

# Mesure de température par spectrométrie et caméra infrarouge

-

## Présentation du projet Prométhée

M. Dal, M. Schneider, F. Coste, R. Fabbro



## Laboratoire de Procédés et d'Ingénierie en Mécanique et Matériaux

### UMR 8006 Dir Gilles Régnier



**Campus de Paris**

151 Bd de l'Hopital 75013 Paris

### 5 groupes de Recherche

- Polymères : **ArPe / Tempo**
- Métaux : **Comet**
- Simulation : **DYSCO**
- Procédé : **Laser**

### Effectif

- Enseignants / Chercheurs : **37**
- ITA / Administratifs : **29**
- Doctorants / ATER : **≈40**



**Halle 3 & 4**

## Prométhée : Propriétés des métaux liquides à haute température

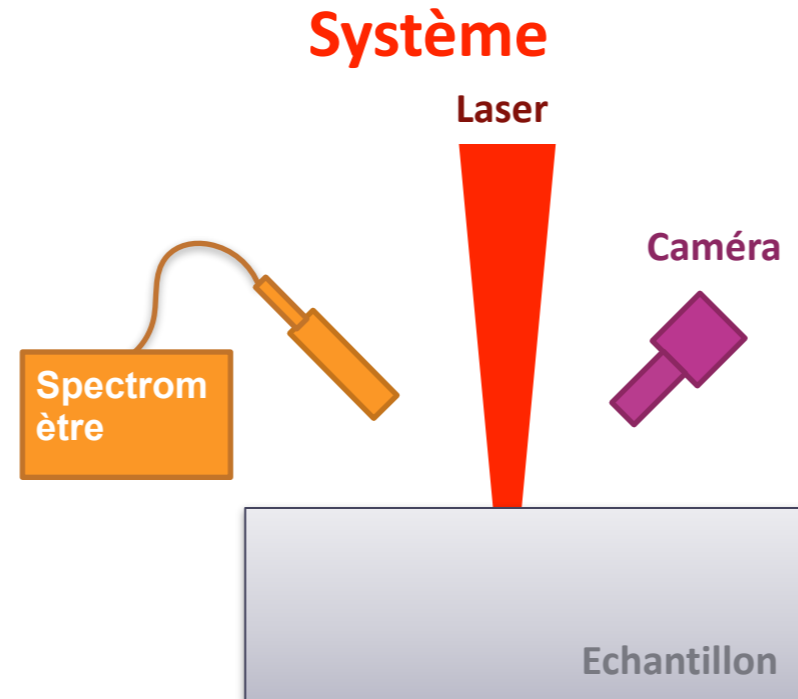
### Objectif

Répondre au besoin grandissant de connaître la dépendance à la température des grandeurs thermophysiques en phase liquide à haute température (procédés thermiques, numérique).

- Absorptivité ( $\alpha$ )
- Conductivité thermique ( $K$ )
- Chaleur massique ( $c_p$ )
- Masse volumique ( $\rho$ )
- Tension superficielle ( $\sigma$ )
- Viscosité ( $\mu$ )

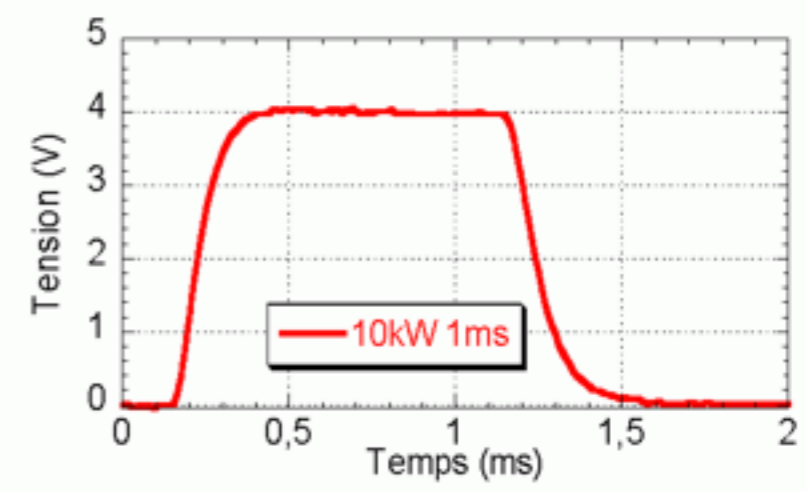
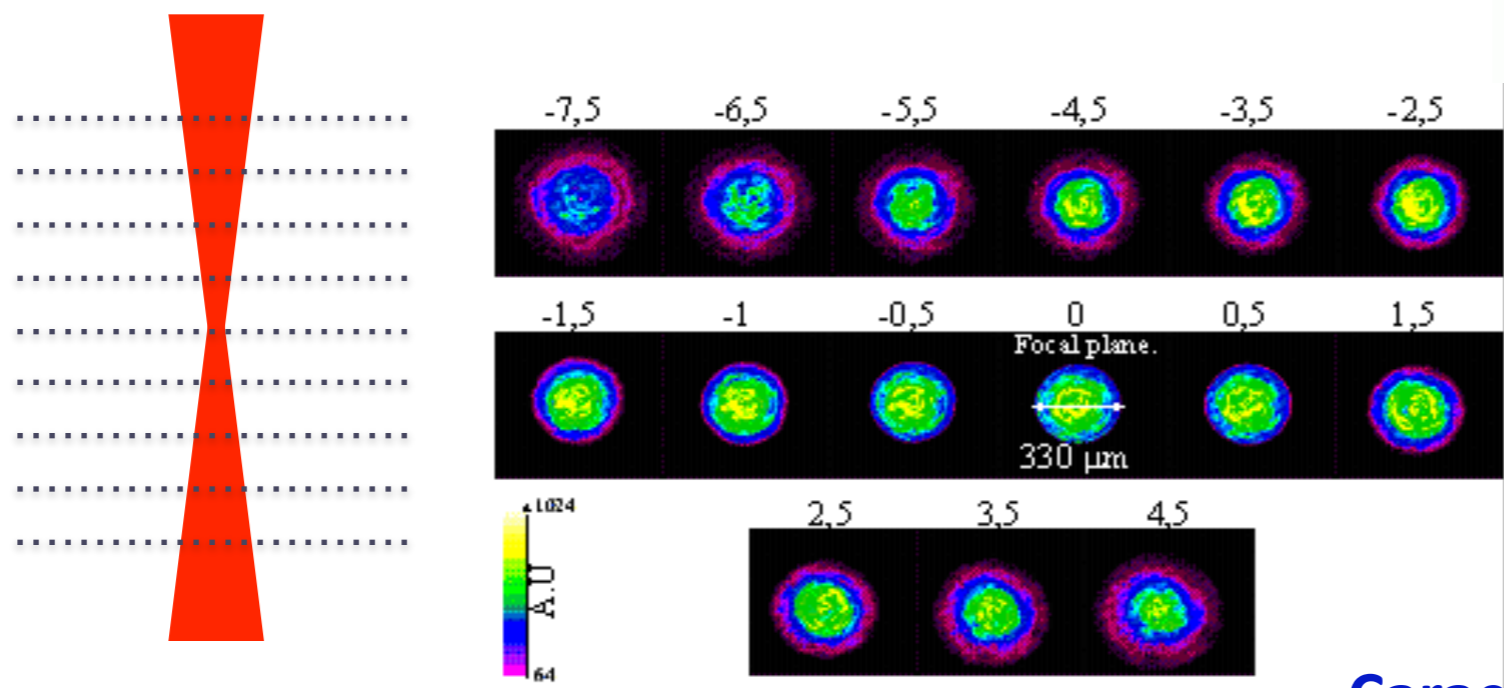
### Financement

- 300k€ (matériel et thèse)
- ANR JCJC  $\Rightarrow$  Juillet 2014



- ✓ Caractérisation des faisceaux laser (10kW CW)
- ✓ Mise en oeuvre des techniques de visualisation par caméra rapide (1Mfps)
- ✓ Mise en oeuvre d'une technique de spectrométrie

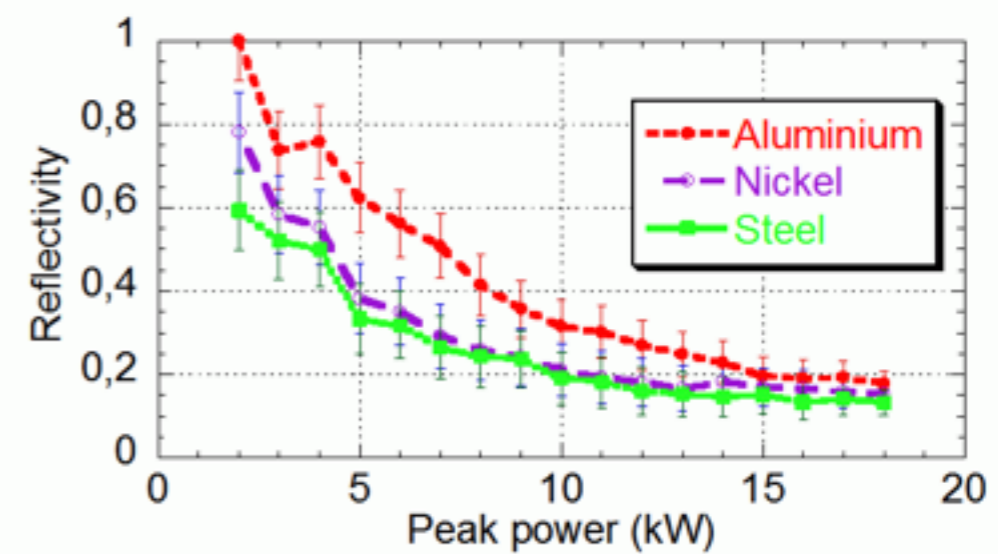
## Analyseur de faisceau



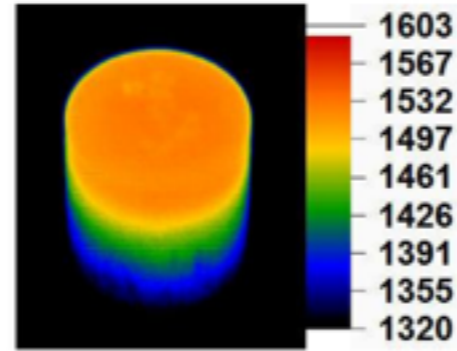
Caractériser le chargement thermique

$$I(r, \theta, z, t) \quad \frac{\partial I}{I} < 1\% \quad \delta < 1\%$$

- ✓ Energie
- ✓ Profil temporel en créneaux
- ✓ Répartition spatiale homogène
- ✓ Stabilité/Répétabilité

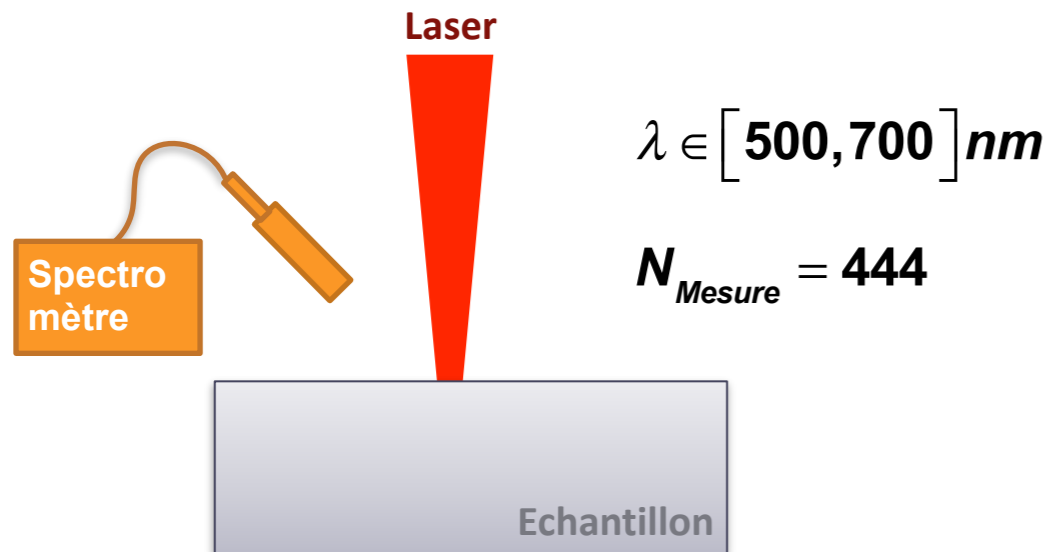
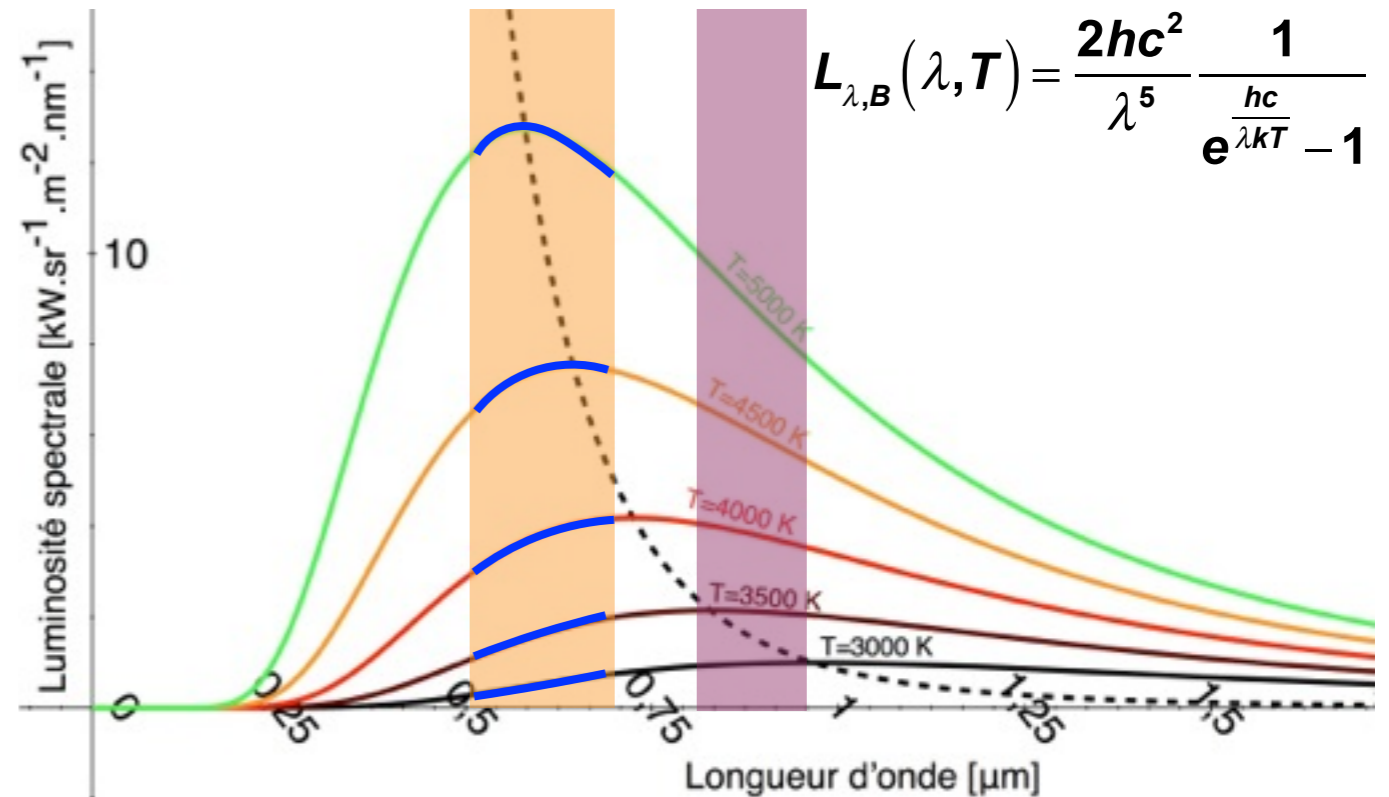
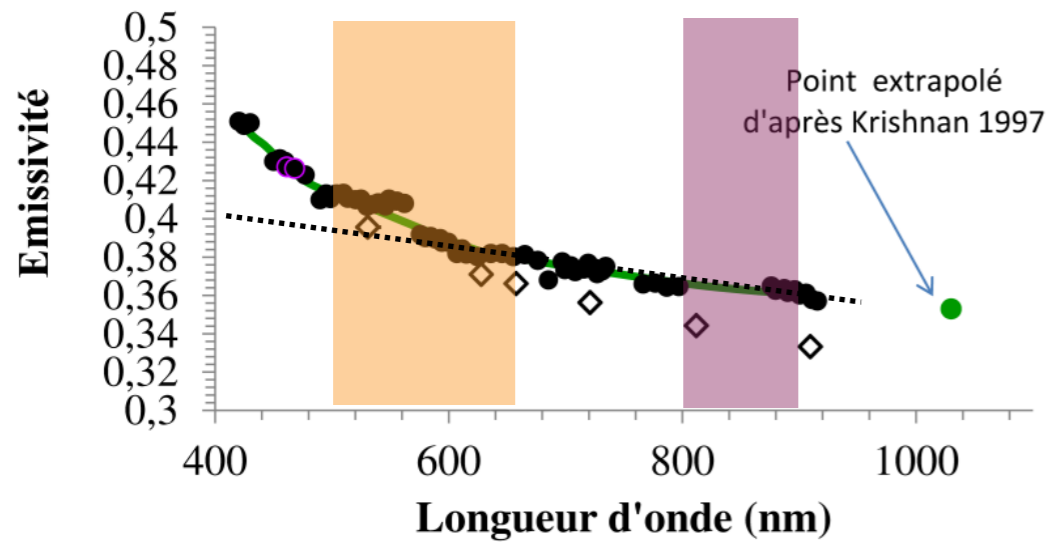


**Hypothèses** :  $\varepsilon(\lambda)|_T = a\lambda + b$        $T_{surf} \approx cst$



**Champ de température en phase solide**

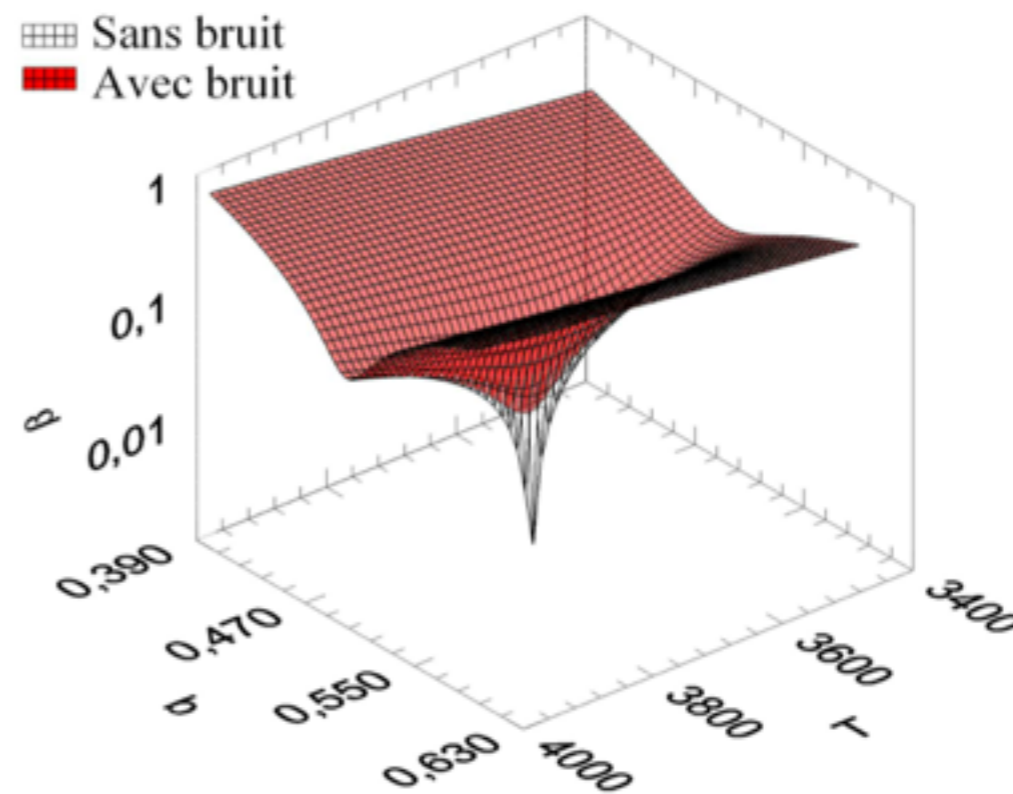
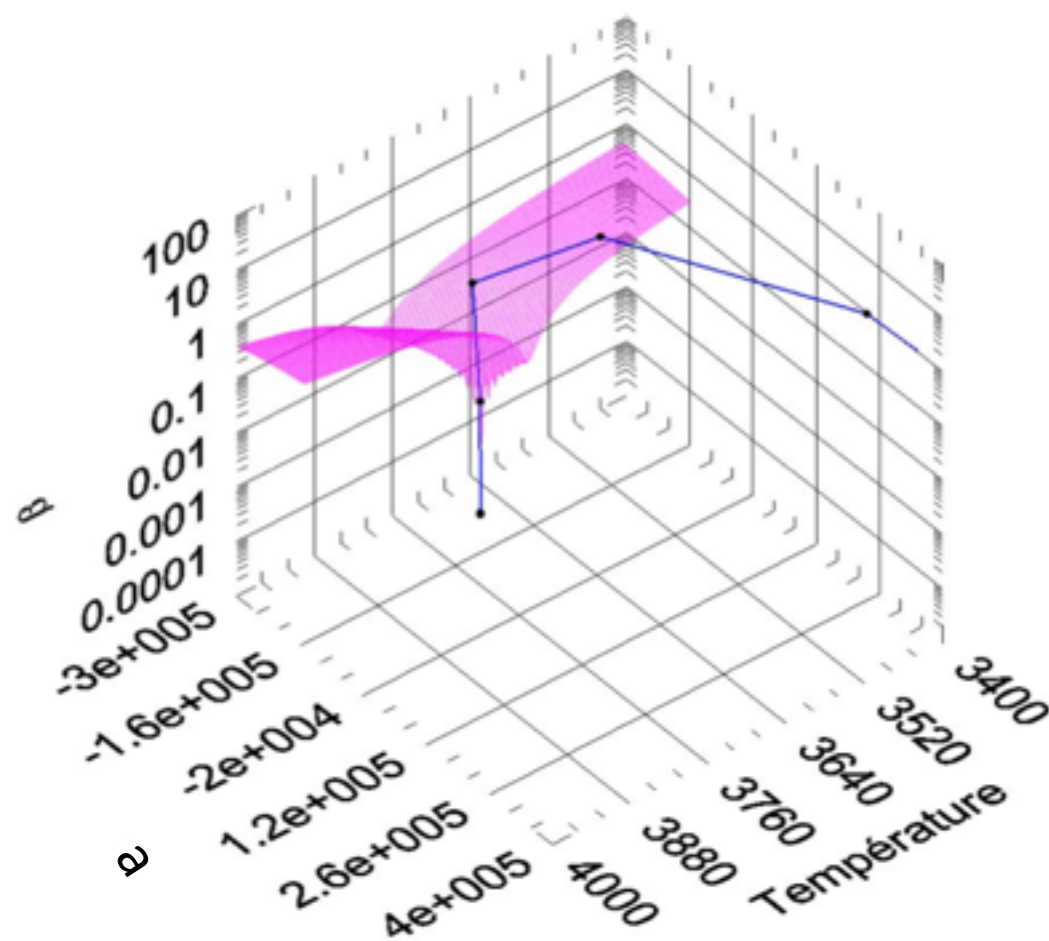
- ◇ Cezairliyan (comm. Privée citée dans Krishnan 1997)
- tendance d'après Krishnan 1997
- Krishnan 1997 (Fe à 1890K)



$$\beta = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^N (L_{\lambda,Exp}(\lambda_i, T) - (a\lambda_i + b)L_{\lambda,B}(\lambda_i, T))^2}}{NL_{\lambda,Exp}(600, T)}$$

## Levenberg-Marquardt (a,b,T)

$$\varepsilon(\lambda)|_T = a\lambda + b \quad \beta = \frac{L_{\lambda,Exp}(\lambda, T) - (a\lambda + b)L_{\lambda,B}(\lambda, T)}{L_{\lambda,Exp}(600, T)}$$



Mesurer le champ de température en surface (1mm<sup>2</sup>)

$$\left. \frac{\partial T}{T} \right|_{\text{spectrale}} = \pm 3\% \quad T \in [2000; 5000]$$

$$\lambda \in [800, 950] \text{ nm}$$

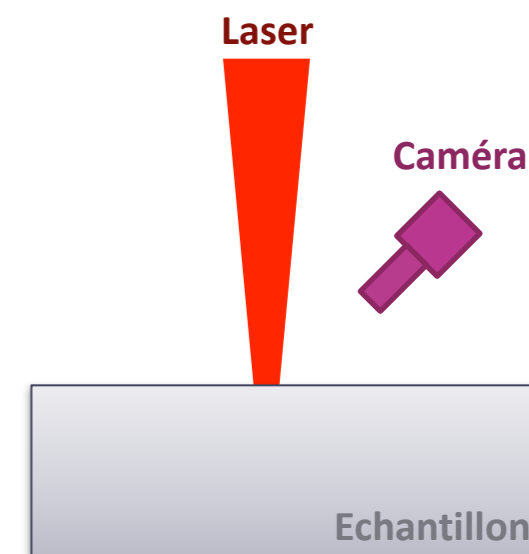
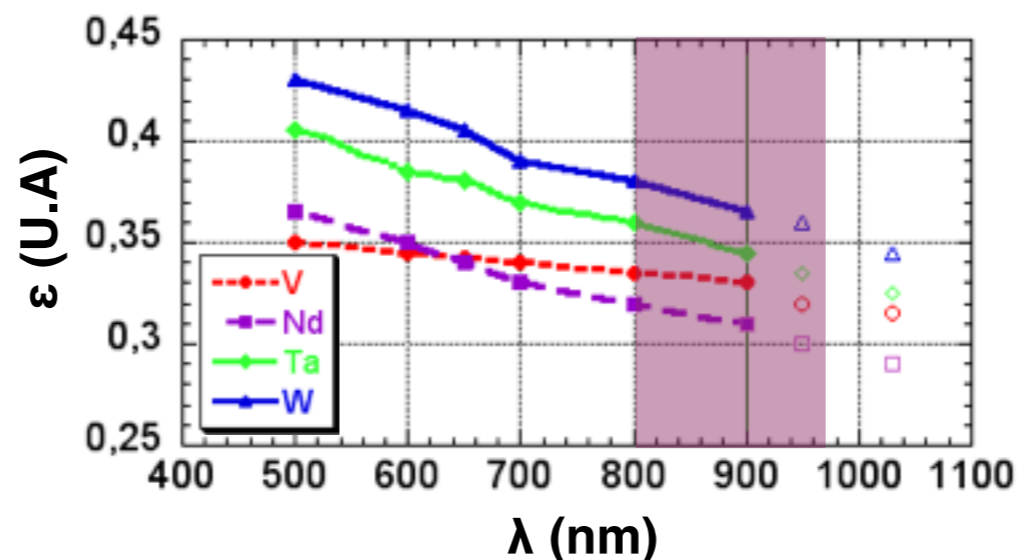
Hypothèse :  $\bar{\varepsilon}_{[800;950]} \approx A_{1030}$

$$L_B = \frac{Ng - d}{k \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot 10^{-D}}$$

$$T \approx C_2 \cdot \ln^{-1} \left( \frac{C_1 \cdot k \cdot \varepsilon \cdot \tau \cdot 10^{-D}}{Ng - d} + 1 \right)$$

Mesurer le champ de température en surface

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\varepsilon} = \pm 12\% \quad \frac{\partial T}{T} \Big|_{2D} = \pm 5\% \quad T \in [2000; 5000]$$



chemin du film: D:\mon film.avi

chemin répertoire enregistrement: L:\Personal Data\My Documents\MANIPS LALP\211210\mon fichier.txt

dt entre 2 images (ms): 0,5

Image 0 à 0

commencer à l'image?: 0

prendre 1 image sur X: 1

prendre en tout X images: 20000

Image: numéro de l'image: 445, nbe d'images: 150, temps actuel (ms): 222,5

freq d'affichage (Hz): 100

256x256 1/1 8-bit image 40 (188,206)

Pause/Reprendre STOP!

Histogram report:

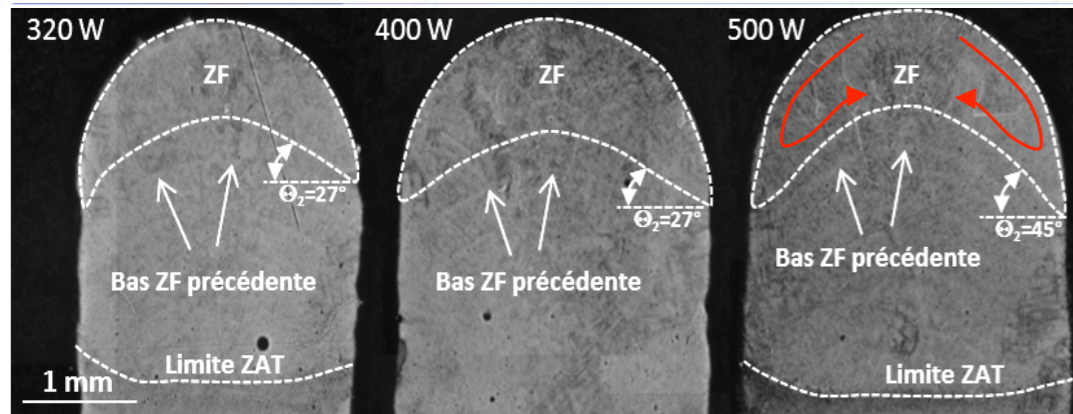
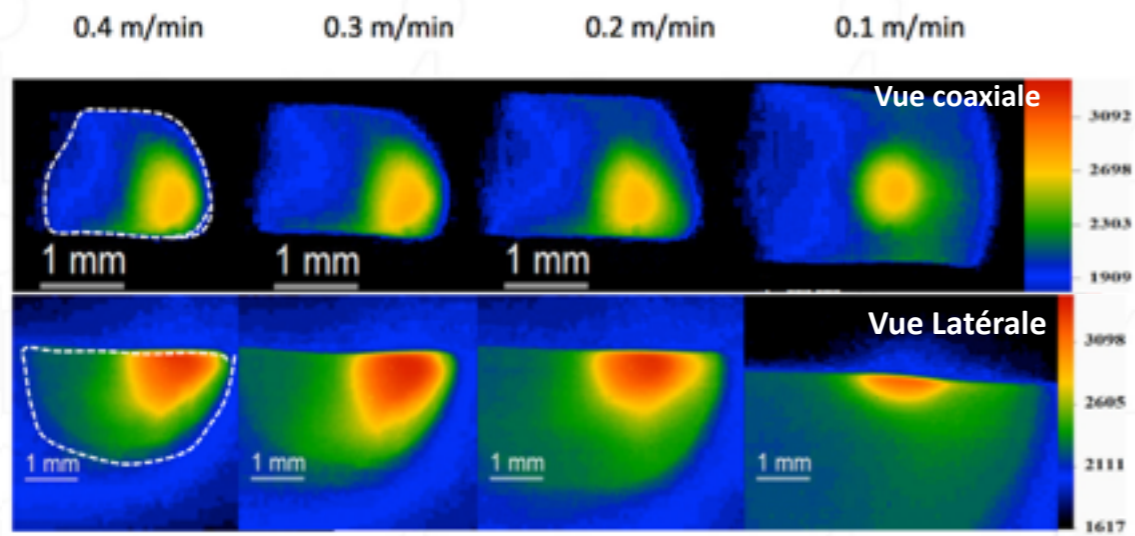
164.00	Minimal Value
186.00	Maximal Value
0.00	Starting Value
1.00	Interval Width
176.35	Mean Value
4.22	Standard Vari:
336	Area (pixels)

CALCUL TEMPERATURE:

émissivité: 0,7	Tmin(K): 2841,0	dTmin: +ou- 44,270
ouverture diaphragme: 32	Tmax(K): 2894,6	dTmax: +ou- 45,403
dt intégration (ms): 0,5	Tmoy: 2871,5	dTmoy: +ou- 44,907
densité: 0	kmoy: 5,169	

Muller et al, Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2D single-band and spectral pyrometry, Journal of Laser Application V24, N°2, 2012





$T_{max}=2580\text{ K}$

$T_{max}=2650\text{ K}$

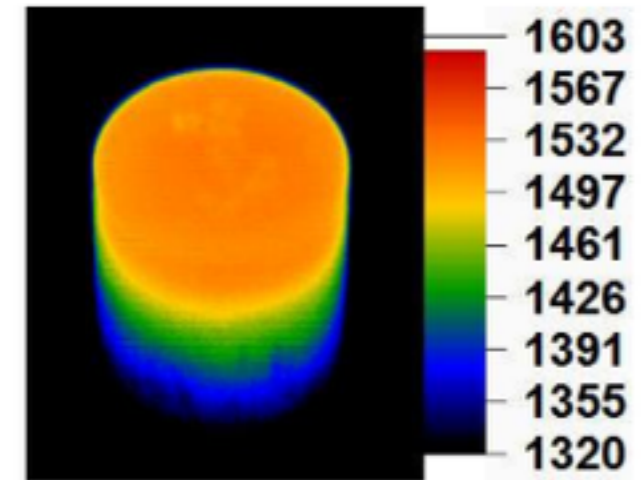
$T_{max}=3150\text{ K}$

$G=650\text{ K/mm}$

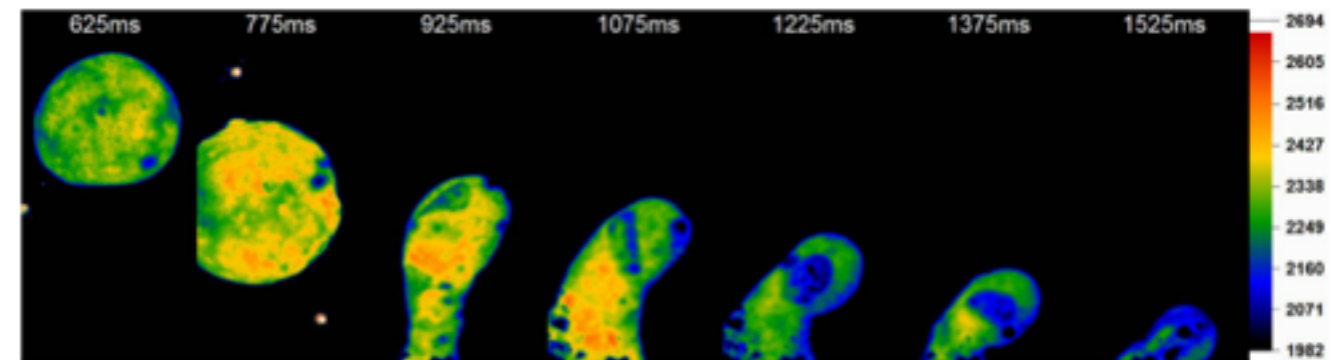
$G=900\text{ K/mm}$

$G=1400\text{ K/mm}$

Effet Marangoni -> Augmentation de la concavité de la ZF



Homogénéisation du champ de température en phase solide



Combustion des métaux sous atmosphère d'oxygène

Gharbi et al, Influence of various process conditions on surface finishes induced by the direct metal deposition laser technique on a Ti-6Al-4V alloy, Journal of Materials Processing Technology 213 (2013) 791-800.

Muller et al, Temperature measurement of laser heated metals in highly oxidizing environment using 2D single-band and spectral pyrometry, Journal of Laser Application 24-2 (2012).

## Méthode

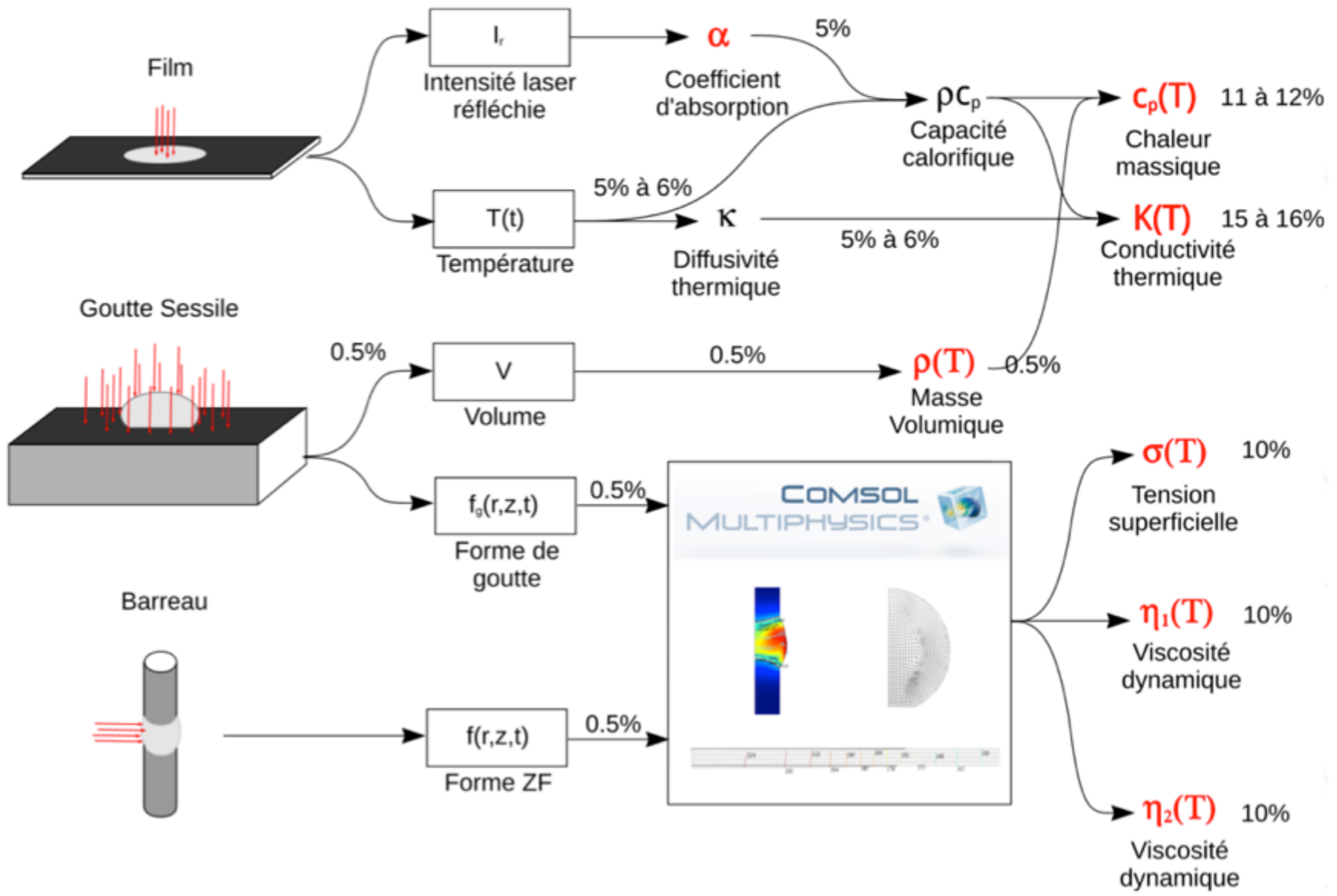
Adapter des méthodes connues au cas des métaux liquides et utiliser le laser comme source d'énergie.

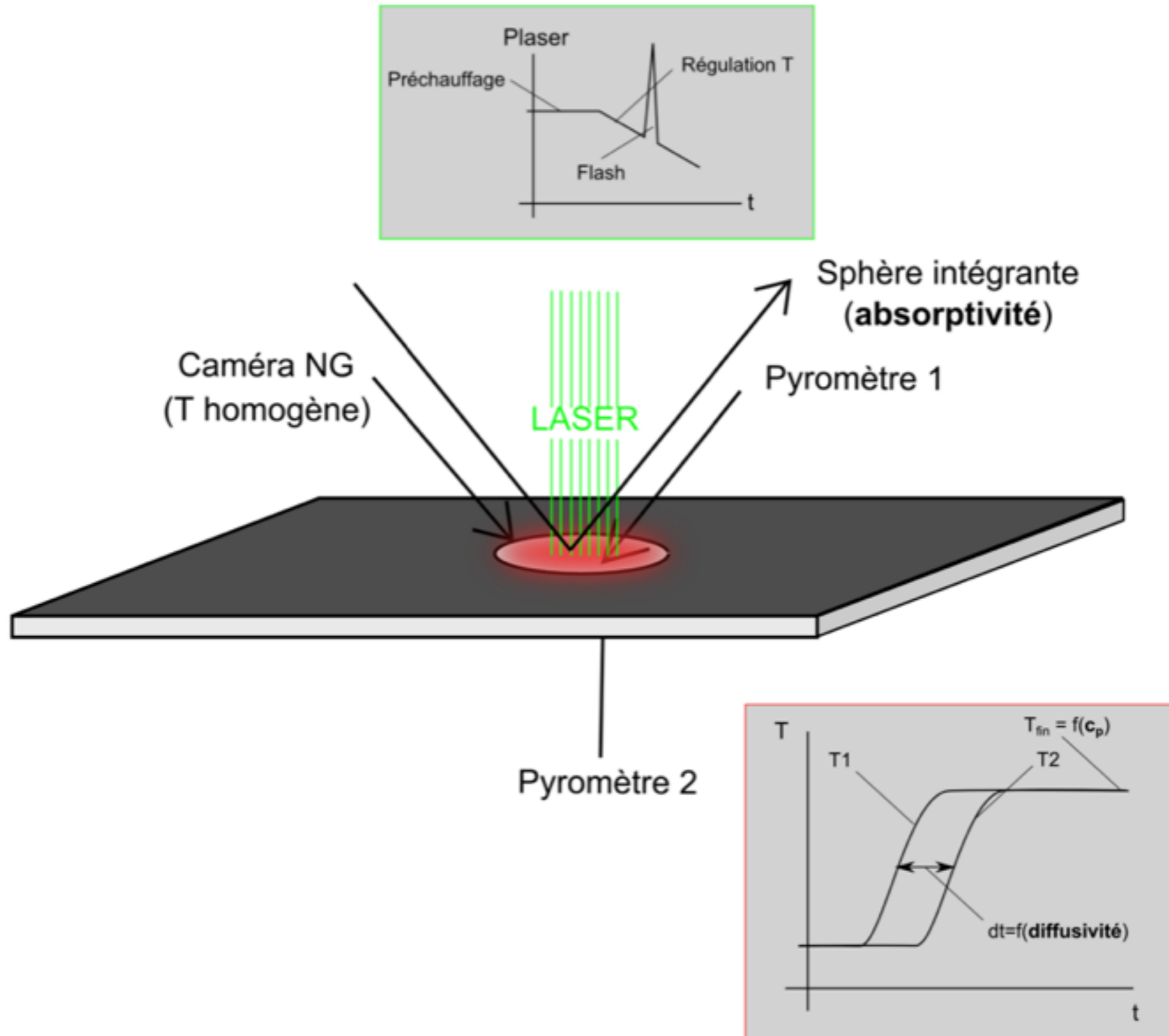
1. Méthode flash + modèle numérique (réduire les effets des simplifications) + méthode inverse (estimation de fonction)

Mesure de température en fonction du temps et de la puissance absorbée

2. Méthode de la goutte sessile + modèle numérique + méthode inverse (estimation de paramètres)

Mesure de forme et de température en dynamique (<ms)





## Quelques résultats expérimentaux

Matériau : **Acier Inox**

Ep : **200  $\mu\text{m}$**

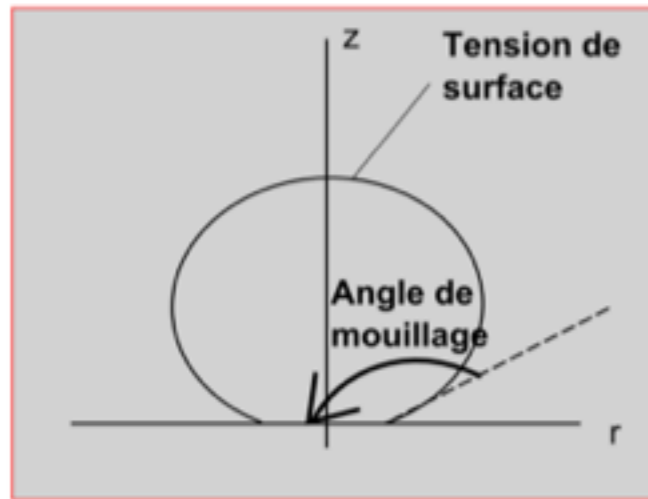
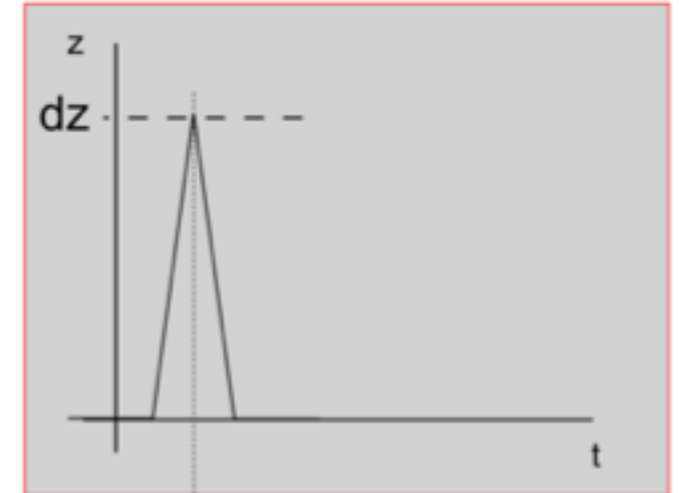
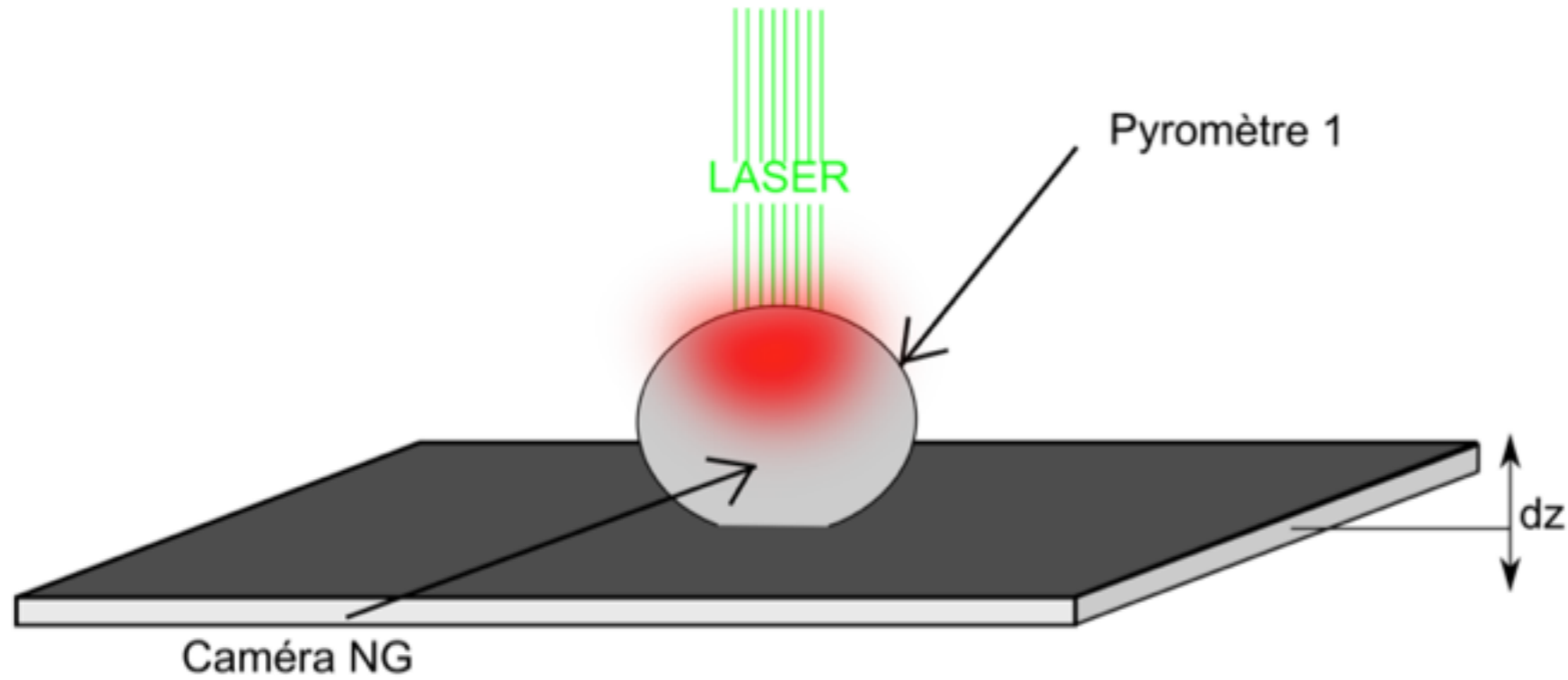
Durée du tir : **1s**

Protection : **Ar**

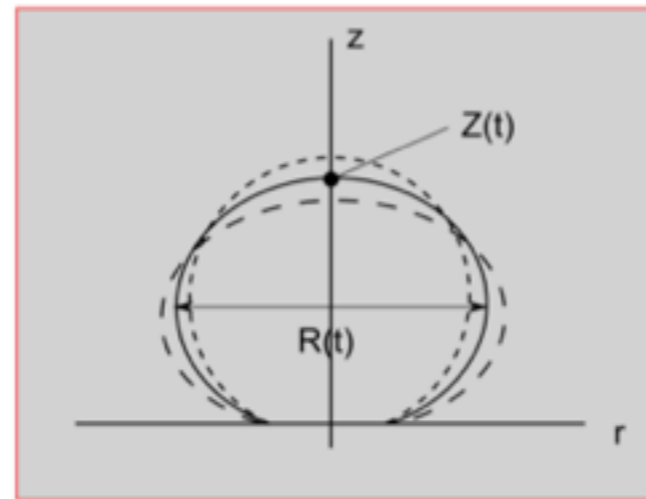
- ✓ Stabilité du bain liquide
- ✓ ZF assez large
- ✓ Protection gazeuse
  - Mesure de température
  - Régulation à définir
  - Effets tensioactifs

## Faisabilité d'un film liquide stable

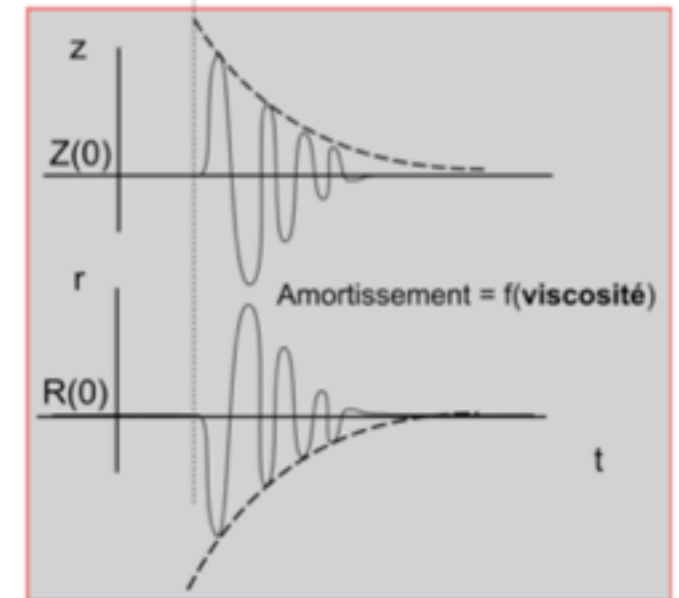




"Statique"



"Dynamique"



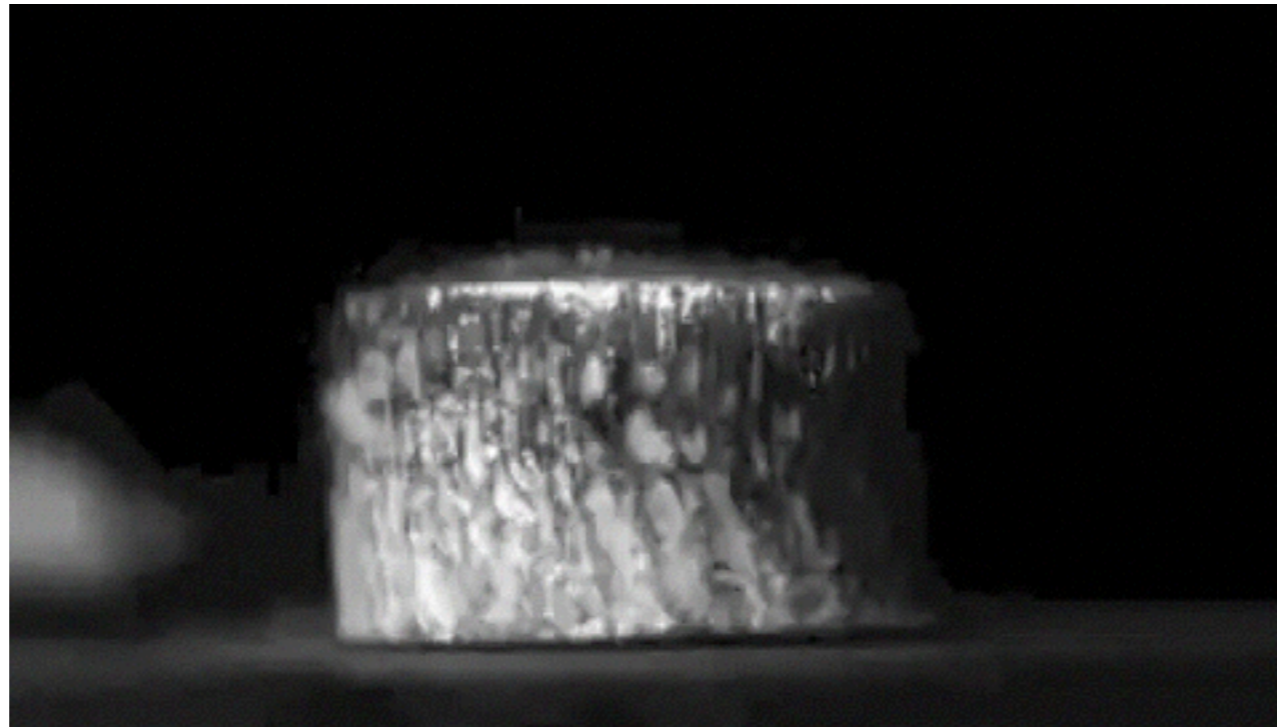
## Quelques résultats expérimentaux et numériques

### Faisabilité d'une goutte stable

Matériau : **Al/Ti**

R : **1 mm**

Protection : **Ar**

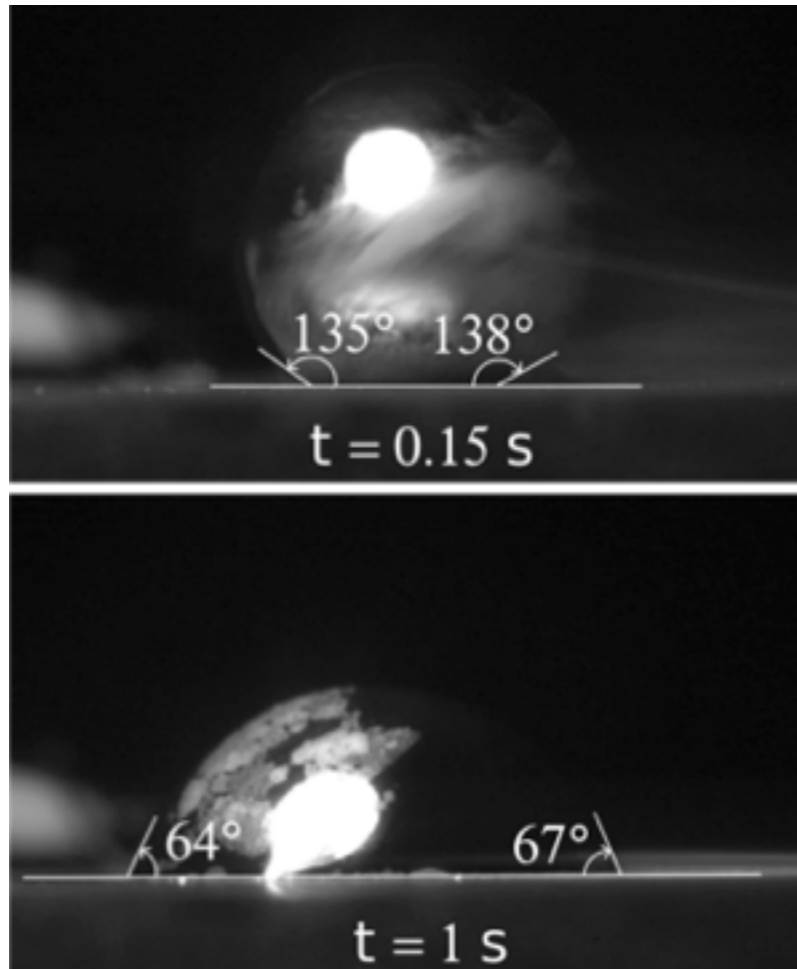


- ✓ **Stabilité de la goutte - cinétique concordant avec la littérature**
- ✓ **Bonne visibilité du profil et de l'angle**
- **Protection gazeuse (problème d'oxydation)**

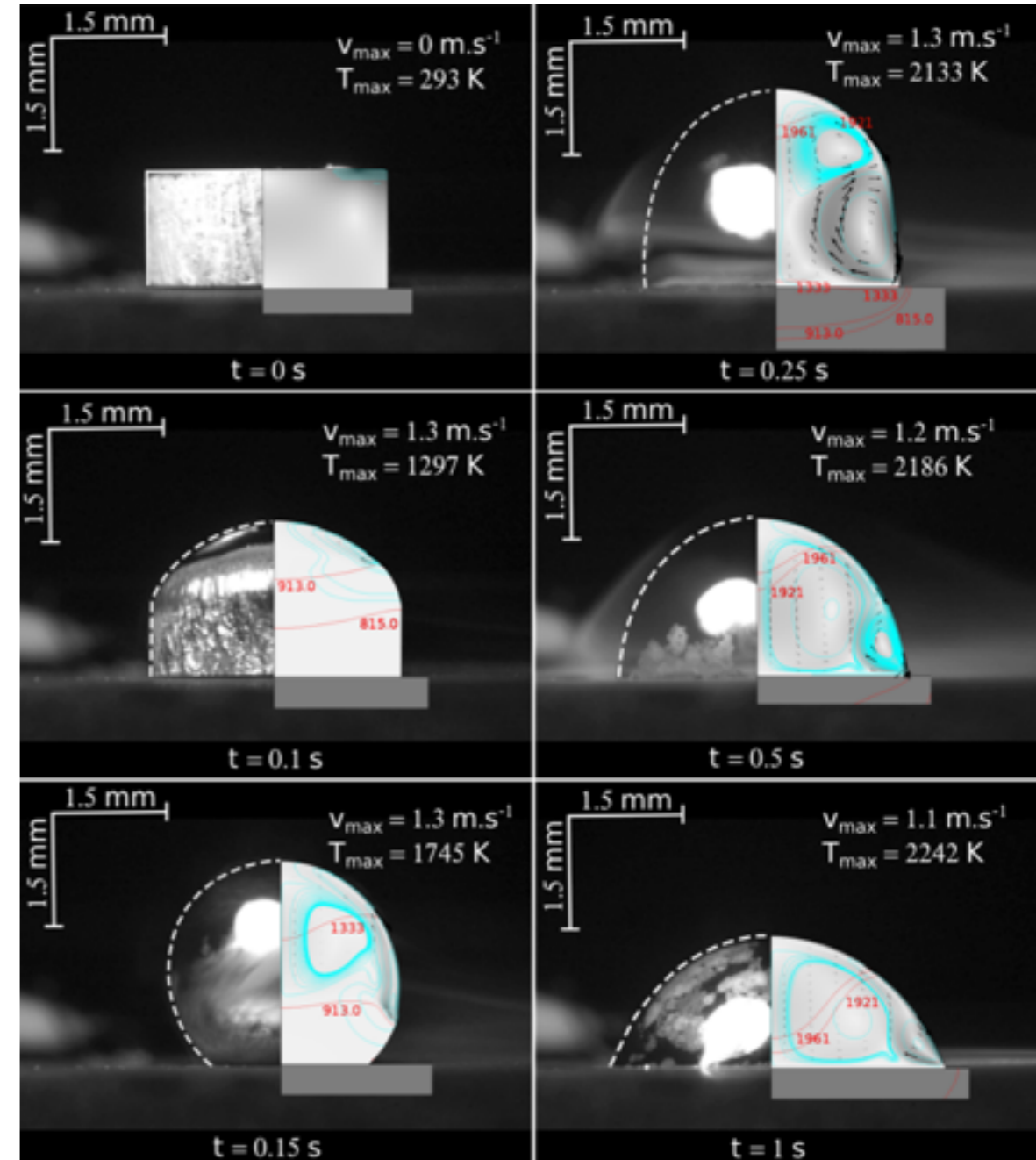
## Quelques résultats expérimentaux et numériques

### Faisabilité de la représentation numérique

#### Angle de mouillage $\theta(T)$



#### Tension de surface $\sigma(T)$



- ✓ Représentation numérique possible
- Quantifier précisément l'erreur



## Phase préliminaire de proposition de projet $\Rightarrow$ test de faisabilité

- ✓ Faisabilité expérimentale
- ✓ Faisabilité numérique
  
- Mesure et estimation des paramètres
- Amélioration de la couverture gazeux
- Régulation de la température du liquide
- Détection des contours
- ...



**Merci de votre attention**