


Problème de Stefan prévoit une évolution sous la forme

$$T_l(x, t) \sim \operatorname{erf} \left( \frac{x}{\sqrt{t}} \right)$$

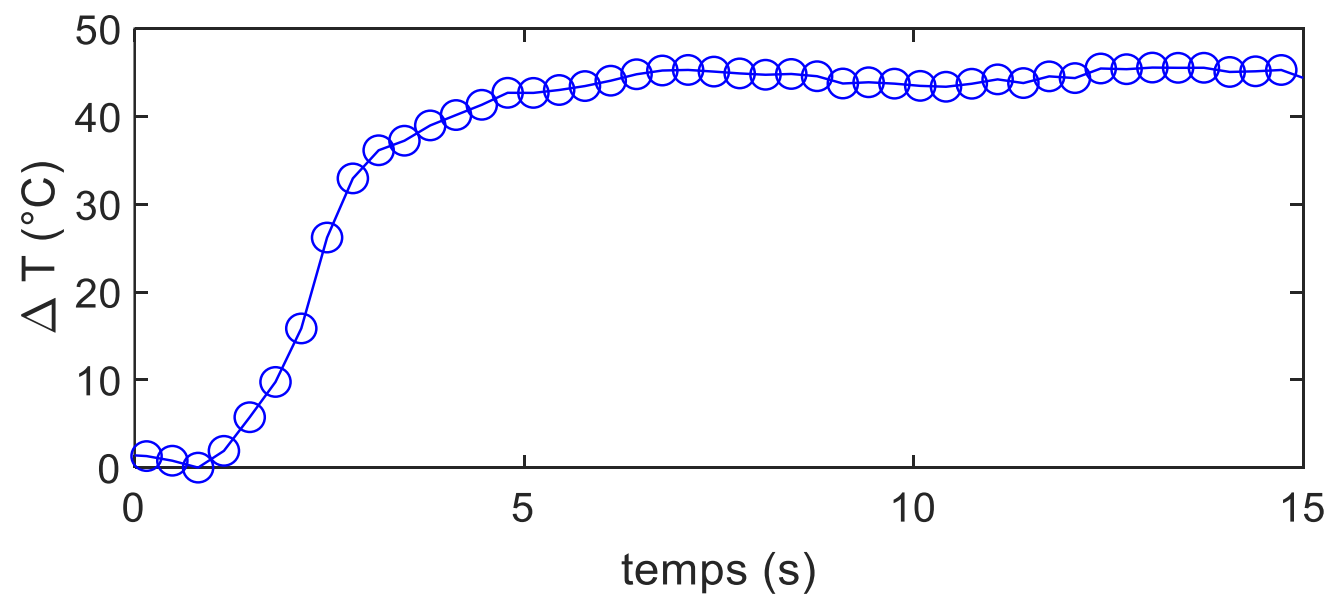
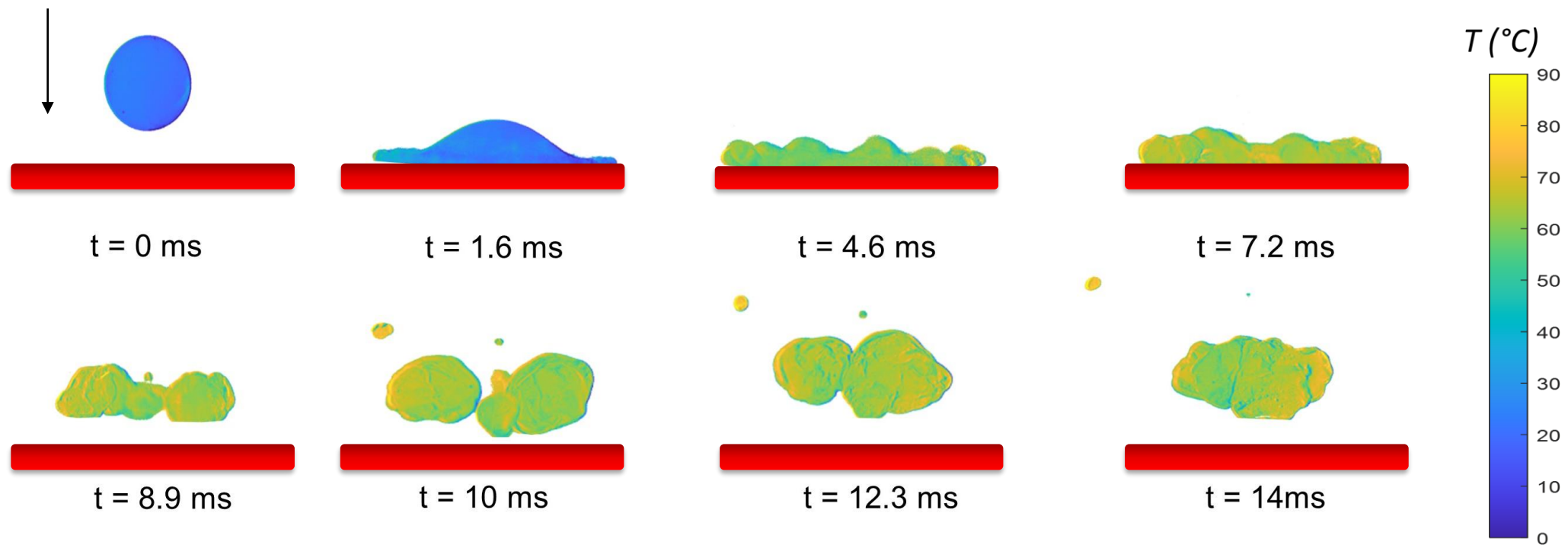
# Premiers développements anti-givrage

## *PLIF rapide **vue de côté***



# Premiers résultats

Parois chauffée à 400°C





# CONCLUSION

## *Partie 2*

- ❑ Amélioration conditions expérimentales
  - Reproductibilité
  - Nombre d'essais par jours
  
- ❑ Amélioration et validation de la chaîne PLIF
  - Détection début changement de phase
  - Incertitude origine (phase?) signal de fluorescence collecté
  
- ❑ Intégration technique IRT
  - Gamme spectrale [7.7 – 9.5  $\mu\text{m}$ ]
  - Accès optiques et diélectrique DBD transparent dans cette gamme (ZnSe)
  - Dépôt « opaque » sur interface compatible avec plasma (Teflon)
  
- ❑ Essais sur des surfaces structurées