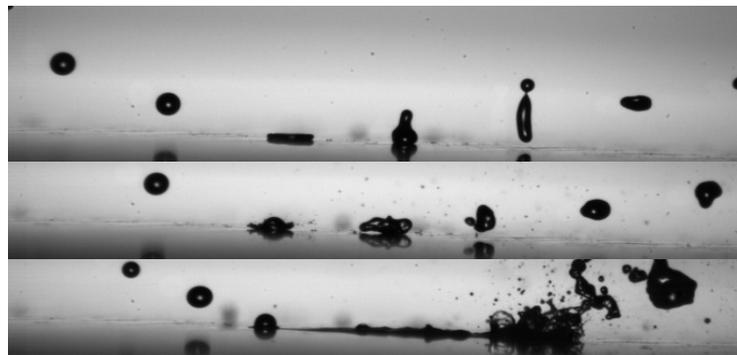


# INTERACTIONS GOUTTES PAROI EN SITUATION DE LEIDENFROST



**M. Gradeck, G. Castanet, A. Labergue, F. Lemoine**

**F. Lelong , P. Dunand, W. Chaze**



# Plan

- Contexte
- Interaction Goutte-paroi
- Description de l'expérience
- Modèles
- Résultats
- Conclusions

# Refroidissement par sprays et gouttes?



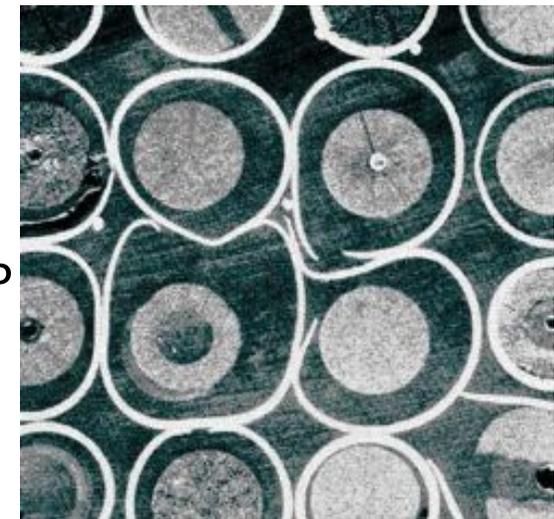
- ▶ Traitement thermique des aciers

$$T_{\text{wall}} \sim 900-1000^{\circ}\text{C}$$

- ▶ Transitoire thermique d'un cœur de REP

Dans le cas d'un APRP

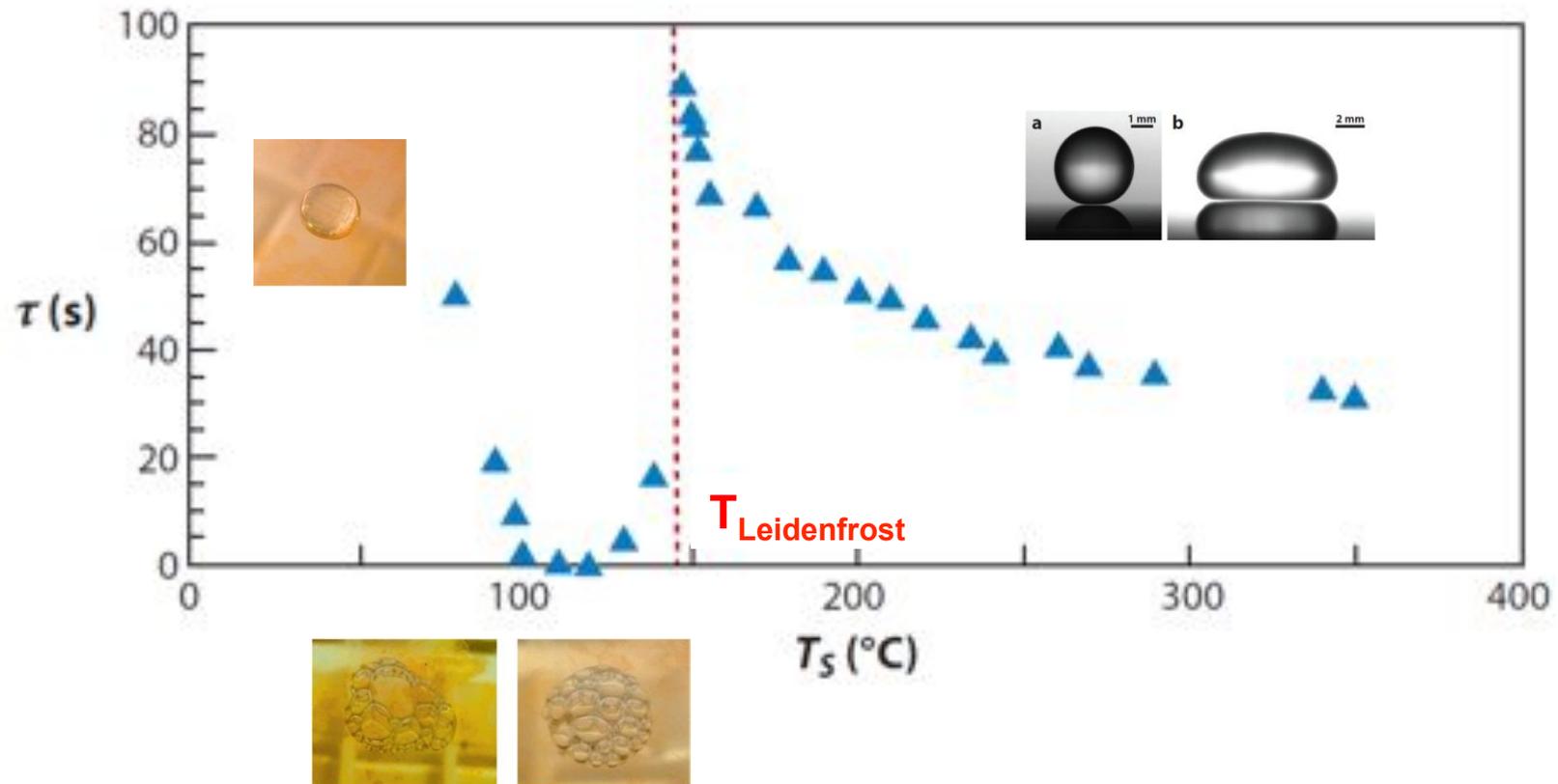
$$T_{\text{wall}} \sim 1200-1500^{\circ}\text{C}$$



- ▶ Refroidissement en électronique de puissance

*Basses températures*

# Goutte sessile sur une paroi chauffée

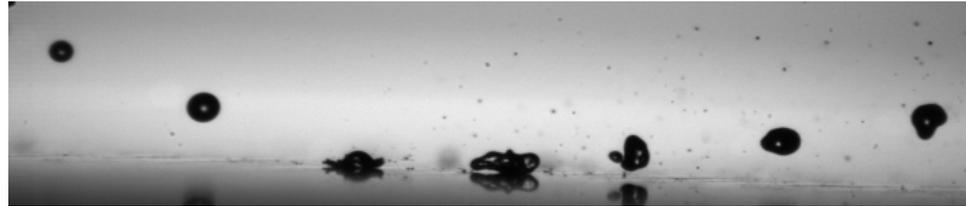


Biance et al., 2003, Leidenfrost drops, *Physics of Fluid*, 15, 1632-37

Nakoryakov et al., 2012, The behavior of water droplets on the heated surface, *IJHMT*, 55, 6609-17

# Gouttes en impact sur une paroi chauffée

## *Paramètres d'influences*



- Paramètres dynamiques de la goutte : vitesse, angle d' incidence
- Propriétés physiques du liquide :  $\mu_L$ ,  $\sigma$ ,  $C_{p,L}$ ,  $\rho_L$ ,  $T_{sat}$
- Propriétés physiques de la vapeur:  $\mu_V$ ,  $C_{p,V}$ ,  $\rho_V$
- Paramètres du transfert thermique et du changement de phase

# Gouttes en impact sur une paroi chauffée

## *Paramètres d'influences*

### ▶ Nombre de Weber

$$We = \frac{\rho V^2 D_{\text{droplet}}}{\sigma}$$

$\rho$	Masse volumique
$V$	Vitesse
$D_G$	Diamètre de la goutte
$\sigma$	Tension de surface

### ▶ Ohnesorge number

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \sigma L}} = \frac{\sqrt{We}}{Re}$$

$D_G$	Diamètre de la goutte
$\mu$	Viscosité dynamique

### ▶ Température adimensionnée

$$T^* = \frac{T_w - T_{eb}}{T_{Leid} - T_{eb}}$$

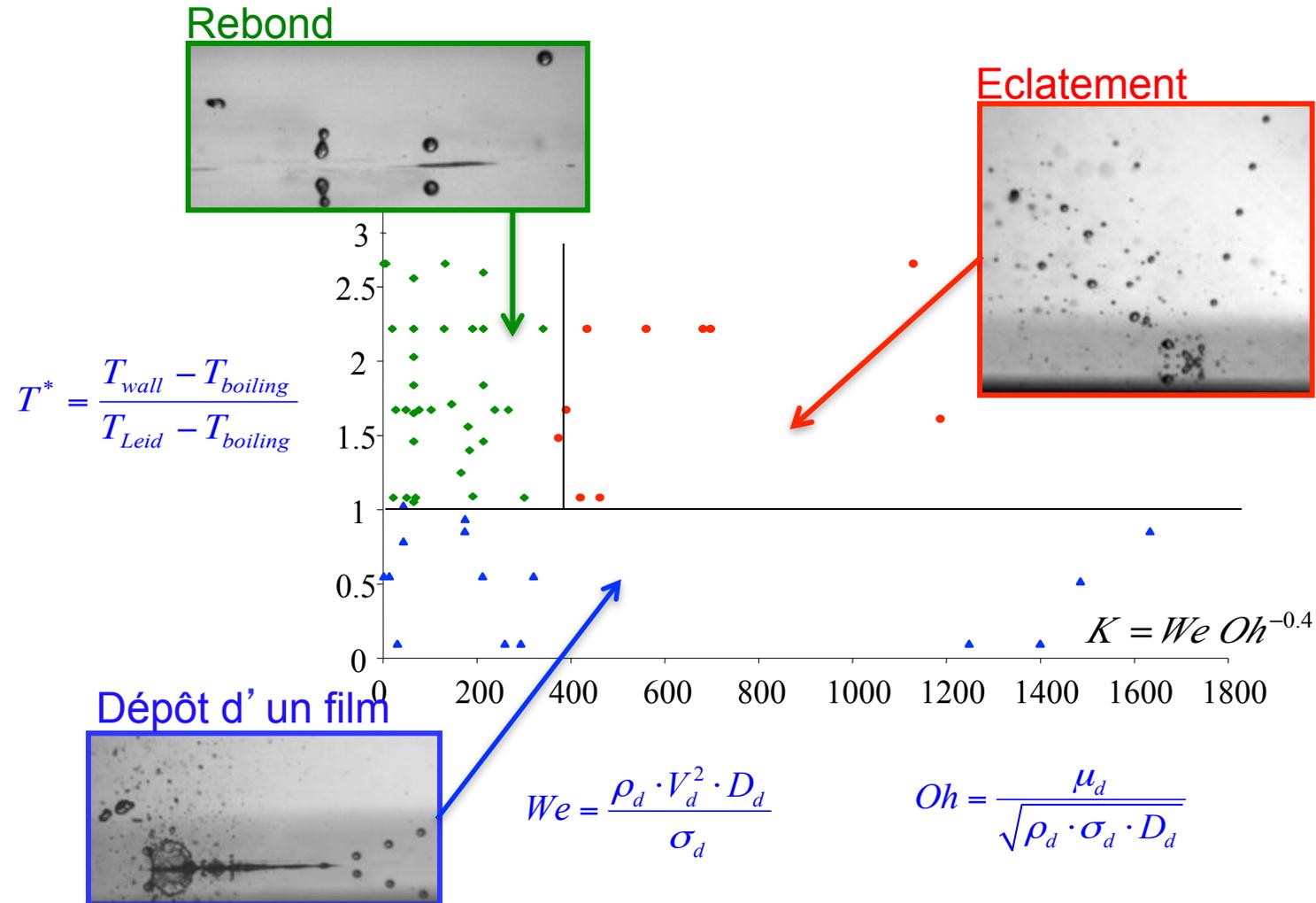
$T_w$	Température de paroi
$T_{eb}$	Température d'ébullition
$T_{Leid}$	Température de Leidenfrost

### ▶ Nombre de Mundo

$$K = We Oh^{-0.4}$$

C. Mundo, M. Sommerfeld, & C. Tropea, *Experimental studies of the deposition and splashing of small liquid droplets impinging on a flat surface*, Proc. ICLASS-94, Rouen (France), 1994.

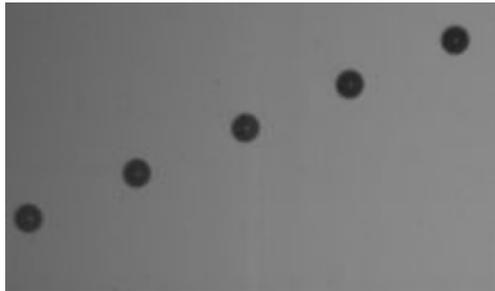
# Gouttes en impact sur une paroi chauffée



G. Castanet et al., Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall, IJHMT, 52, 670-79 2009.

# Méthode générale

Gouttes individuelles



n trains de gouttes



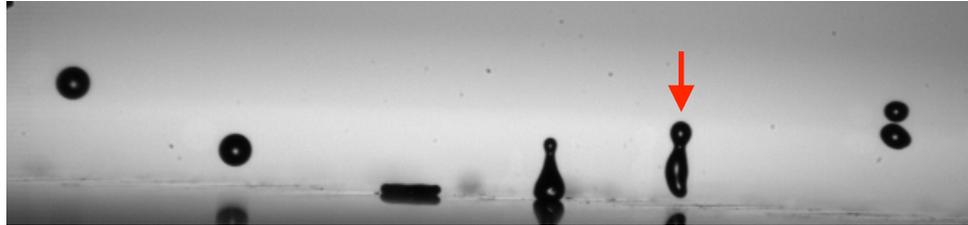
Spray



n Sprays en interaction



# Gouttes en impact sur une paroi chauffée



$$T_{\text{wall}} > T_{\text{Leidenfrost}}$$

- Temps de résidence
- Diamètre d' étalement de la goutte
- Température de la goutte (avant et après impact)

Energie perdue par la paroi

$$E_{DC} = \int_0^{t_R} \lambda_V \pi R_S^2 (T_W - T_{SAT}) \frac{\delta_V(t)}{\delta_V(t)} dt$$

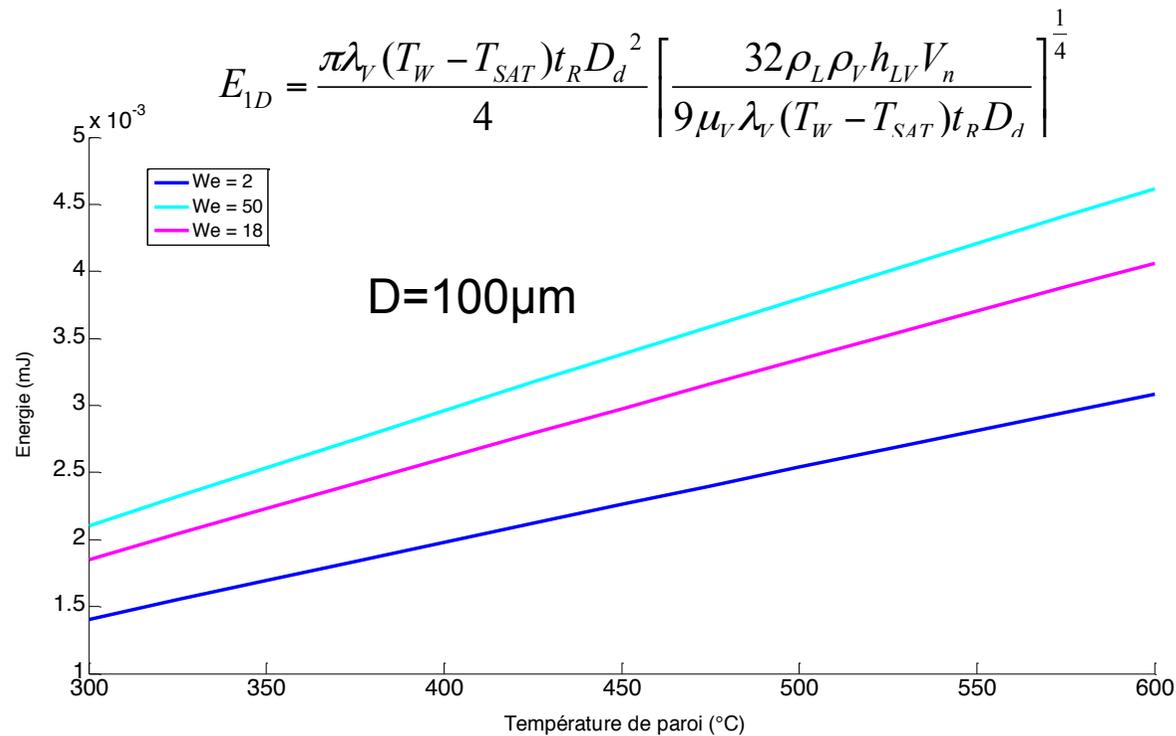
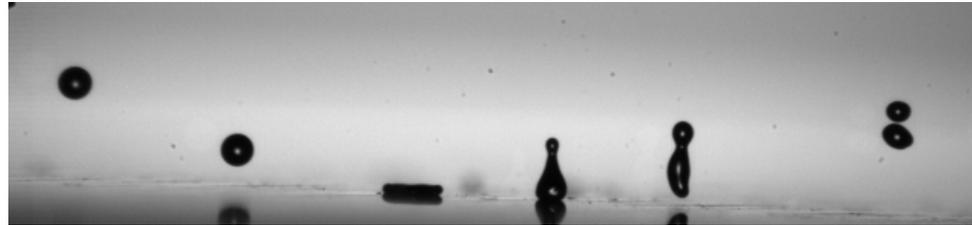
Diagram illustrating the energy loss model for a droplet on a heated wall. The equation shows the energy loss  $E_{DC}$  as a function of the residence time  $t_R$ , the thermal conductivity of the vapor  $\lambda_V$ , the spreading radius  $R_S$ , the wall temperature  $T_W$ , the saturation temperature  $T_{SAT}$ , and the vapor layer thickness  $\delta_V(t)$ . The diagram includes a schematic of a droplet on a wall with parameters  $R_e$ ,  $T_g$ ,  $T_w$ , and  $\delta_v$ .

Labels in the diagram:

- Temps de résidence (green box)
- Energie (black box)
- Rayon d' étalement (red box)
- Épaisseur de vapeur (blue box)

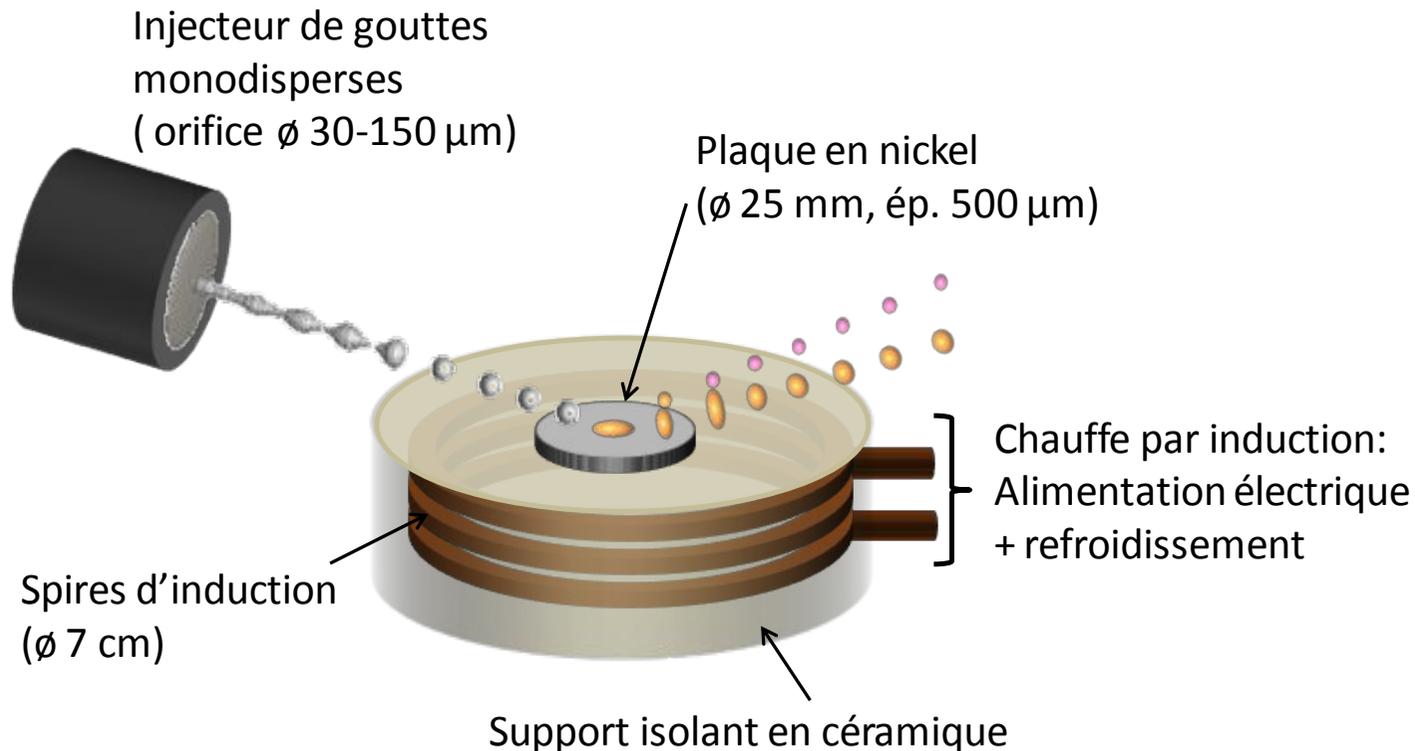
Guo Y., Mishima K., "A non equilibrium mechanistic heat transfer model for post dryout dispersed flow regime", *Experimental Thermal and Fluid science*, Vol 26, pp 861-869, 2002.

# Gouttes en impact sur une paroi chauffée



Guo Y., Mishima K., "A non equilibrium mechanistic heat transfer model for post dryout dispersed flow regime", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol 26, pp 861-869, 2002.

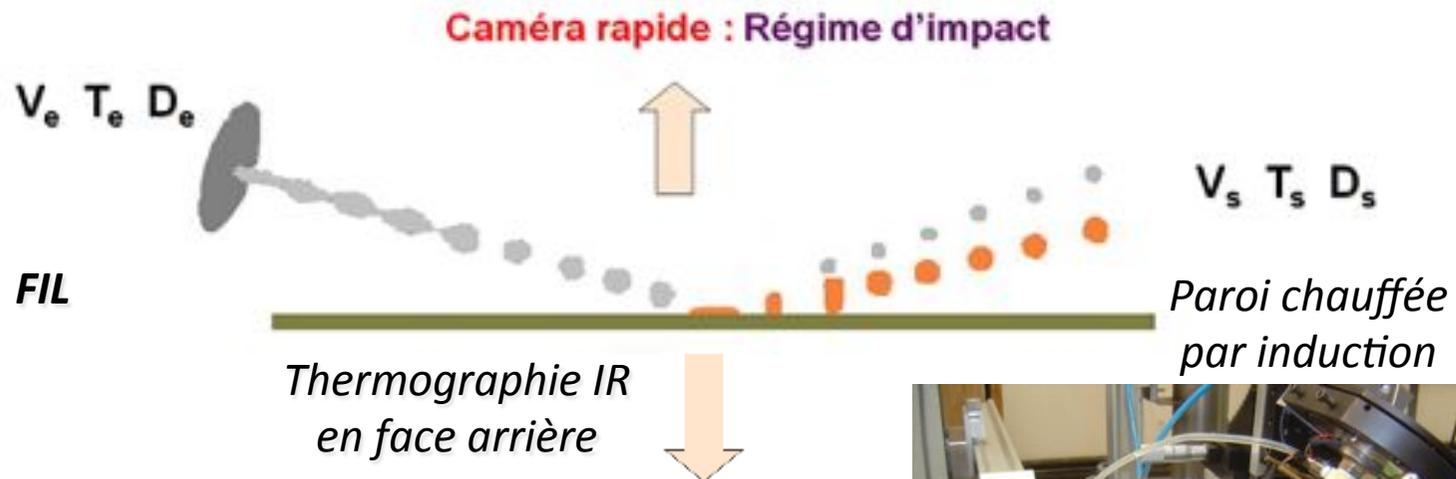
# Installation expérimentale



## Mesures couplées:

- ▶ Mesure LIF de la température des gouttes
- ▶ Thermographie IR de la face arrière de la plaque de nickel
- ▶ Ombroscopie à l'aide d'une caméra rapide

# Installation expérimentale



## Conditions expérimentales :

### Train de gouttes

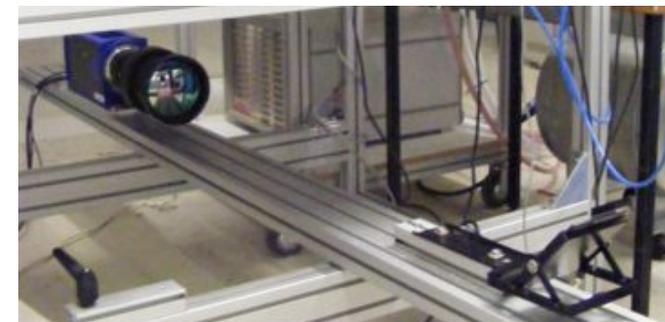
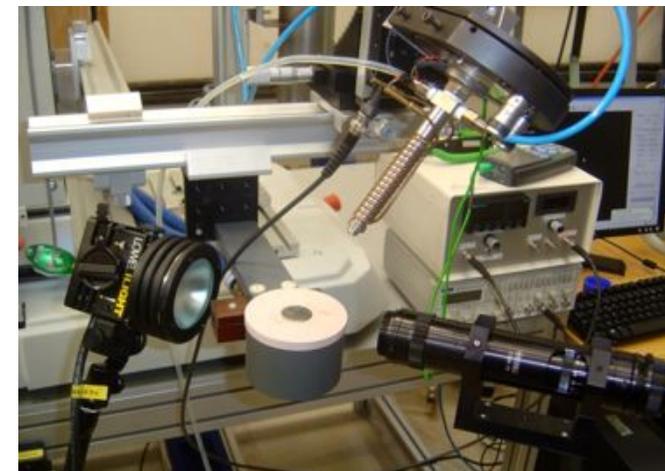
- Diamètre : 80 $\mu\text{m}$  à 300 $\mu\text{m}$ .
- Vitesse : 2 m/s à 10m/s,

### Atmosphère

- Pression atmosphérique

### Paroi

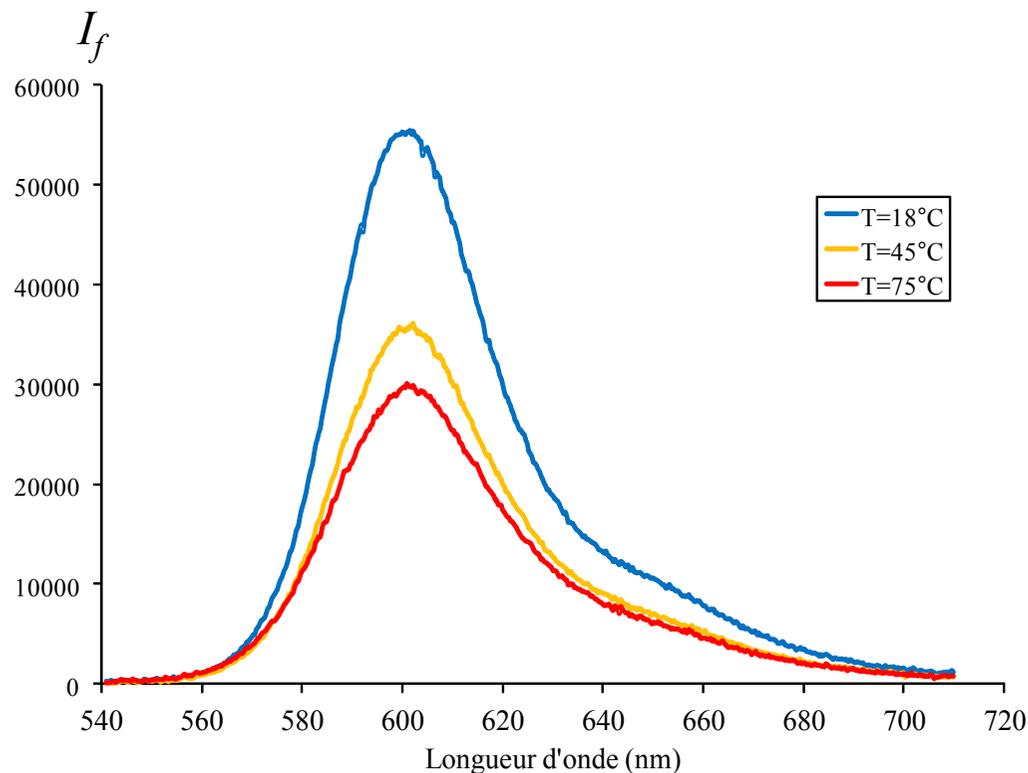
- Nickel,  $T \sim 600\text{-}800^\circ\text{C}$ ,
- Diamètre  $\sim 25$  mm, épaisseur 500  $\mu\text{m}$ ,
- Angle d' incidence de la goutte variable:  
inclinaison de l' horizontale à la verticale,



# Installation expérimentale

Intensité du signal de fluorescence:

$$I_f(\lambda) = K_{opt}(\lambda) K_{spec}(\lambda) I_0 c V \exp\left(\frac{\beta(\lambda)}{T}\right) \quad (\text{absorption négligée})$$



Spectres d'émission de la Rhodamine 640

$K_{opt}$  Constante optique

$K_{spec}$  Constante spectroscopique

$I_0$  Intensité laser

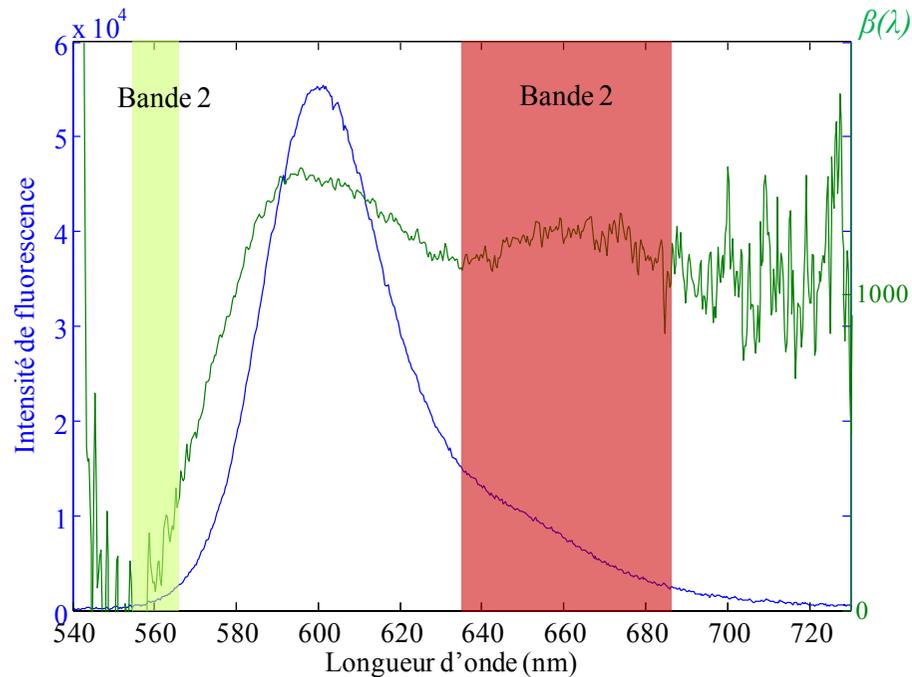
$c$  Concentration en traceur

$V$  Volume de mesure

$\beta$  Sensibilité en température

$T$  Température

# Installation expérimentale



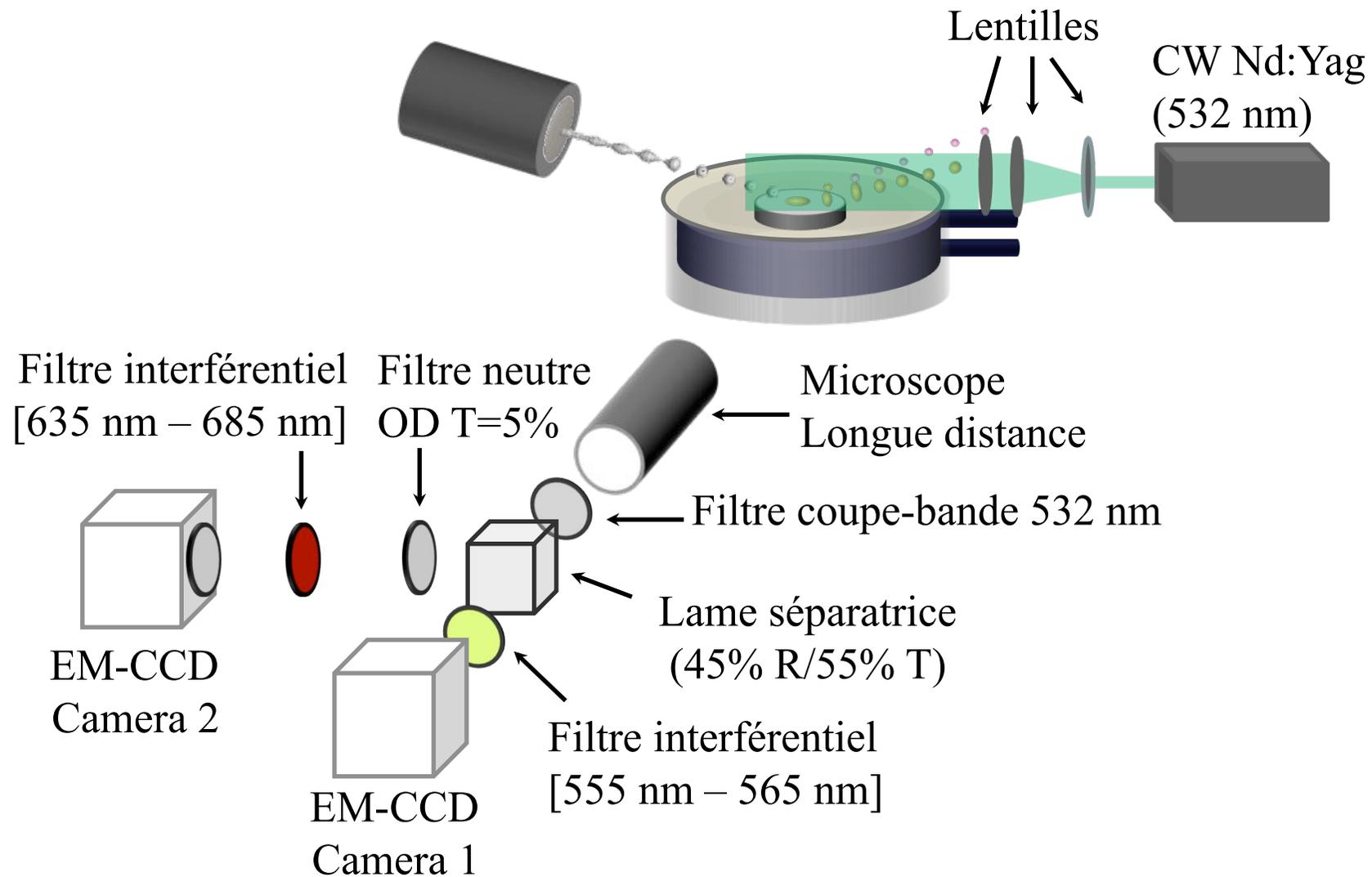
Rapport des intensités de 2 bandes spectrales :

$$R = \frac{K_1 I_0 V C e^{\beta_1/T}}{K_2 I_0 V C e^{\beta_2/T}} = K' e^{\frac{\beta_1 - \beta_2}{T}}$$

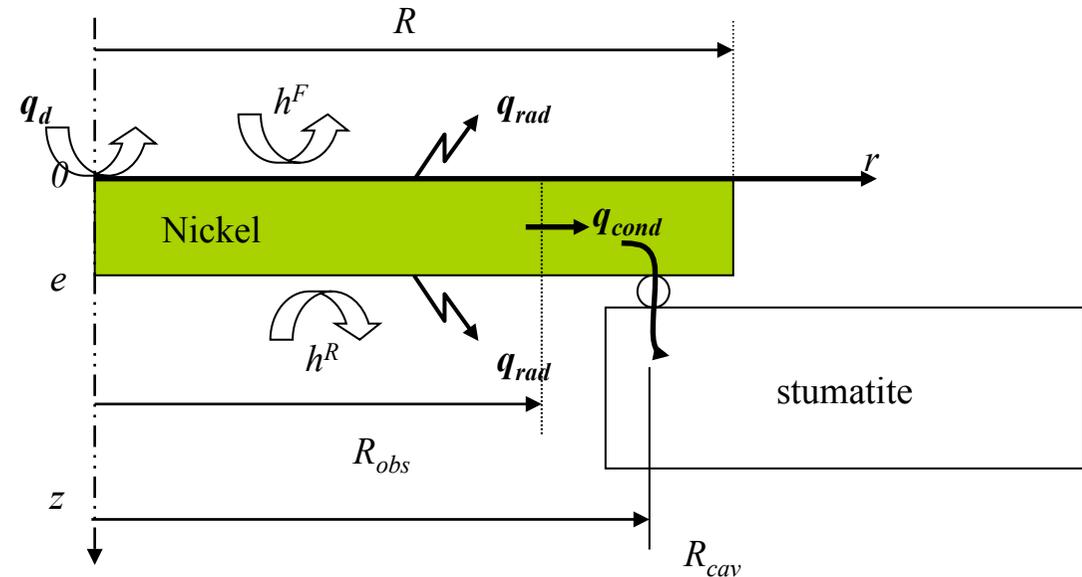
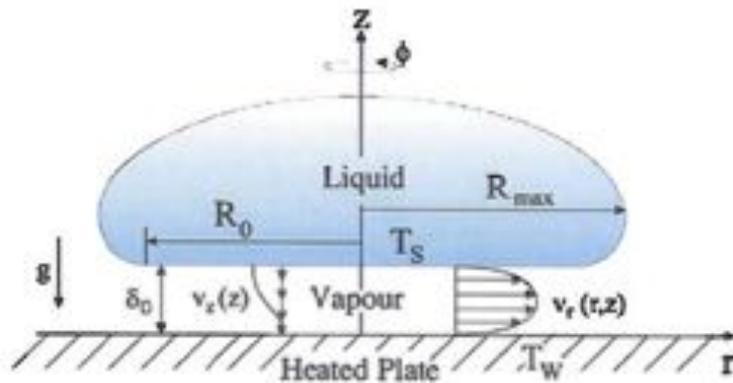
*Evolution de la sensibilité en température de la Rhodamine 640 en fonction de la longueur d'onde*

Calibration:  $\beta = (\beta_1 - \beta_2) = 1400$ , soit  $\frac{\Delta R_f}{\Delta T} \approx 1.6\% / ^\circ\text{C}$

# Installation expérimentale



# flux de chaleur du à l'impact des gouttes

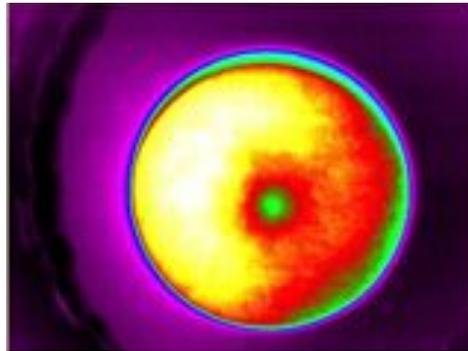


Pertes thermiques:

$$\frac{\partial^2 T'}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T'}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T'}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T'}{\partial \alpha^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T'}{\partial t}$$

- Impact des gouttes
- Convection
- Rayonnement
- Conduction

# flux de chaleur du à l'impact des gouttes



modèle réduit → moyenne angulaire

$$T(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} T'(r, \alpha, z, t) d\alpha$$

$$q_\beta(r, z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} q'_\beta(r, \alpha, z, t) d\alpha \quad \text{avec } \beta = R, F$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

Pertes :

→ Impact des gouttes

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=0} = h_F (T_F) (T_F - T_\infty) + \varepsilon_F \sigma (T_F^4 - T_\infty^4) + q_d(r, t)$$

→ Convection

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=e} = h_R (T) (T - T_\infty) + \varepsilon_R \sigma (T^4 - T_\infty^4) + K_{cond} \delta(r = R_{cav}) (T - T_{stum})$$

→ Rayonnement

$$-\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=R} = 0$$

→ Conduction

$$T = T_{init}(r, t) \quad \text{à } t = 0$$

$$K_{cond} \delta(r = R_{cav}) (T - T_{stum})$$

# Solution de l'équation de la chaleur

$$\bar{g}(r, z, p) = \int_0^{\infty} g(r, z, t) e^{-pt} dt \quad \text{and} \quad \tilde{g}_n(z, p) = \int_0^R \bar{g}(r, z, p) r J_0(\alpha_n r) dr$$

transformée de Laplace

transformée de Hankel

Equation à résoudre

$$\frac{\partial^2 \tilde{\theta}_n}{\partial z^2} - \gamma_n^2 \tilde{\theta}_n = 0 \quad \text{with} \quad \begin{cases} \theta(r, z, t) = T(r, z, t) - T_{init}(r, t = 0) \\ \gamma_n = \alpha_n^2 + \frac{p}{a} \\ \alpha_0 = 0 \quad \text{et} \quad \alpha_n R = n\pi + \frac{\pi}{4} - \frac{3}{8} \frac{1}{n\pi + \pi/4} \quad \text{si} \quad n \geq 1 \end{cases}$$

$$\lambda \left. \frac{\partial \tilde{\theta}_n}{\partial z} \right|_{z=0} = h_{EQ}^F \left( \tilde{\theta}_n - \frac{\tilde{\theta}_{\infty, n}}{p} \right) + \tilde{q}_{n,d}$$

$$-\lambda \left. \frac{\partial \tilde{\theta}_n}{\partial z} \right|_{z=e} = h_{EQ}^R \left( \tilde{\theta}_n - \frac{\tilde{\theta}_{\infty, n}}{p} \right) + k_n \left( \bar{\theta}(r = R_{cav}) - \frac{\tilde{\theta}_{stum, n}}{p} \right)$$

$$k_n = K_{cond} R R_{cav} J_0(\alpha_n R_{cav})$$

# Solution de l'équation de la chaleur

→ Solution

$$\tilde{\theta}_n^R = -\tilde{Z}_n^A (p + a\alpha_n^2) \tilde{q}_{d,n} + \tilde{Z}_n^B (p + a\alpha_n^2) \frac{\tilde{\theta}_{\infty,n}}{p} + \tilde{Z}_n^C (p + a\alpha_n^2) \left[ \frac{\tilde{\theta}_{stun,n}}{p} - \bar{\theta}(r = R_{cav}) \right]$$

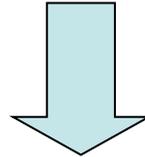
$$\tilde{Z}_n^A(p)^{-1} = (h_{EQ}^R + h_{EQ}^F) \cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) + \frac{h_{EQ}^R h_{EQ}^F}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}} \sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) + \lambda\sqrt{\frac{p}{a}} \sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right)$$

$$\tilde{Z}_n^B(p) = \left( h_{EQ}^F + h_{EQ}^R \cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) + \frac{h_{EQ}^R h_{EQ}^F}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}} \sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \right) \tilde{Z}_n^A(p)$$

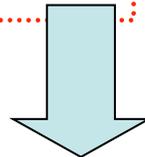
$$\tilde{Z}_n^C(p) = k_n \left( \cosh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) + \frac{h_{EQ}^F}{\lambda\sqrt{\frac{p}{a}}} \sinh\left(e\sqrt{\frac{p}{a}}\right) \right) \tilde{Z}_n^A(p)$$

# représentation matricielle de la solution

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_n^R(t) = & - \left[ e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^A(t) \right] * \tilde{q}_{d,n}(t) + \left[ \int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^B(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{\infty,n} \\ & + \left[ \int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^C(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{stum,n} - \left[ e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^A(t) \right] * \theta(r = R_{cav}, t) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_n^R(t) - \left[ \int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^B(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{\infty,n} - \left[ \int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^C(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{stum,n} \\ + \left[ e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^A(t) \right] * \theta(r = R_{cav}, t) = - \left[ e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^A(t) \right] * \tilde{q}_{d,n}(t) \end{aligned}$$



$$\tilde{\theta}_n = X_n \tilde{q}_{d,n}$$

## Solution du système (espace de Hankel)

$$\tilde{\theta}_n = X_n \tilde{q}_{d,n} \longrightarrow \tilde{q}_{d,n} = \left( X_n^t X_n \right)^{-1} X_n^t \tilde{\theta}_n$$

## Retour dans l'espace réel (r,t)

$$q_d(r,t) = \frac{2}{R^2} \sum_0^{nh} \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} \tilde{q}_{d,n}$$

nh: nombre optimal d'harmonique (on tronque une série infinie)

# Protocole expérimental

→ essai de relaxation (sans goutte) : estimation des pertes

→ essais avec gouttes:

→  $T(x,y,t) \rightarrow T(r,t) \rightarrow$  Estimation des harmoniques  $\tilde{\theta}_n$

→ Estimation du « flux » [W]

$$q_d(t) = \int_0^R \left( \frac{2}{R^2} \sum_0^{nh} \frac{J_0(\alpha_n r)}{J_0^2(\alpha_n R)} \tilde{q}_{d,n} \right) 2\pi r dr$$

→ et finalement, on obtient l'énergie perdue pour l'impact d'une goutte

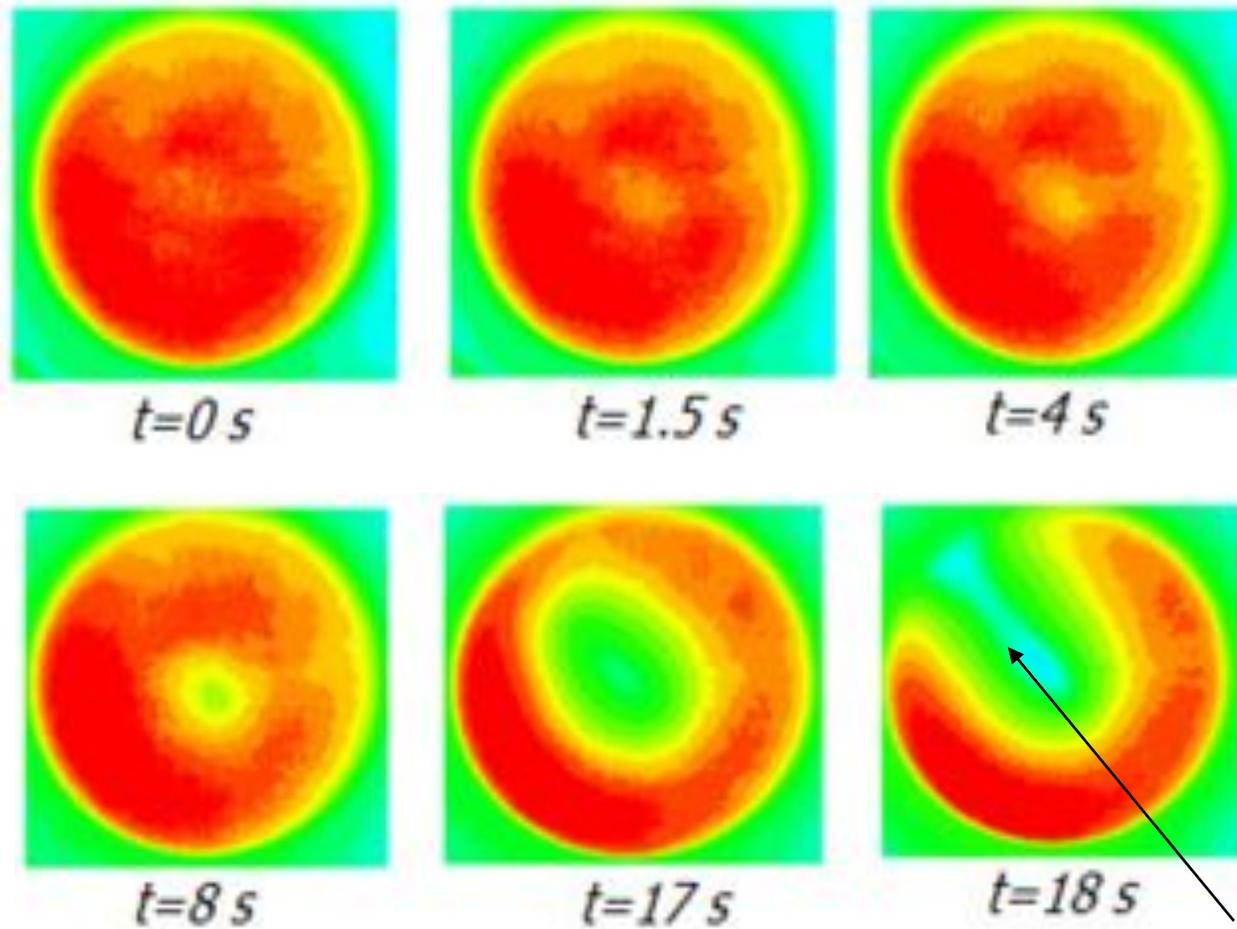
$$E_{1d}(t) = \frac{q_d(t)\Delta t}{n_{gouttes}} = \frac{q_d(t)}{n_{gouttes} f_{camera}} = \frac{q_d(t)}{f_{inj}}$$

→ HTC pour 1 goutte

$$HTC = \frac{E_{1d}}{S_d t_R (T_{wall} - T_{sat})}$$

# Résultats expérimentaux

$$D = 250 \mu\text{m}, V_n = 3.5 \text{ m.s}^{-1}, f_{inj} = 10 \text{ kHz}$$

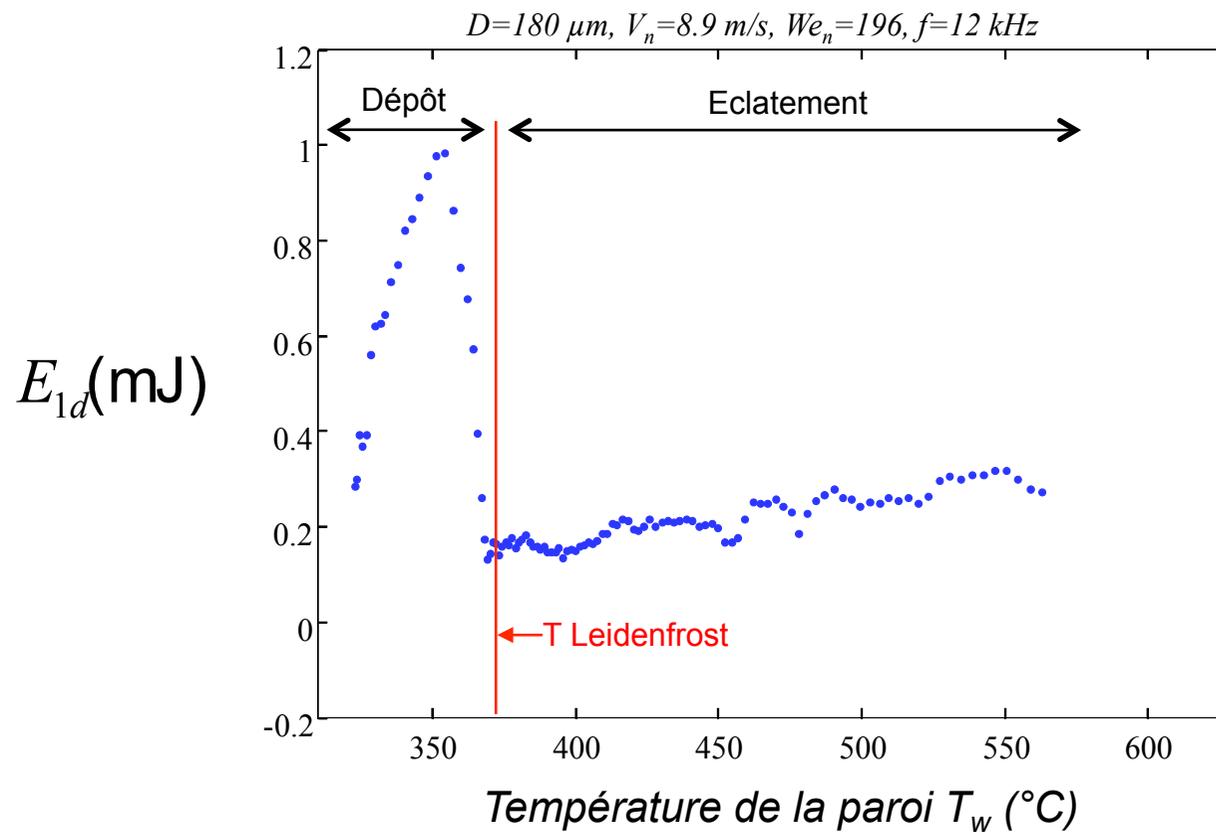


Images caméra IR

Déposition  
d'un film liquide

# Résultats expérimentaux

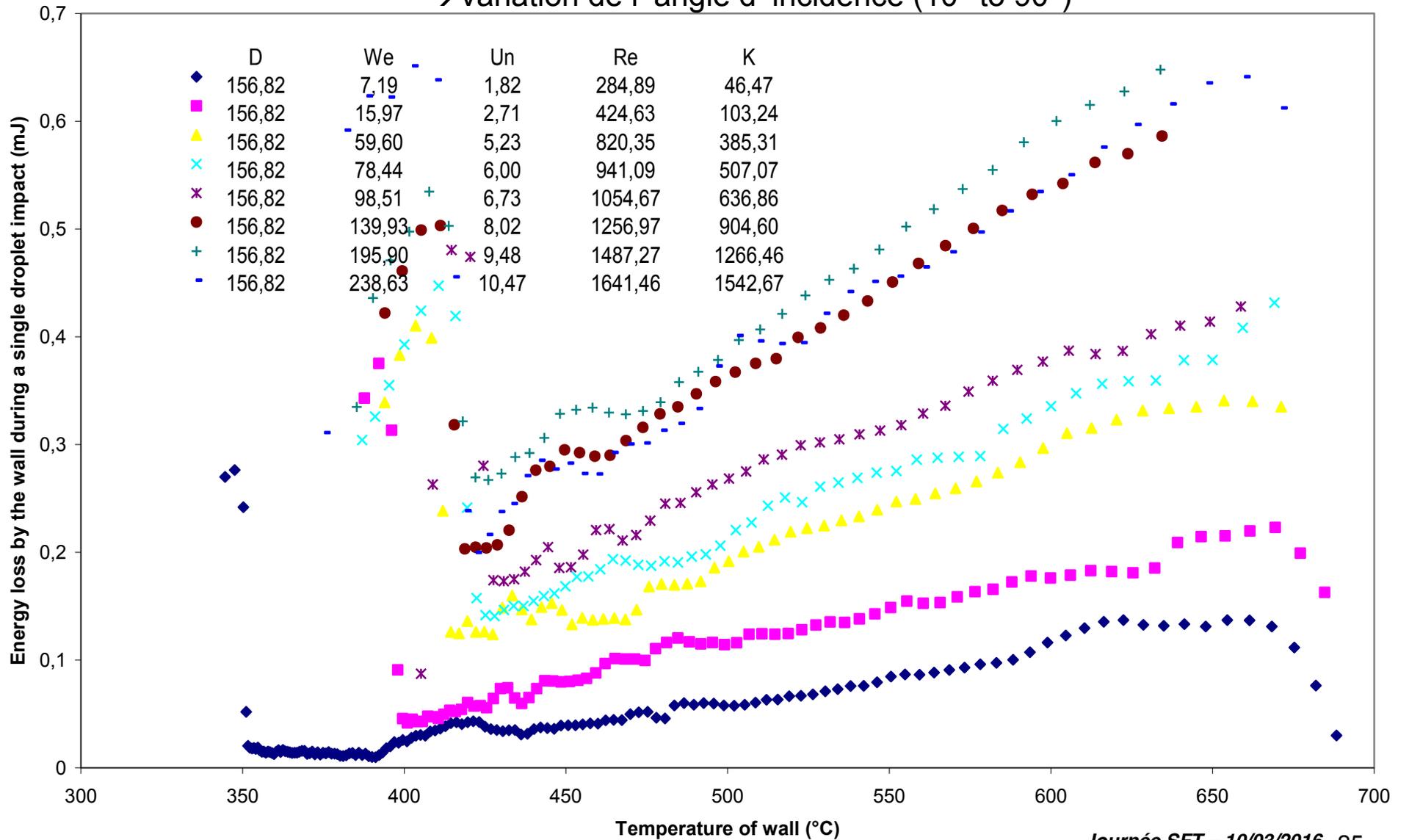
Chaleur prélevée à la paroi par une goutte:  $E_{1d}(t) = \frac{q_d(t)}{f_{inj}}$



# Mesure de l'énergie

→ D=Cte

→ Variation de l'angle d'incidence (10° to 90°)

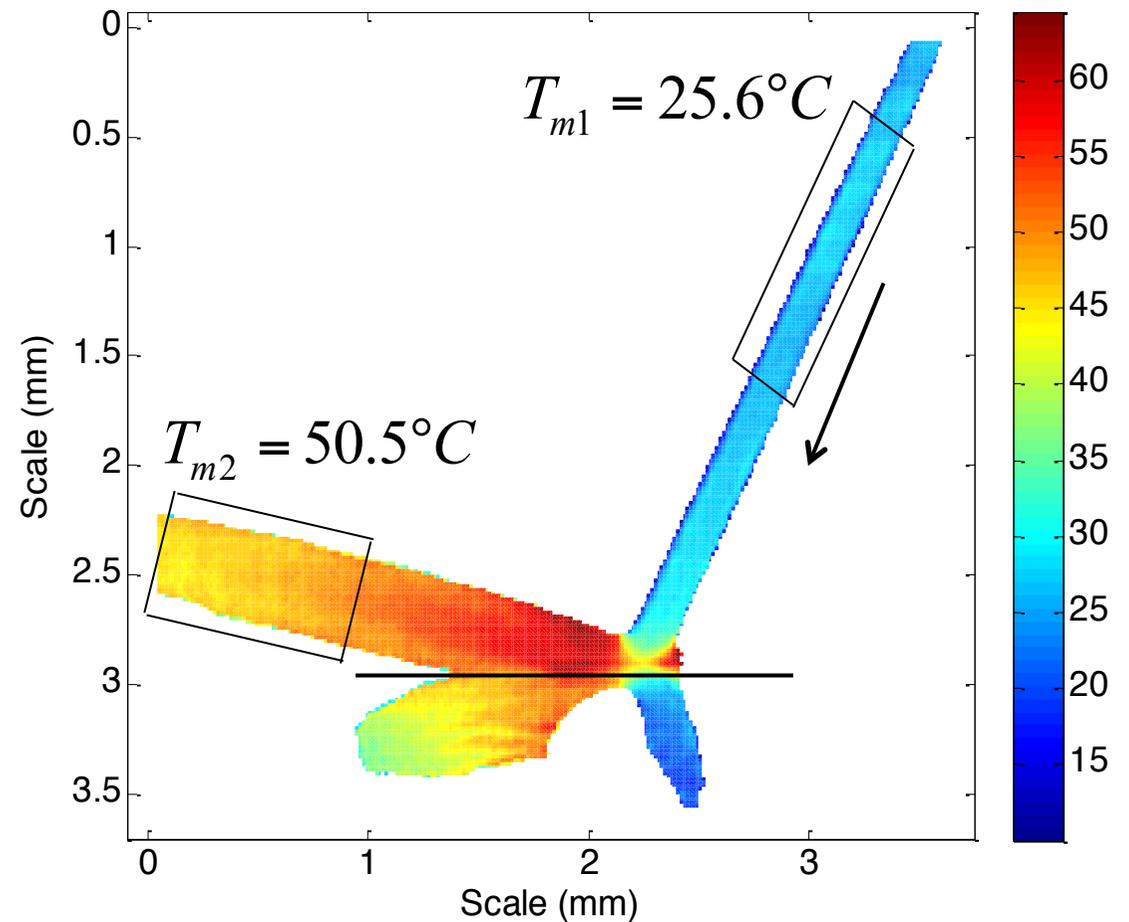
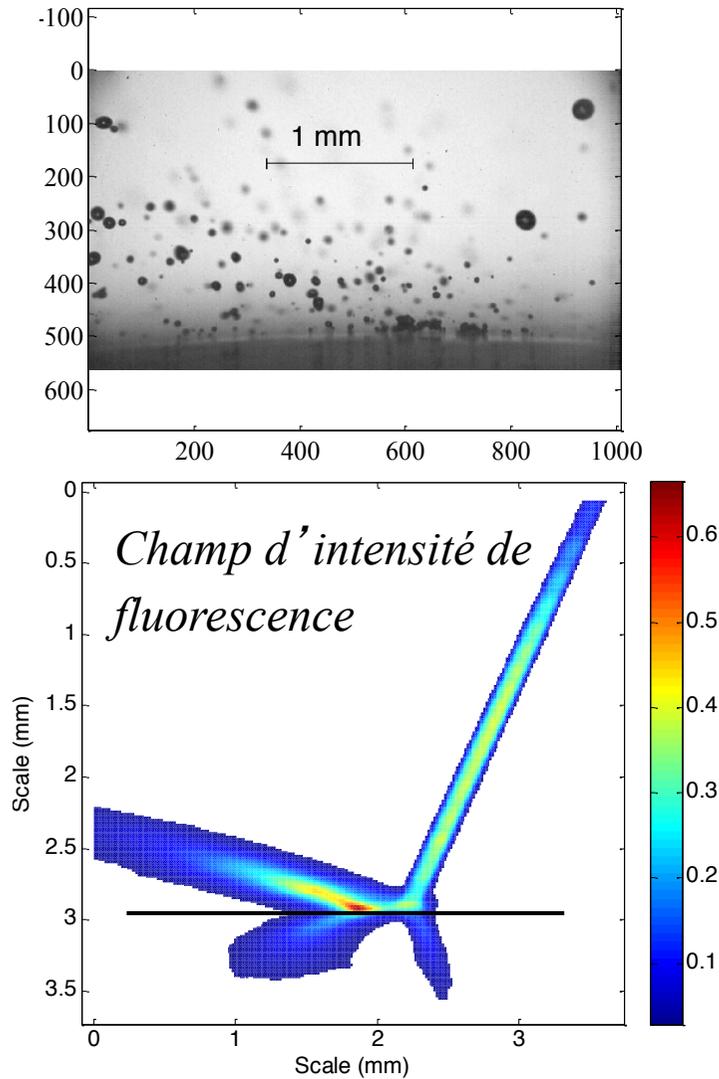


# Résultats expérimentaux

$D=180 \mu\text{m}$ ,  $V=11 \text{ m/s}$ ,  $f=12 \text{ 000Hz}$ ,  $T_w=540^\circ\text{C}$ ,  $We_n=220$

*Image caméra rapide*

*Champ de température*



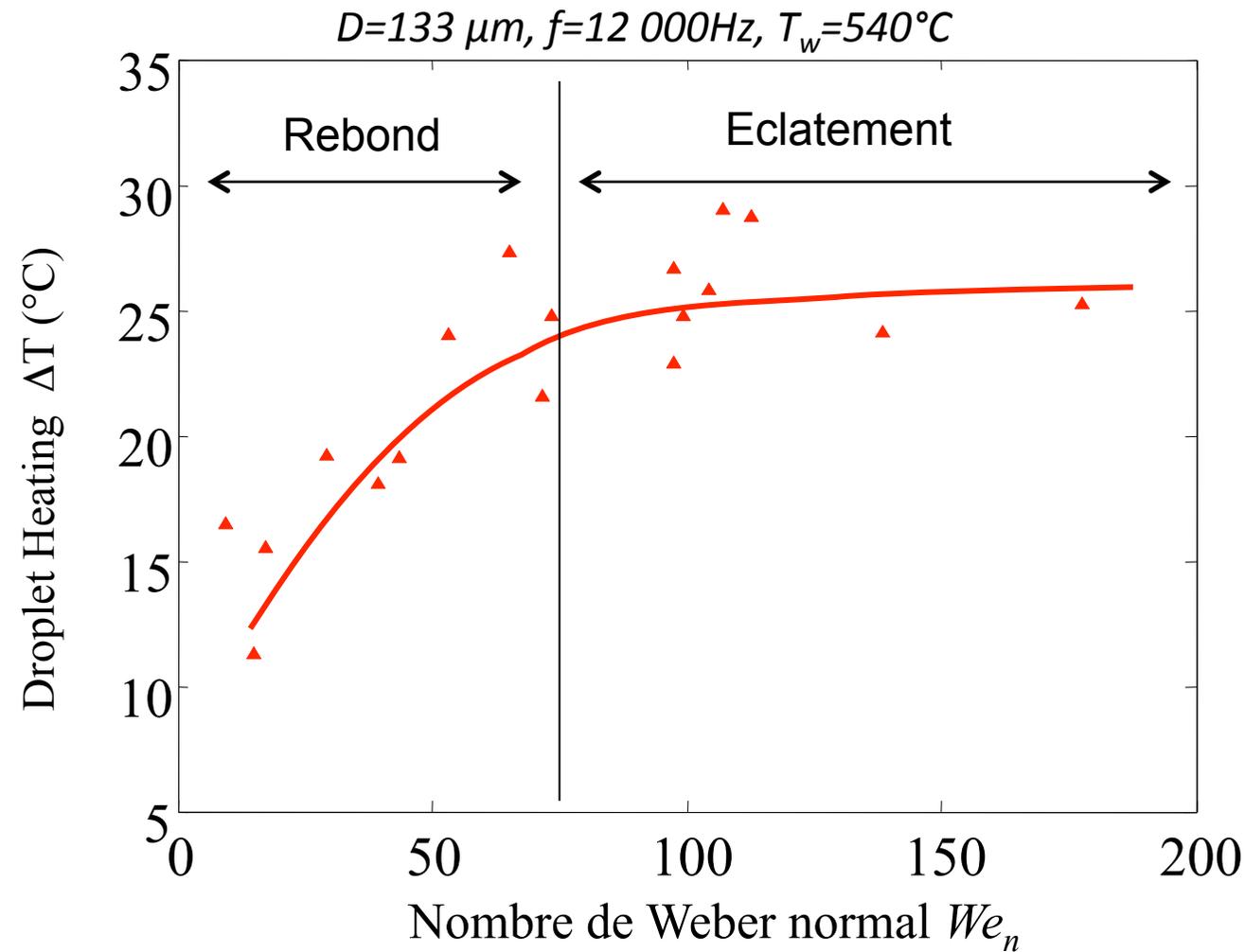
Calcul de la température moyenne:

$$T_m = \iint_{ROI} T(x, y) I_f(x, y) dx dy / \iint_{ROI} I_f(x, y) dx dy$$

# Résultats expérimentaux

## Echauffement des gouttes $\Delta T$

- Influence de  $We_n$  :

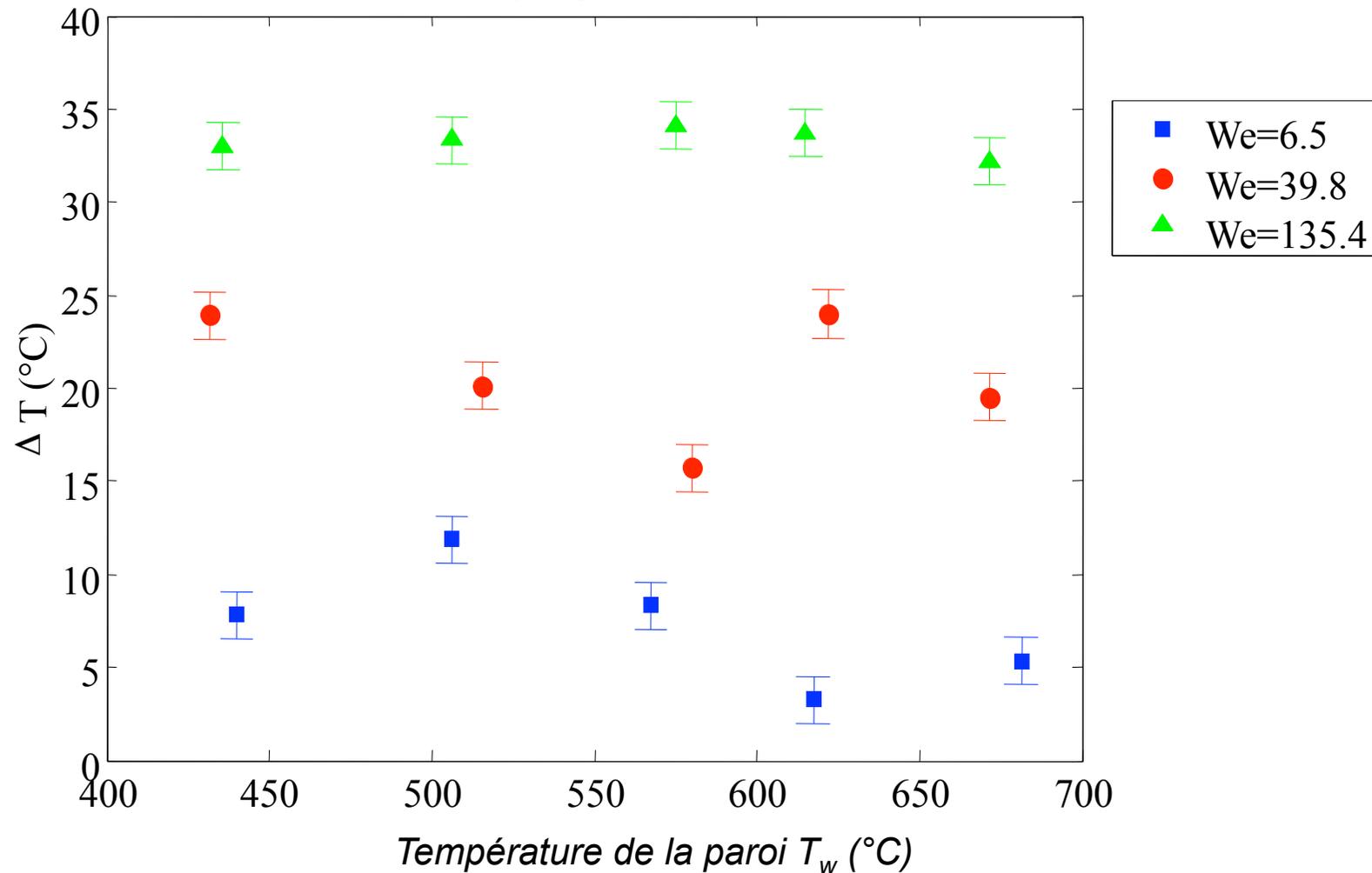


# Résultats expérimentaux

## Echauffement des gouttes $\Delta T$

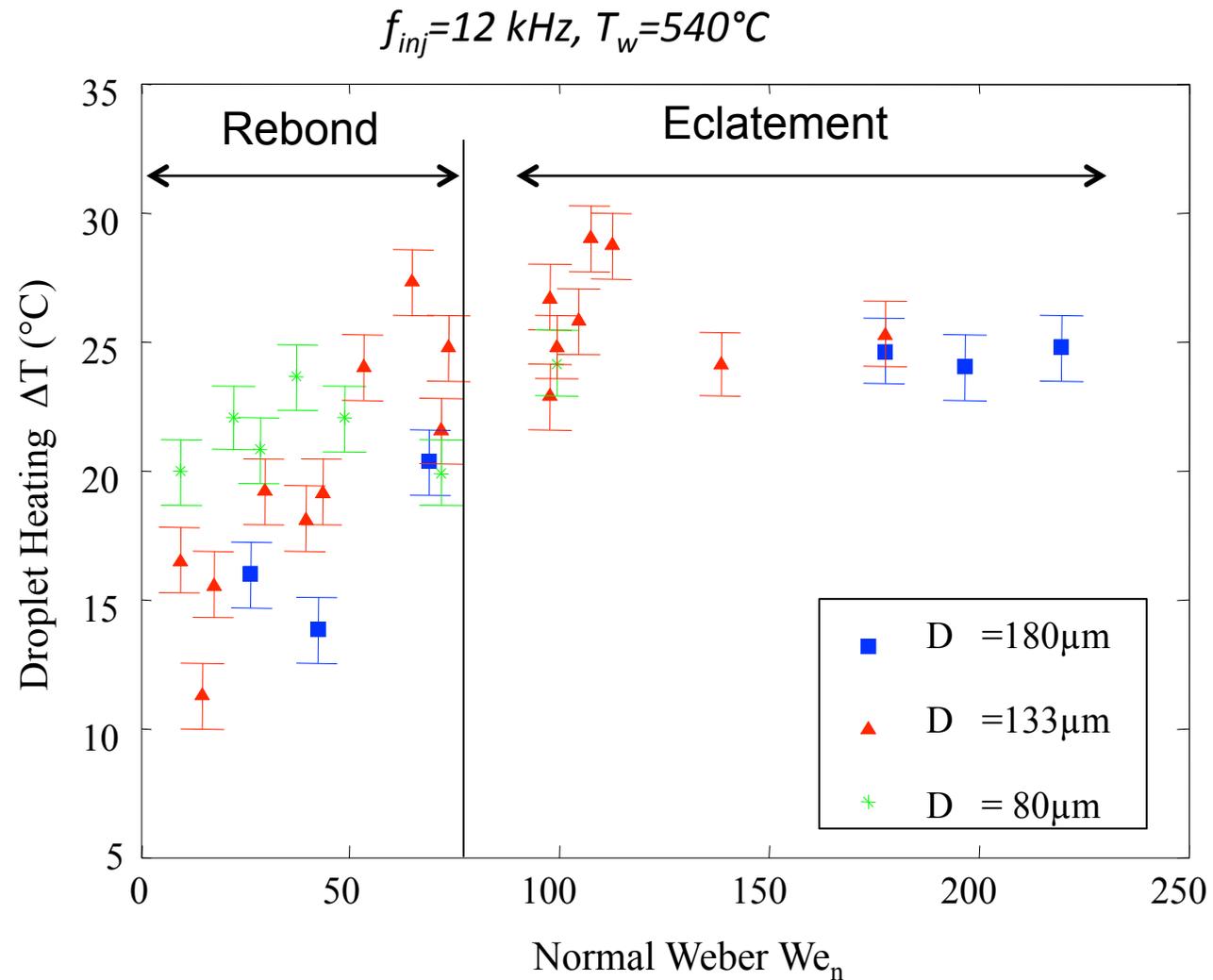
- Influence de la température de paroi

$D=139 \mu\text{m}$ ,  $f=12\ 500\text{Hz}$



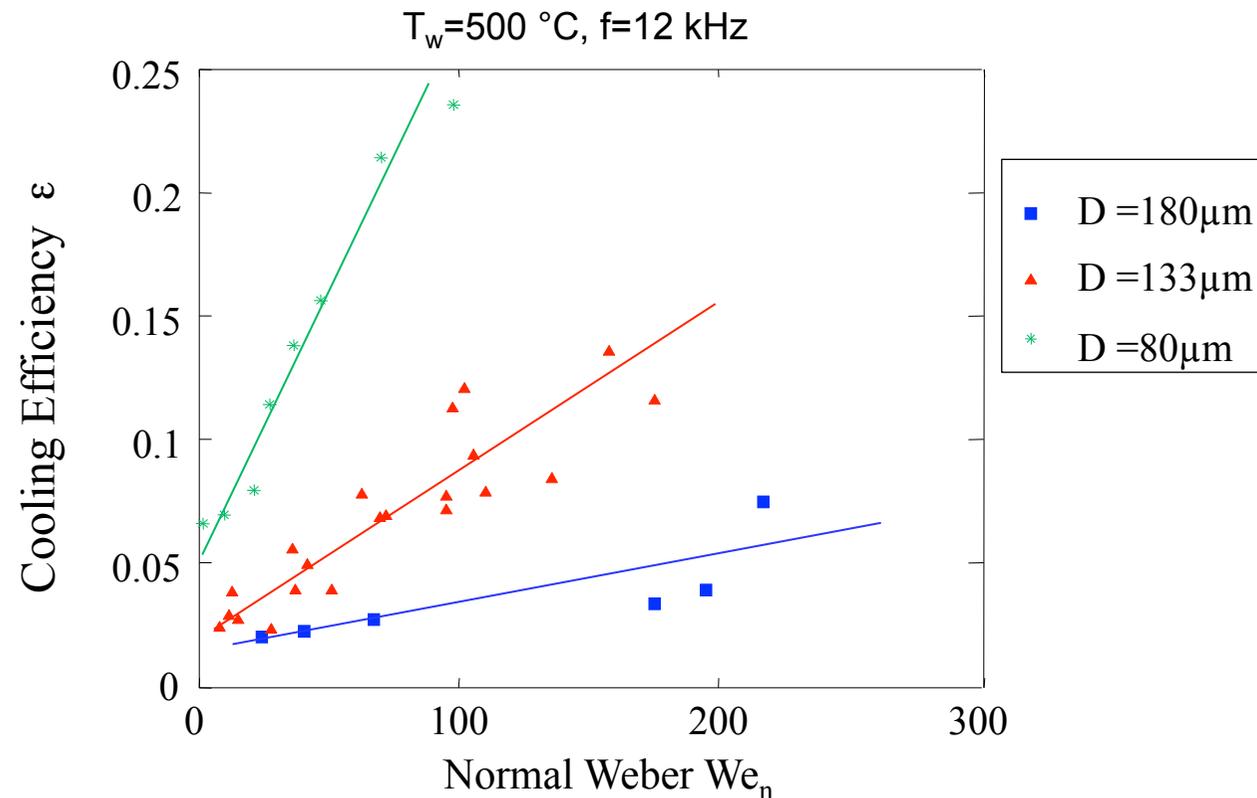
## Echauffement des gouttes $\Delta T$

- Influence de la taille des gouttes



## Chaleur prélevée par les gouttes à la paroi $Q_{w,1d}$

- Influence de la taille des gouttes



Efficacité du refroidissement:

$$\varepsilon = \frac{Q_{w,1d}}{m \left( L_v + C_{p_l} (T_b - T_{inj}) \right)}$$

$m$  : masse de la goutte incidente

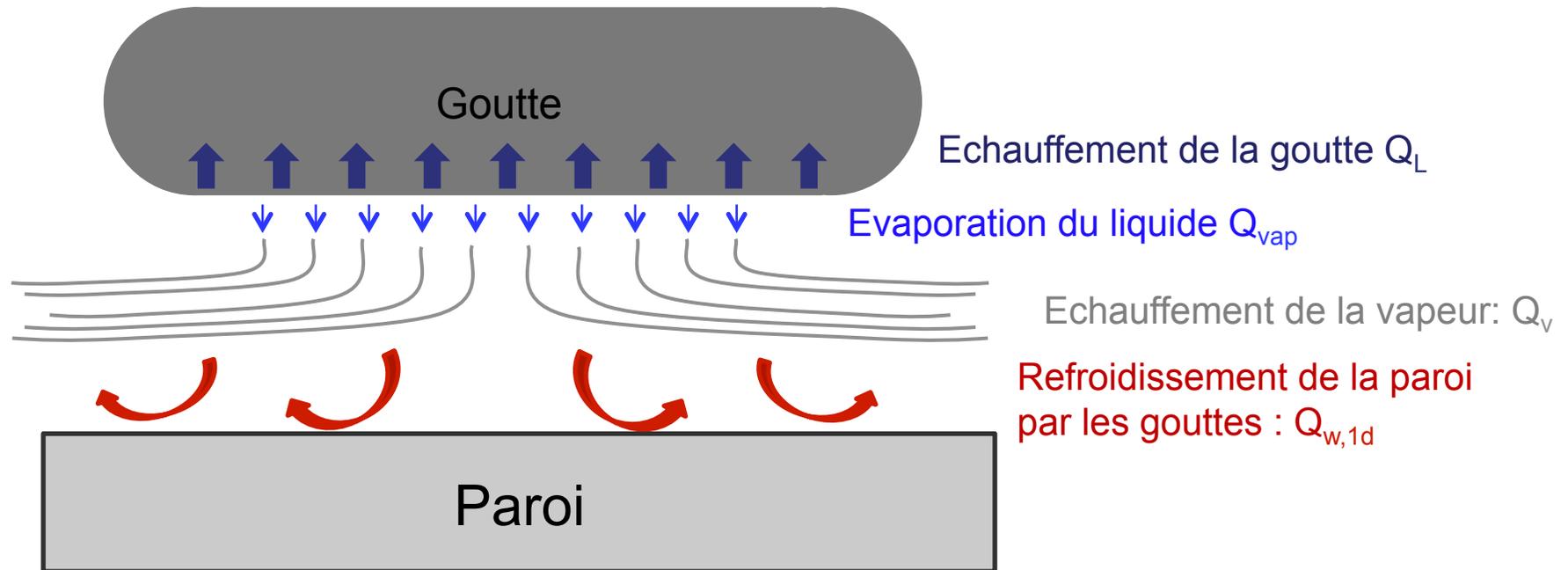
$Q_{w,1d}$  : Chaleur prélevée à la paroi par goutte

$T_b$  : Température d'ébullition

$T_{inj}$  : Température d'injection

## Masse de liquide évaporée $\Delta m$

Bilan :  $Q_{w,1d} = Q_L + Q_{vap} + Q_v$



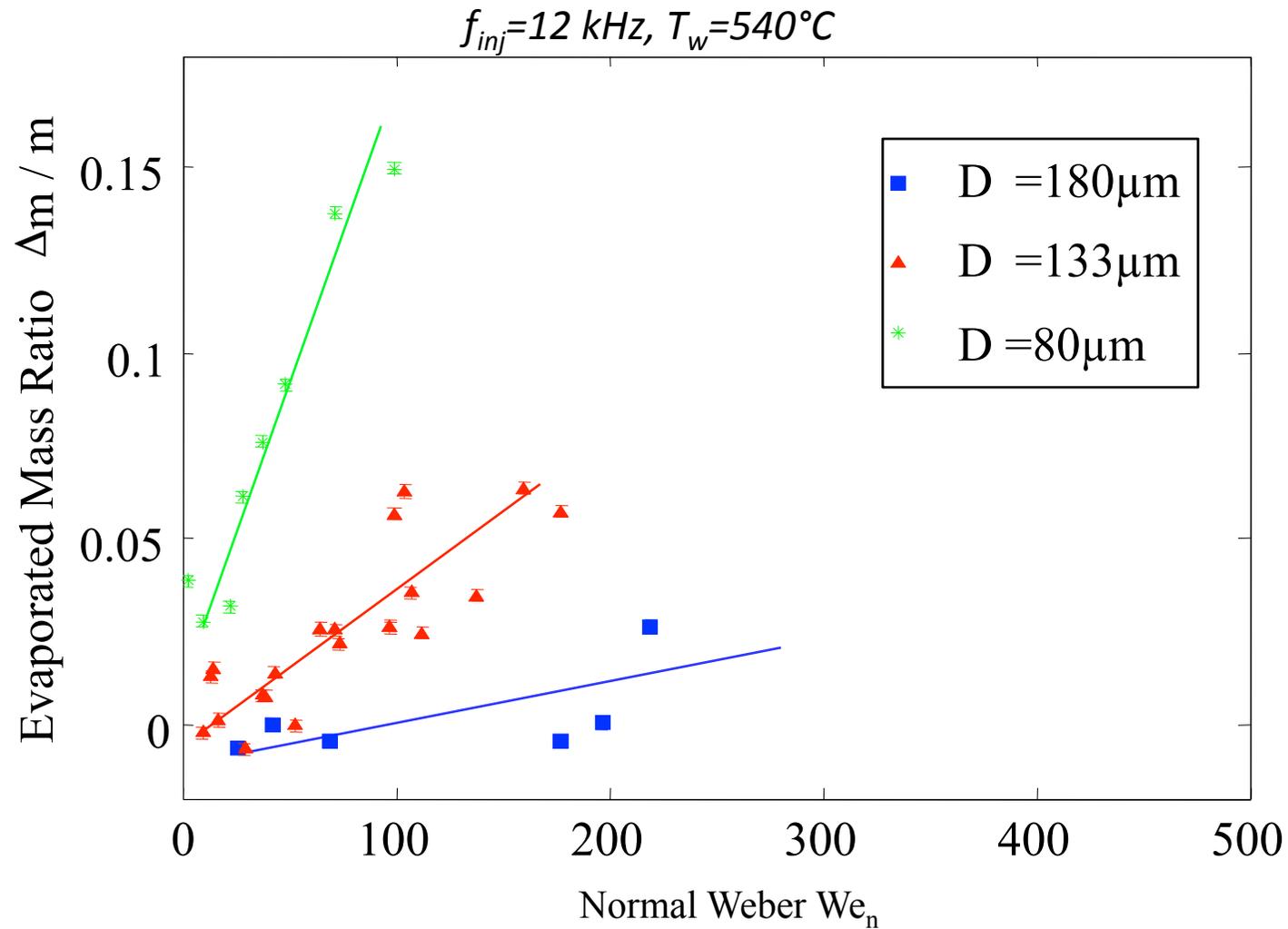
$$Q_L = m C_{p_l} \Delta T_{LIF} + \Delta m C_{p_l} (T_S - T_l)$$

$$Q_{vap} = L_v \Delta m$$

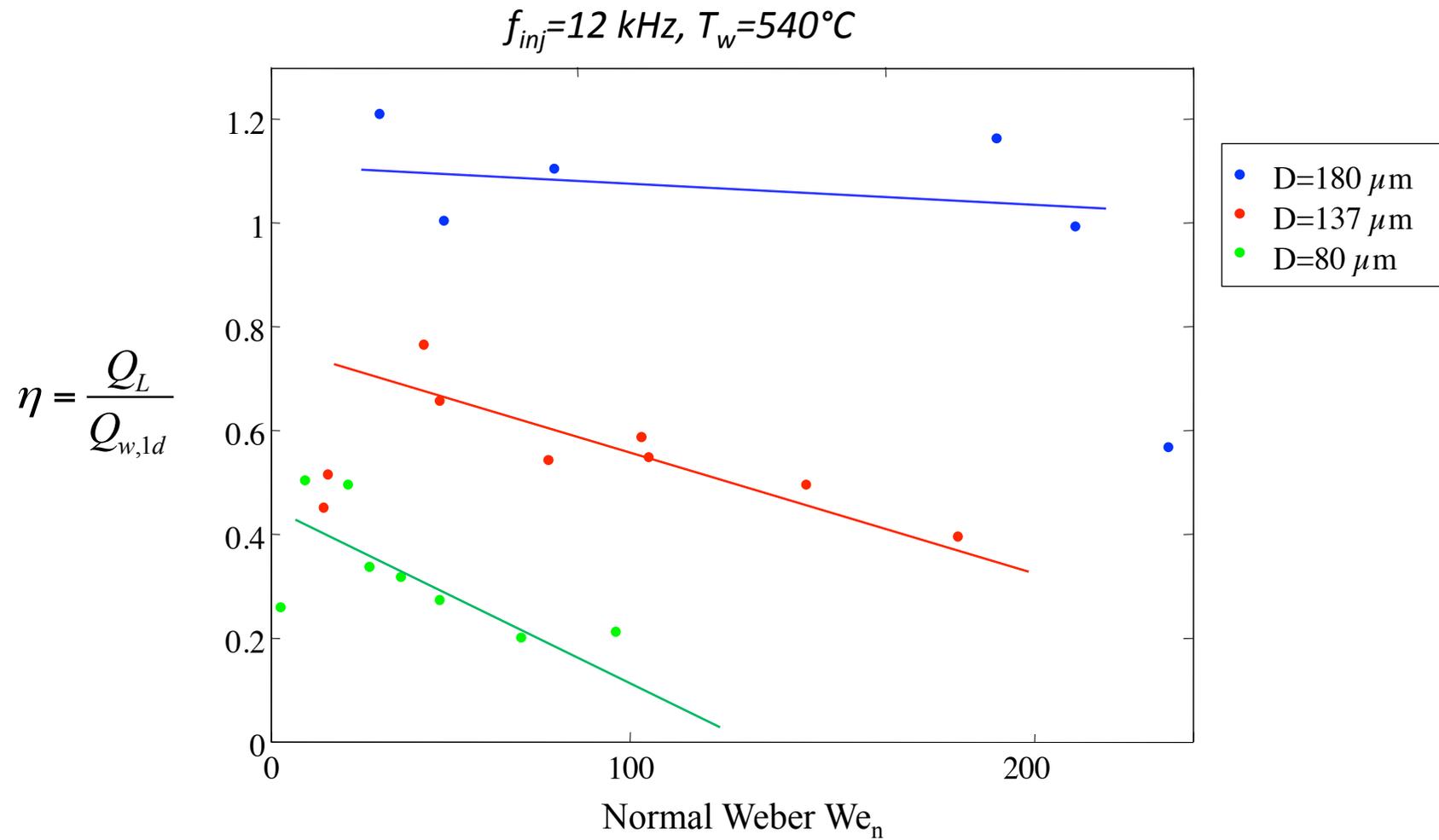
$$Q_v = \Delta m C_{p_v} \Delta T_v$$

simplification:  $\Delta T_v = (T_w - T_b)$

$$T_S = T_b$$

Masse de liquide évaporée  $\Delta m$ 

## Contribution de la chaleur sensible au refroidissement



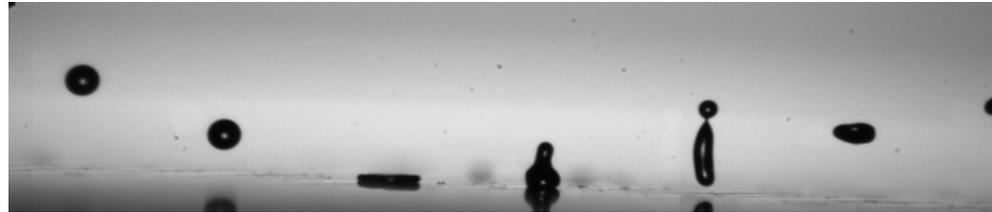
# Conclusions

Estimation des différents flux de chaleur et mise en évidence de l'influence de la taille et de la vitesse des gouttes.

## ► Influence d'autres paramètres?

- Liquide
- Température d'injection du liquide
- Fréquence d'injection
- Interactions latérales (jets de gouttes parallèles)
- Effusivité thermique de la paroi
- Rugosité de la paroi

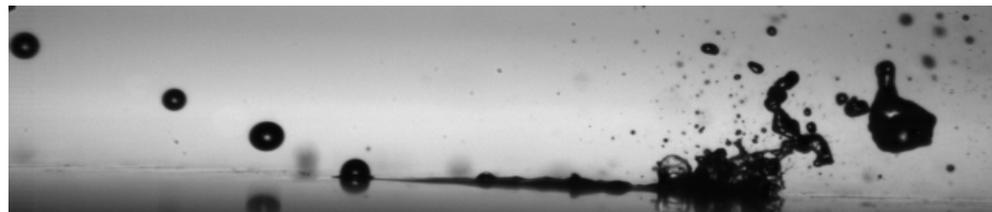
# Perspectives



$$T_{\text{wall}} > T_{\text{Leidenfrost}}$$



$$T_{\text{wall}} \sim T_{\text{Leidenfrost}}$$



$$T_{\text{wall}} < T_{\text{Leidenfrost}}$$