

Estimation du flux de chaleur extrait à la paroi lors de l'impact d'une goutte

T. Potaufeux^{1*}, O. Caballina¹, G. Castanet¹

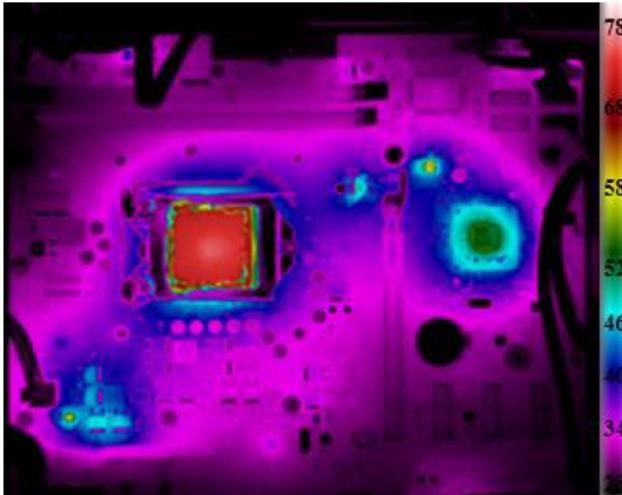
¹Université de Lorraine, CRNS, LEMTA, Nancy

*thomas.potaufeux@univ-lorraine.fr

Refroidissement par spray



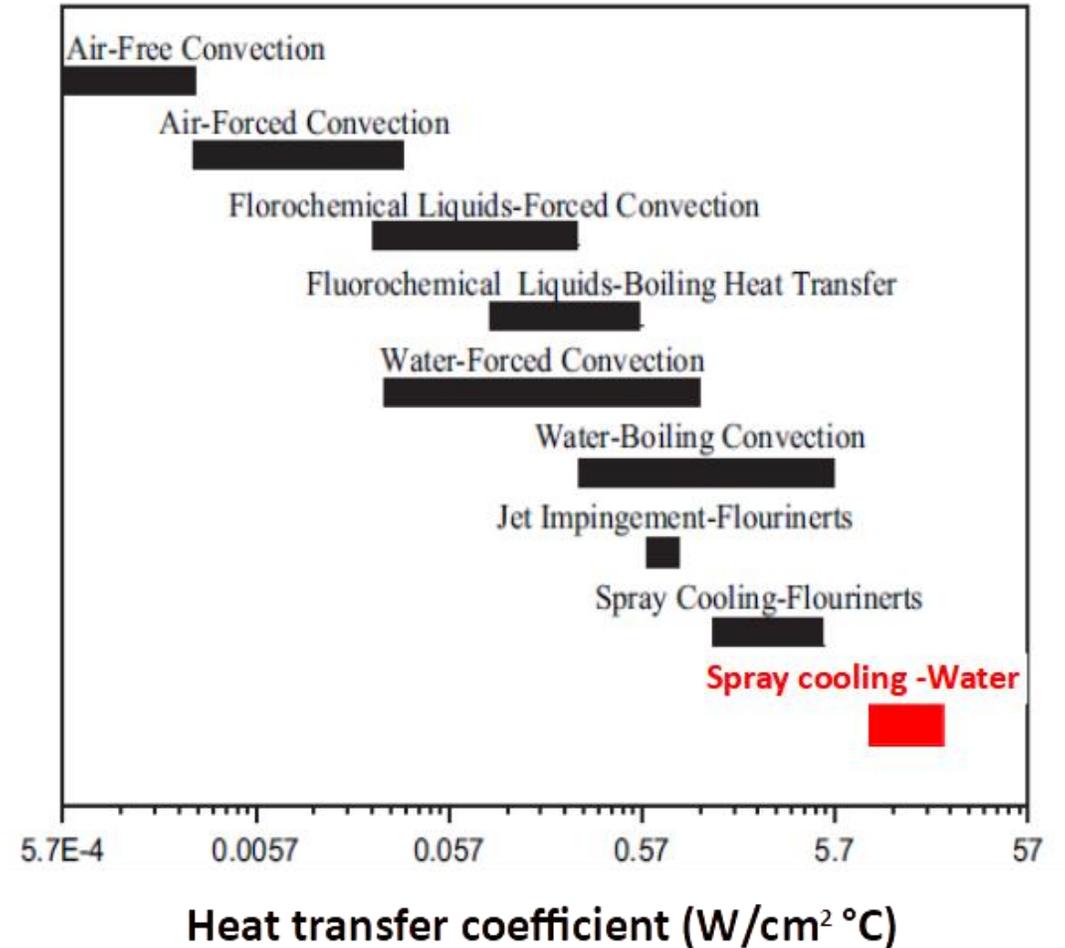
Utilisation industrielle de refroidissement par spray à haute température



Cartographie thermographique IR d'une carte mère (plus basse température)

Figure 1. Infrared (IR) image for an active computing system (Intel Core i5 3470 Processor) running 400.perlbenc benchmark.

Lee, Soochan, et al. "Harvesting CPU waste heat through pyroelectric materials." *International Electronic Packaging Technical Conference and Exhibition*. Vol. 56888. American Society of Mechanical Engineers, 2015.



Nayak, S. K., Mishra, P. C., & Parashar, S. K. S. (2016). Influence of spray characteristics on heat flux in dual phase spray impingement cooling of hot surface. *Alexandria Engineering Journal*, 55(3), 1995-2004.

Avantage :

Flux maximal

Répartition homogène du refroidissement

Fluide = eau donc non polluante

Très économique en énergie

Facile à mettre en œuvre



Désavantage :

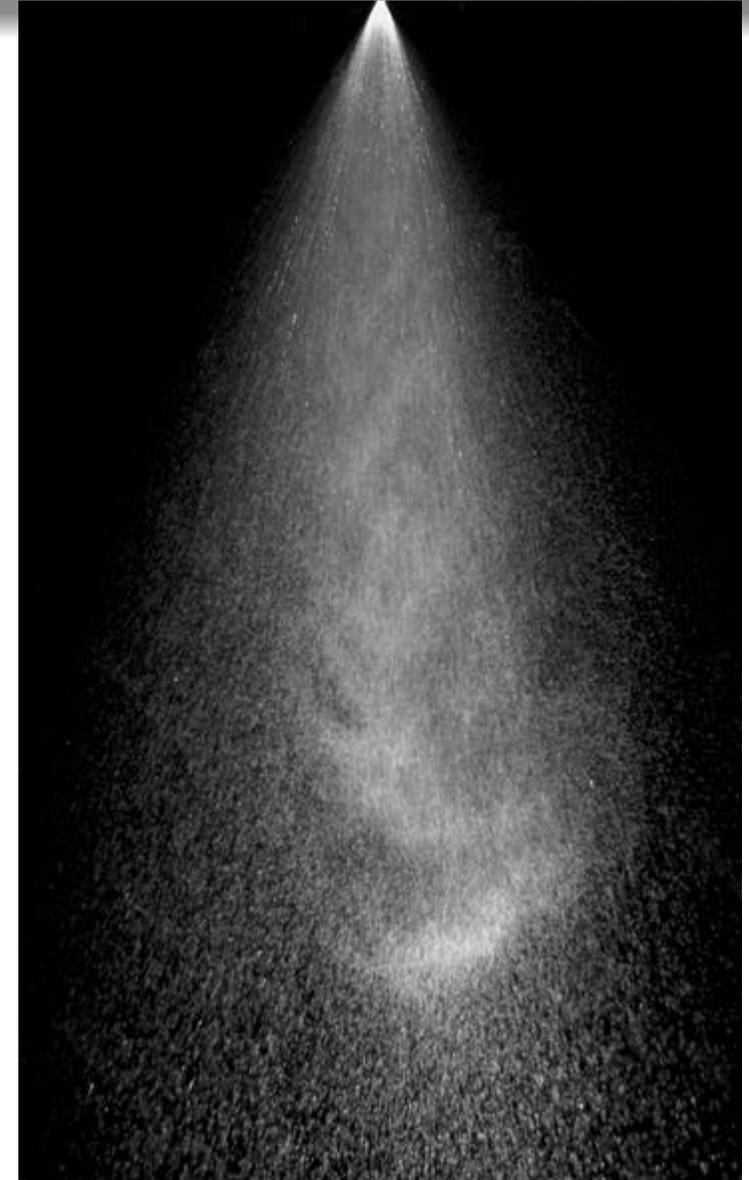
Méthode encore largement
incomprise

➔ Prévission efficacité impossible

Du spray ...

Un spray est caractérisé par :

- L'angle du spray
- Son paterne
- La distribution de la taille de ses gouttes
- La distribution spatiale de ses gouttes
- La distribution spatiale de la vitesse des gouttes
- La vitesse d'impact
- La capacité volumique du spray
- ...

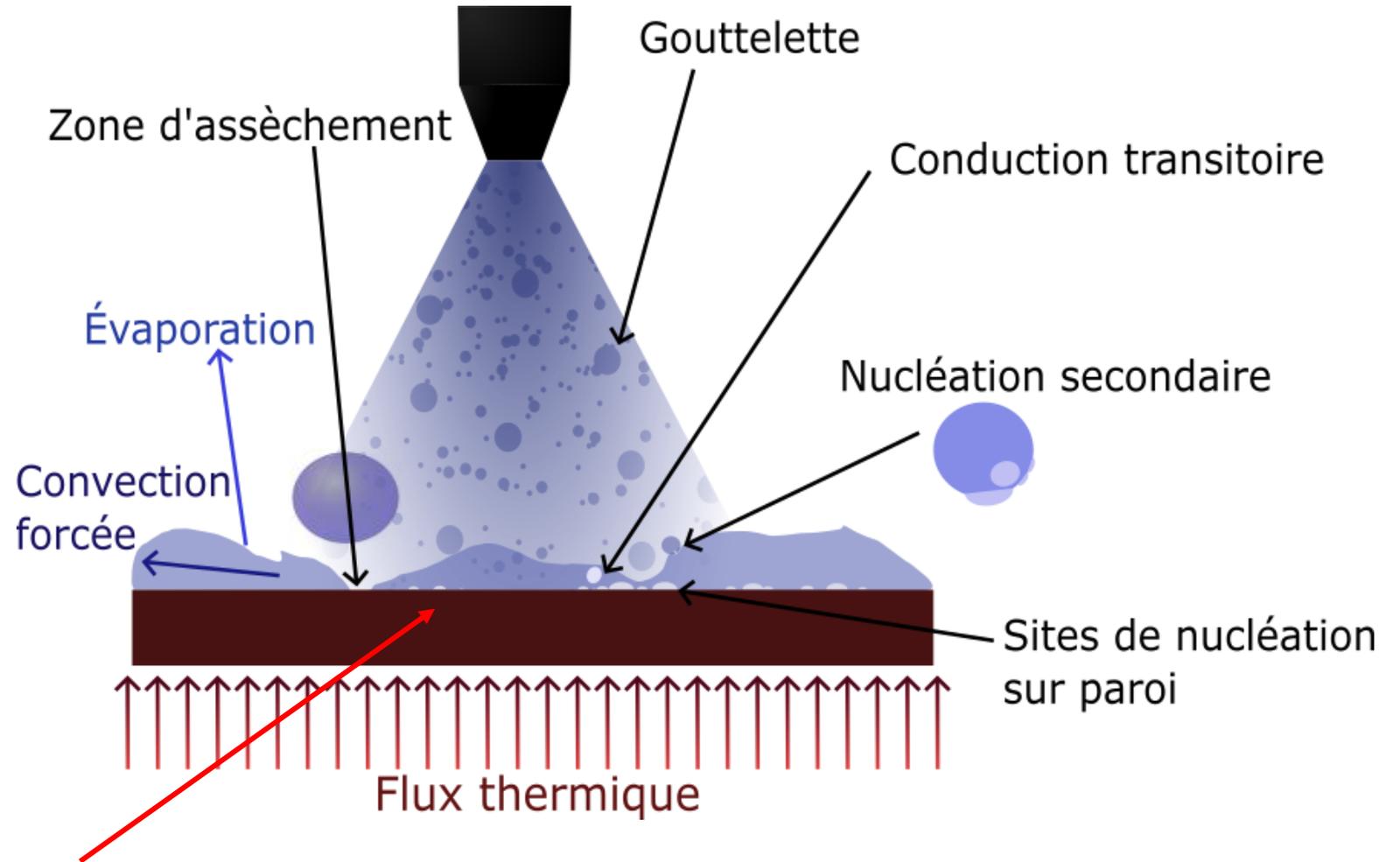


Du spray ...

Un spray est caractérisé par :

- L'angle du spray
- Son paterne
- La distribution de la taille de ses gouttes
- La distribution spatiale de ses gouttes
- La distribution spatiale de la vitesse des gouttes
- La vitesse d'impact
- La capacité volumique du spray

...



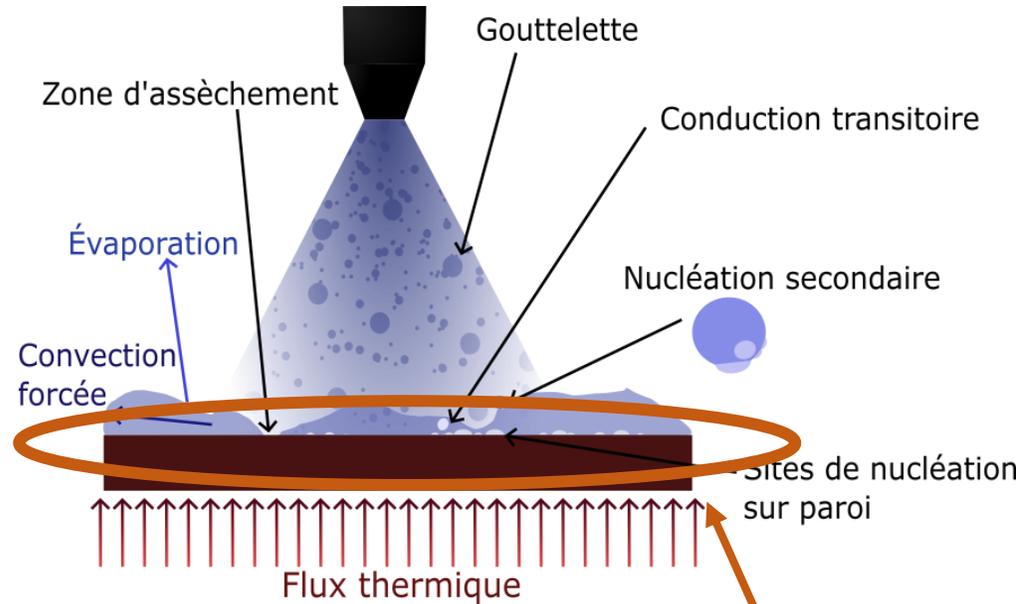
Interactions spatiales et temporelles lors des impacts

Du spray ...

Un spray est caractérisé par :

- L'angle du spray
- Son paterne
- La distribution de la taille de ses gouttes
- La distribution spatiale de ses gouttes
- La distribution spatiale de la vitesse des gouttes
- La vitesse d'impact
- La capacité volumique du spray

...



Interactions spatiales et temporelles lors des impacts

- Nombre de Reynolds (Re)
- Nombre de Jakob (Ja)

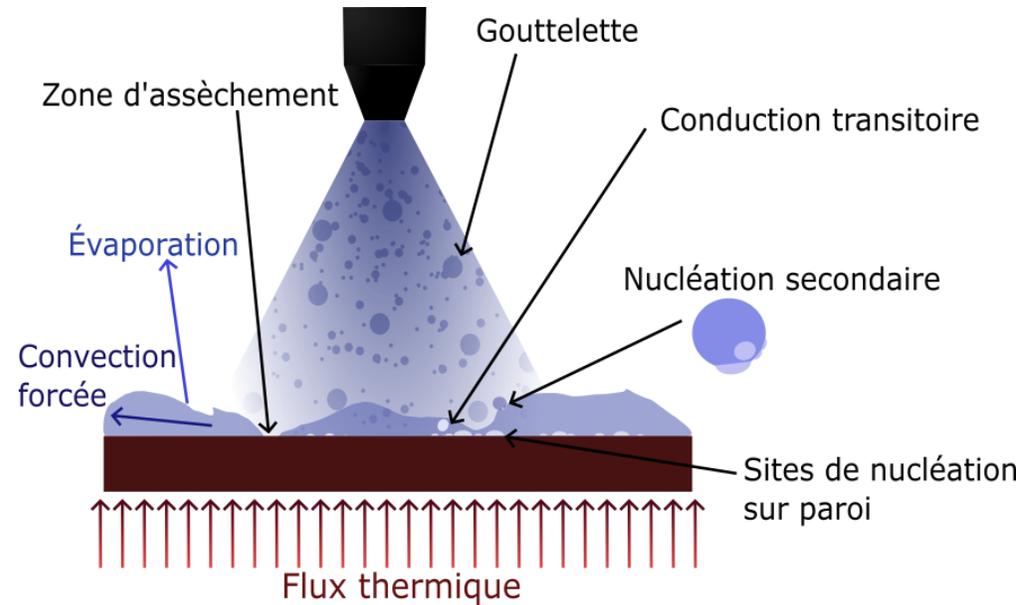
- Température de la surface
- Texturation de la surface
- Mouillabilité de la surface
- Conductivité thermique

Un spray est caractérisé

par :

- L'angle du spray
- Son paterne
- La distribution de la taille de ses gouttes
- La distribution spatiale de ses gouttes
- La distribution spatiale de la vitesse des gouttes
- La vitesse d'impact
- La capacité volumique du spray

...



Interactions spatiales et temporelles lors des impacts

- Nombre de Reynolds (Re)
- Nombre de Jakob (Ja)

-Température de la surface

-Texturation de la surface

-Mouillabilité de la surface

-Conductivité thermique

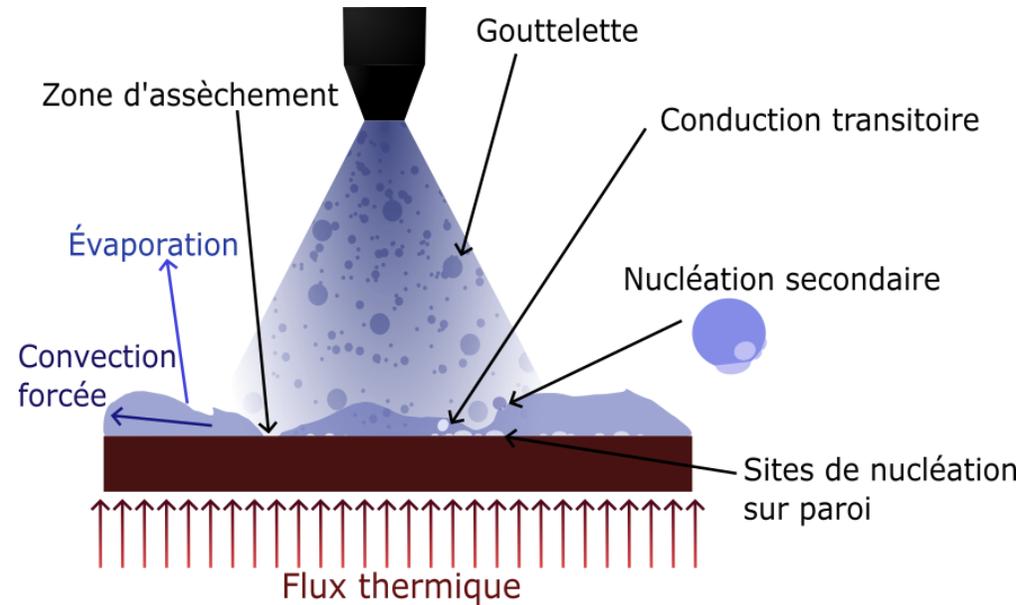
Tous ces paramètres et phénomènes impactent l'effet du flux thermique



... à la goutte

Un spray est caractérisé par :

- L'angle du spray
- Son paterne
- La distribution de la taille de ses gouttes
- La distribution spatiale de ses gouttes
- La distribution spatiale de la vitesse des gouttes
- La vitesse d'impact
- La capacité volumique du spray



Interactions spatiales et temporelles lors des impacts

- Nombre de Reynolds (Re)
- Nombre de Jakob (Ja)
- Température de la surface
- Texturation de la surface
- Mouillabilité de la surface
- Conductivité thermique

Tous ces paramètres et phénomènes impactent l'effet du flux thermique

➔ Passage à 1 seule goutte afin de limiter les paramètres



Objectifs de la thèse

Tous ces paramètres et phénomènes impactent l'effet du flux thermique

→ Passage à 1 seule goutte afin de limiter les paramètres

Influence de 3 facteurs sur le flux thermique extrait de la paroi

La température de surface de 80°C à 400°C

Nombre de We de 30 à 200

$$We = \frac{\rho D v^2}{\sigma}$$

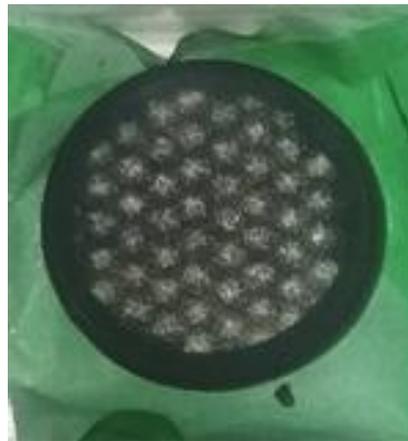
Texture de surface/mouillabilité

Influence de 3 facteurs sur le flux thermique extrait de la paroi

La température de surface de 80°C à 400°C

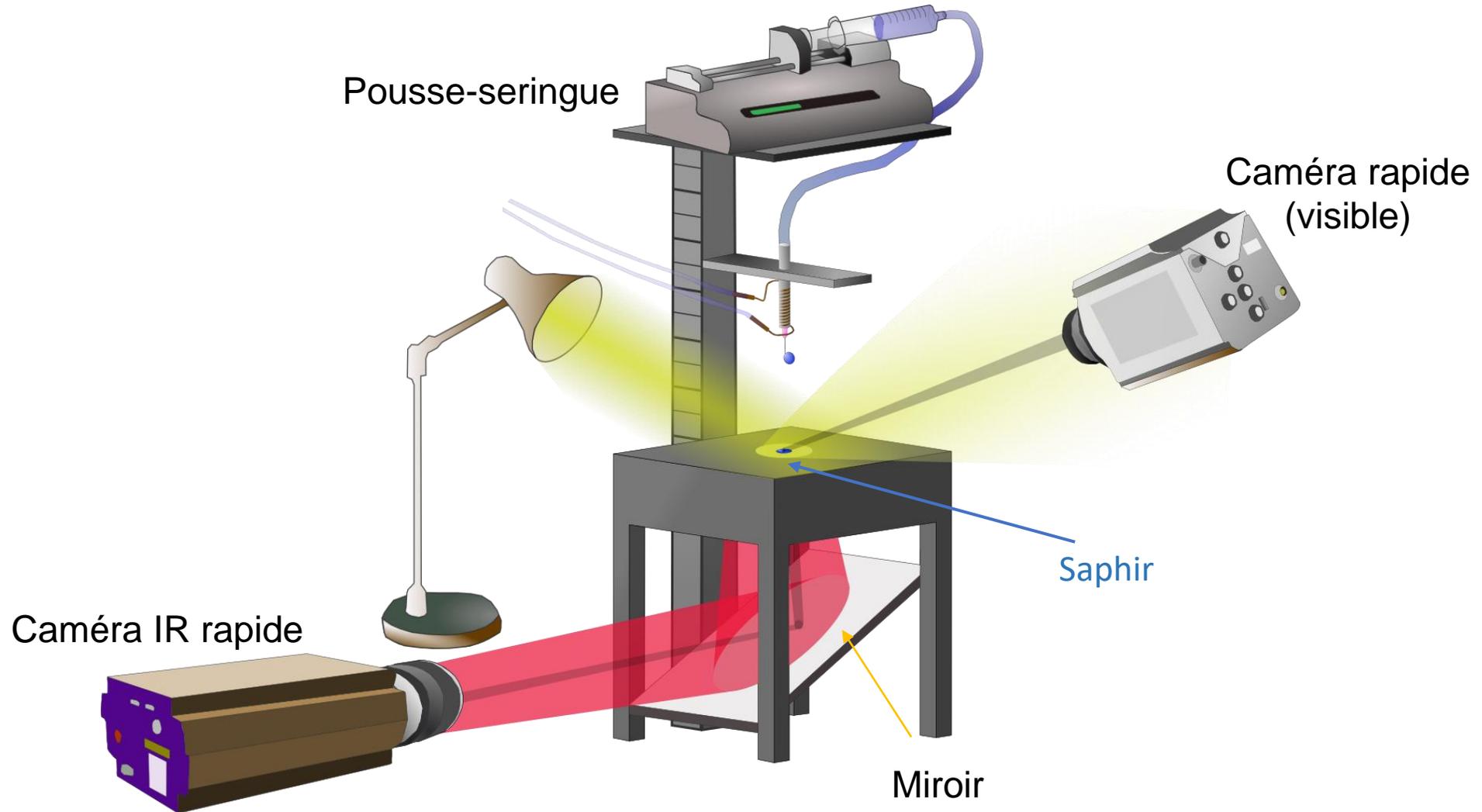
Nombre de We de 30 à 200

Texture de surface/mouillabilité

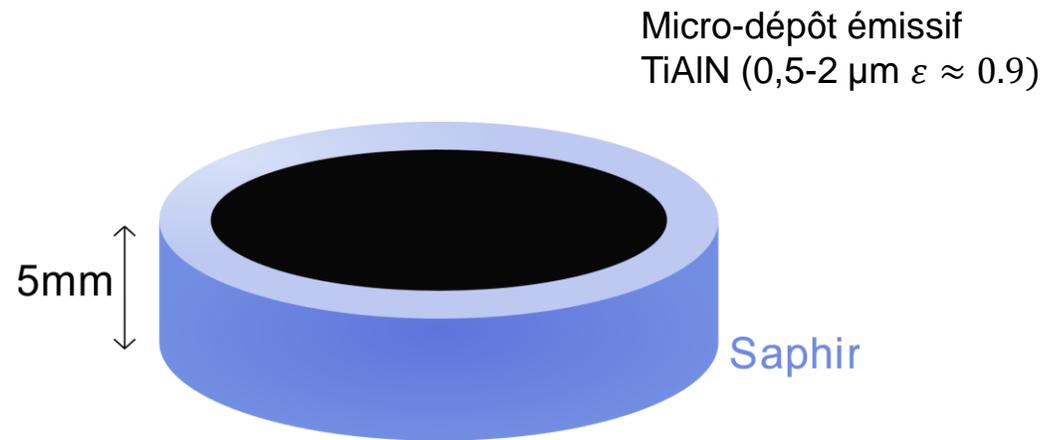


Exemple de paroi texturée,
ici Al poreux avec pattern ou non

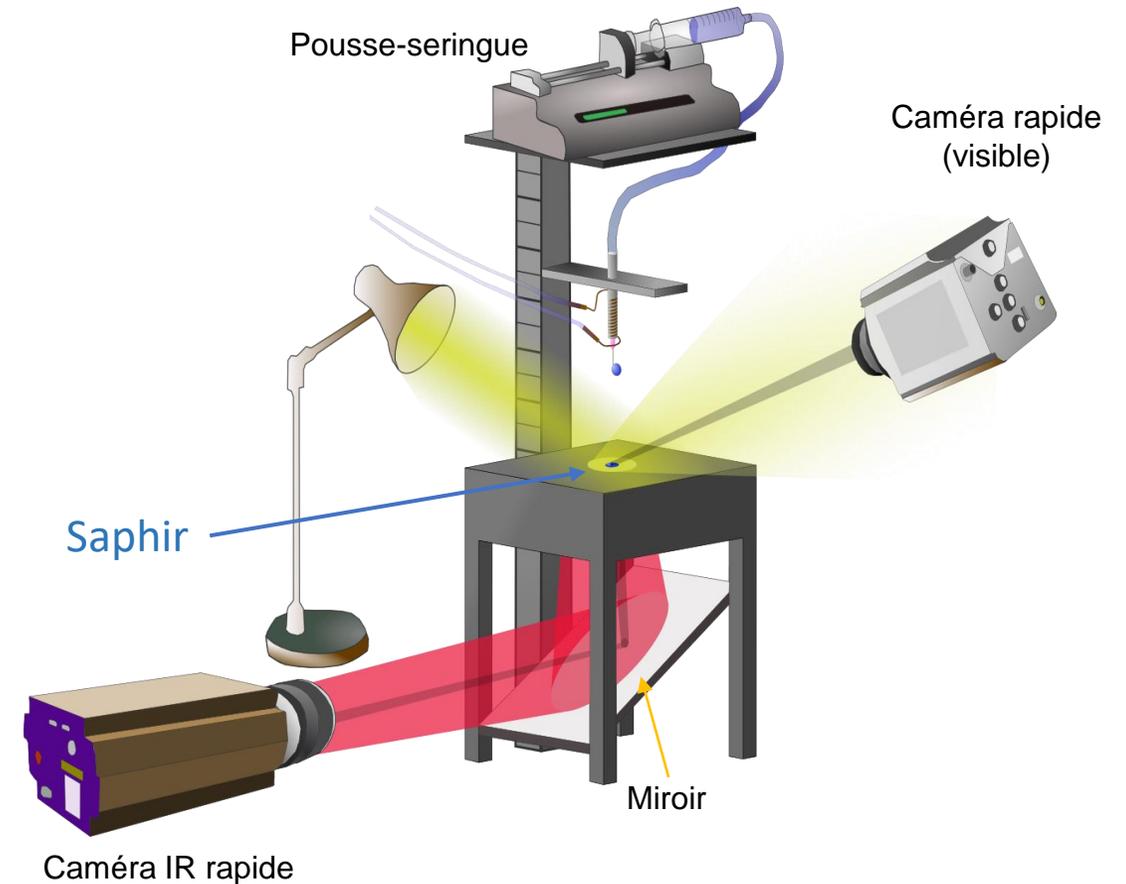
Dispositif expérimental



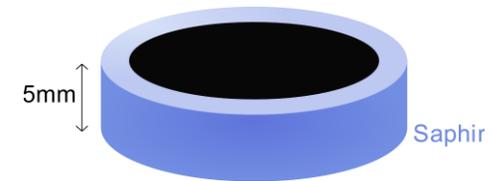
Dispositif expérimental



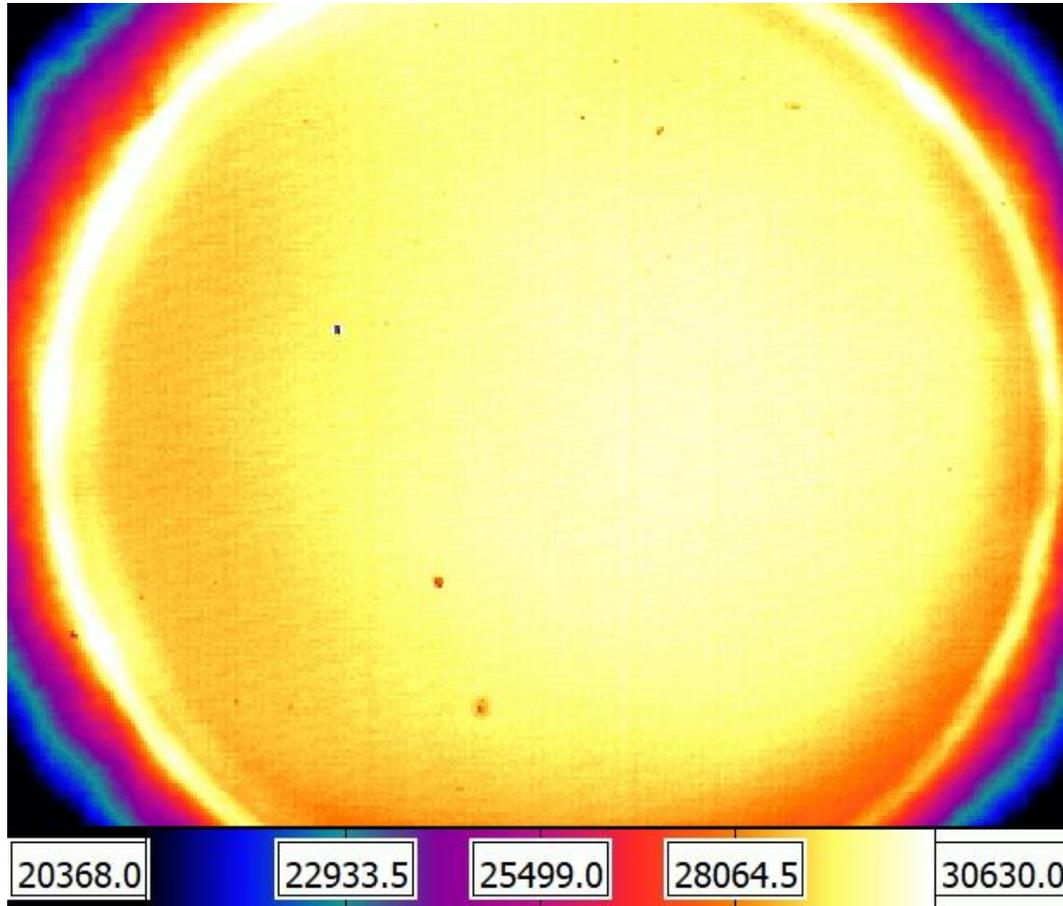
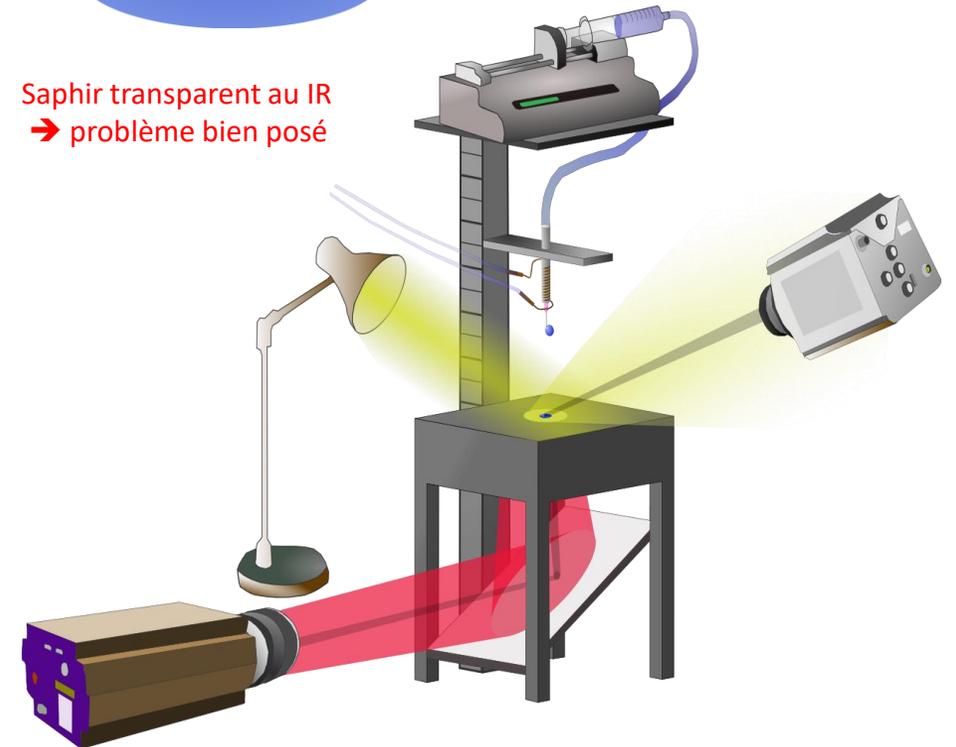
Saphir transparent au IR
→ problème bien posé



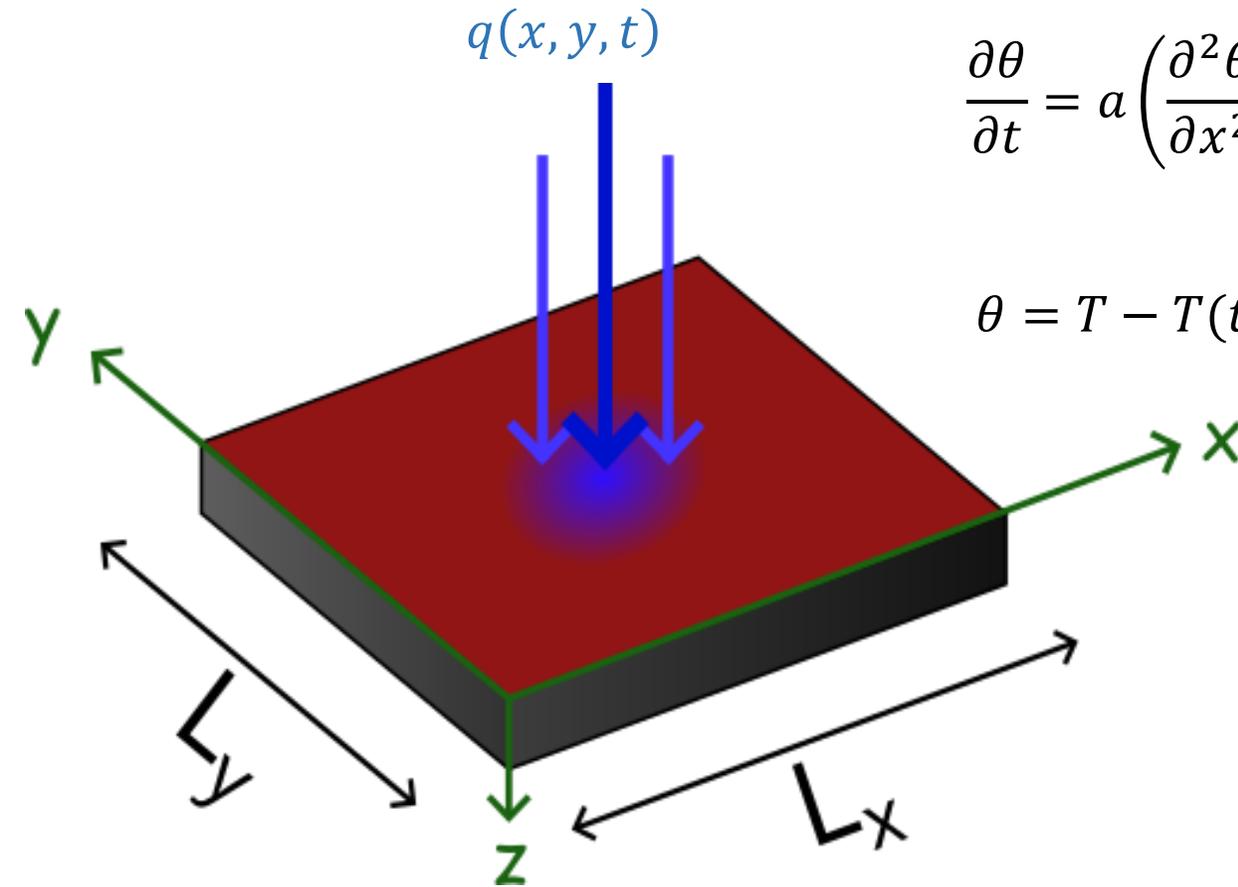
Micro-dépôt émissif
TiAlN ($0,5-2 \mu\text{m}$ $\varepsilon \approx 0.9$)



Saphir transparent au IR
→ problème bien posé



Du champ de température au flux

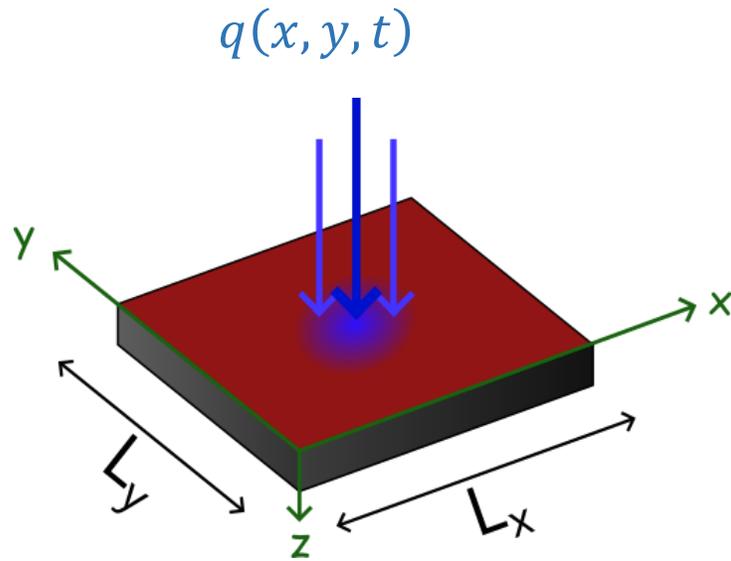


$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$$

$$\theta = T - T(t = 0)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta(x = 0, y, z, t) = 0 \\ \theta(x = L_x, y, z, t) = 0 \\ \theta(x, y = 0, z, t) = 0 \\ \theta(x, y = L_y, z, t) = 0 \\ -K \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y, t) \\ \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=e} = 0 \end{array} \right.$$

Du champ de température au flux



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right)$$

$$\theta = T - T(t = 0)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta(x = 0, y, z, t) = 0 \\ \theta(x = L_x, y, z, t) = 0 \\ \theta(x, y = 0, z, t) = 0 \\ \theta(x, y = L_y, z, t) = 0 \\ -K \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y, t) \\ \frac{\partial \theta(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{z=e} = 0 \end{array} \right.$$

Transformée en sinus 2D

$$\theta(x, y, z = 0, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \theta_{i,j}(z, t) \sin(\alpha_i x) \sin(\beta_j y)$$

$$\alpha_i = \frac{\pi}{L_x} i$$

$$\beta_j = \frac{\pi}{L_y} j$$

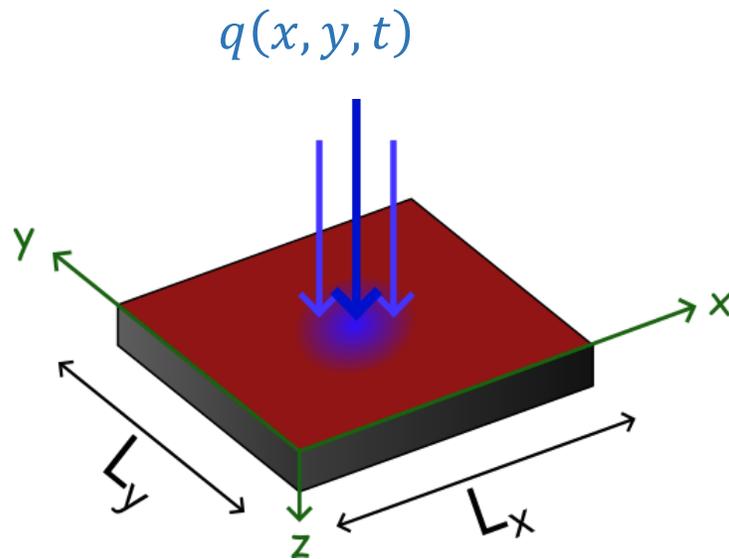
Transformée de Laplace

$$\hat{\theta}_{i,j}(z = 0, p) = \hat{Z}(p) \cdot \hat{q}_{i,j}(z = 0, p)$$

$\hat{Z}(p)$ matrice d'impédance

Utilisation des quadripôles thermiques pour évaluer Z

Du champ de température au flux



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad \theta = T - T(t = 0)$$

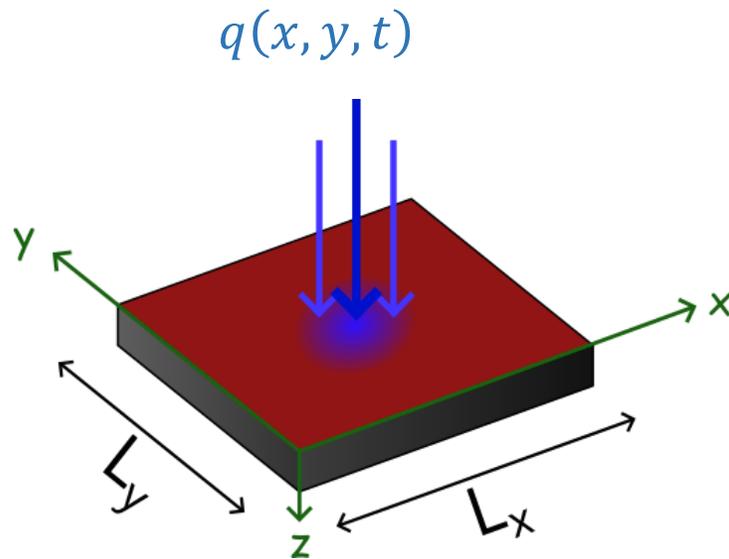
Transformée en sinus 2D

$$\theta(x, y, z = 0, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \theta_{i,j}(z, t) \sin(\alpha_i x) \sin(\beta_j y)$$

Transformée de Laplace

$$\hat{\theta}_{i,j}(z = 0, p) = \hat{Z}(p) \cdot \hat{q}_{i,j}(z = 0, p)$$

Du champ de température au flux



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad \theta = T - T(t = 0)$$

Transformée en sinus 2D

$$\theta(x, y, z = 0, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \theta_{i,j}(z, t) \sin(\alpha_i x) \sin(\beta_j y)$$

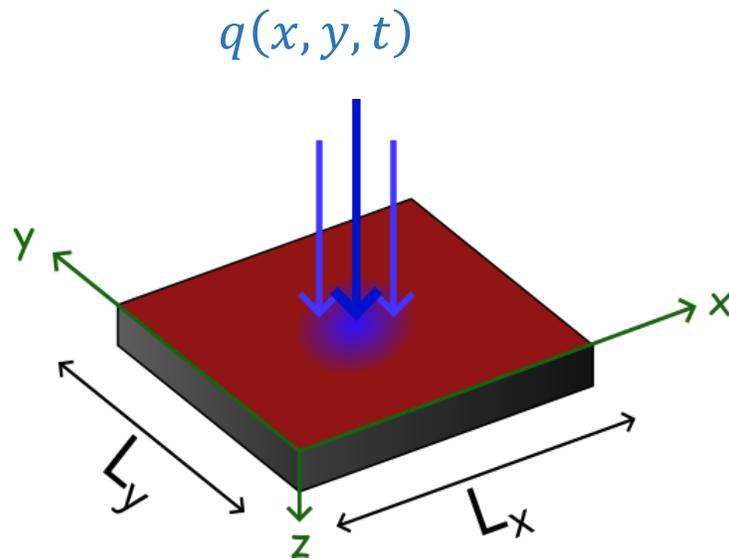
Transformée de Laplace

$$\hat{\theta}_{i,j}(z = 0, p) = \hat{Z}(p) \cdot \hat{q}_{i,j}(z = 0, p)$$

Dans le domaine temporel

$$\theta_{i,j}(z, t) = Z(t) * q_{i,j}(z = 0, t)$$

Du champ de température au flux



$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} \right) \quad \theta = T - T(t = 0)$$

Transformée en sinus 2D

$$\theta(x, y, z = 0, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \theta_{i,j}(z, t) \sin(\alpha_i x) \sin(\beta_j y)$$

Transformée de Laplace

$$\hat{\theta}_{i,j}(z = 0, p) = \hat{Z}(p) \cdot \hat{q}_{i,j}(z = 0, p)$$

Dans le domaine temporel

$$\theta_{i,j}(z, t) = Z(t) * q_{i,j}(z = 0, t)$$

Donc

$$q_{i,j}(z, t) = \theta_{i,j}(z = 0, t) * Z'(t)$$

Car problème bien posé !

Finalement avec la transformée inverse

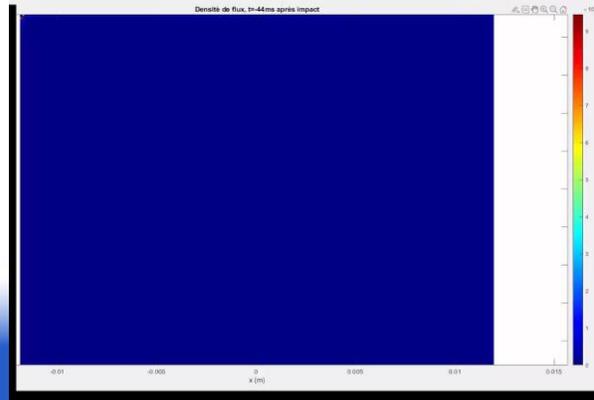
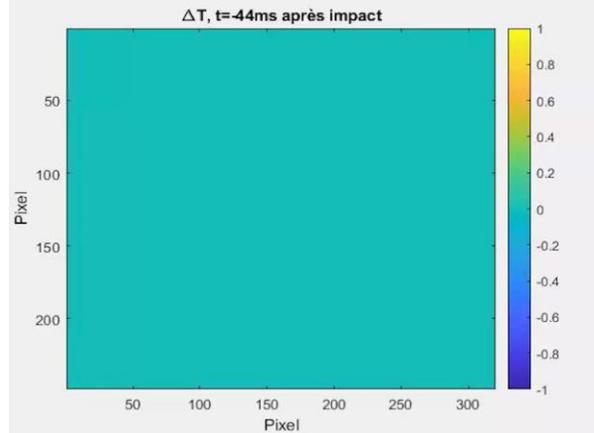
$$q(x, y, z = 0, t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m q_{i,j}(z, t) \sin(\alpha_i x) \sin(\beta_j y)$$

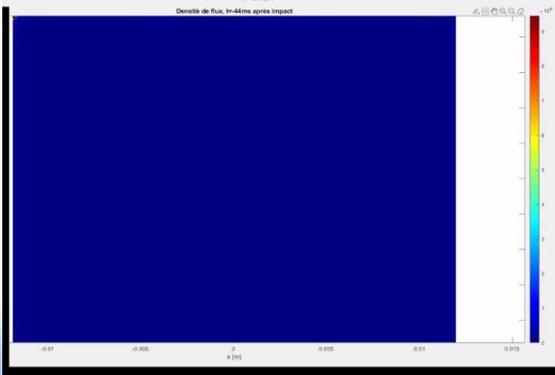
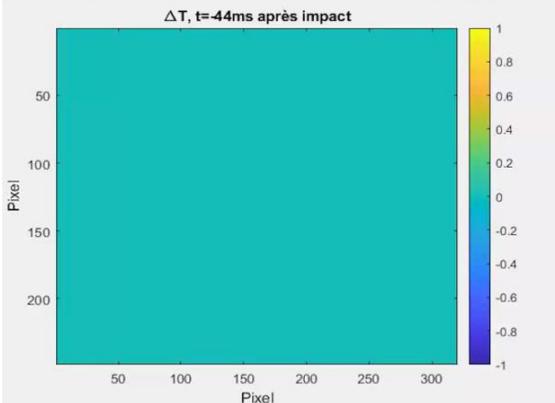
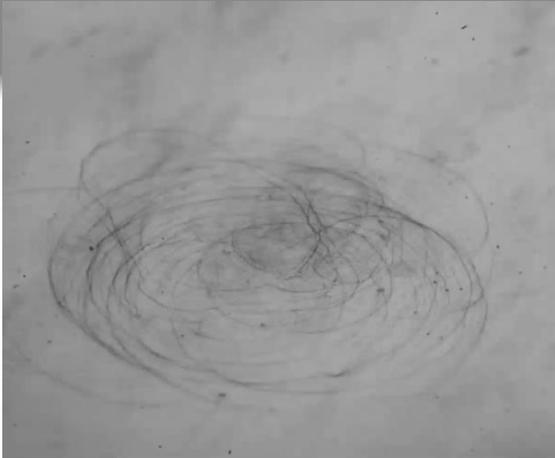
Quelques exemples

- $We = 180$ (hauteur de chute 30 cm)
 - Parois lisses

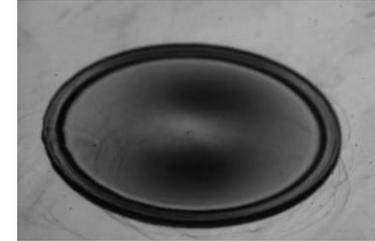
QUELQUES RESULTATS

Température de surface : 80°C

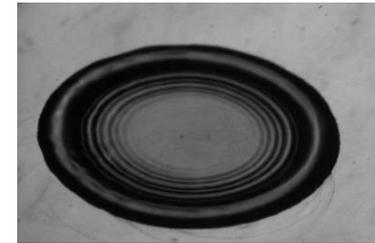




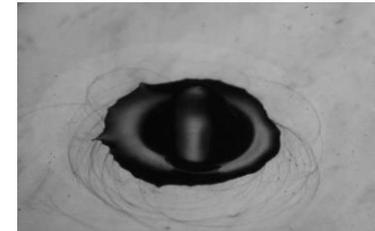
Etalement max



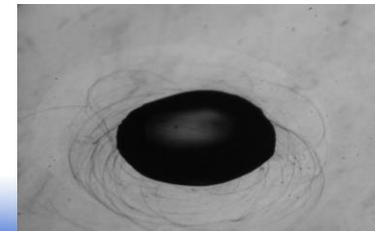
Retrait (receding)



Retrait max



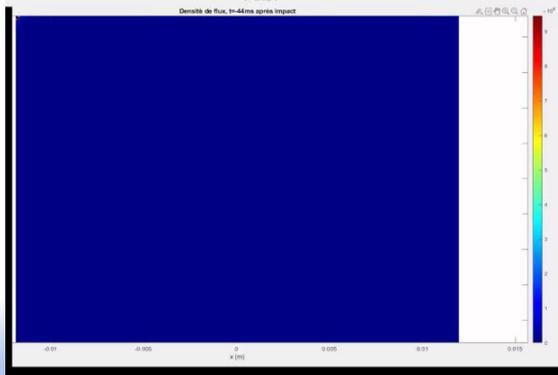
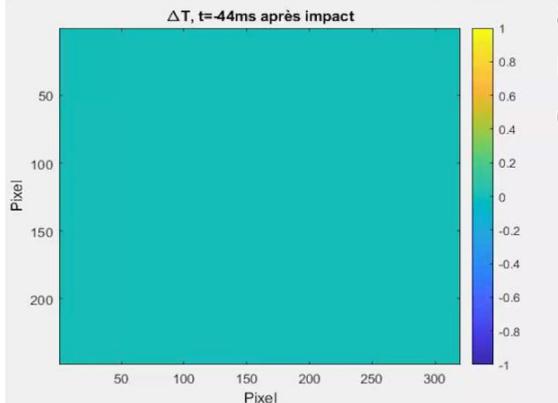
Relaxation



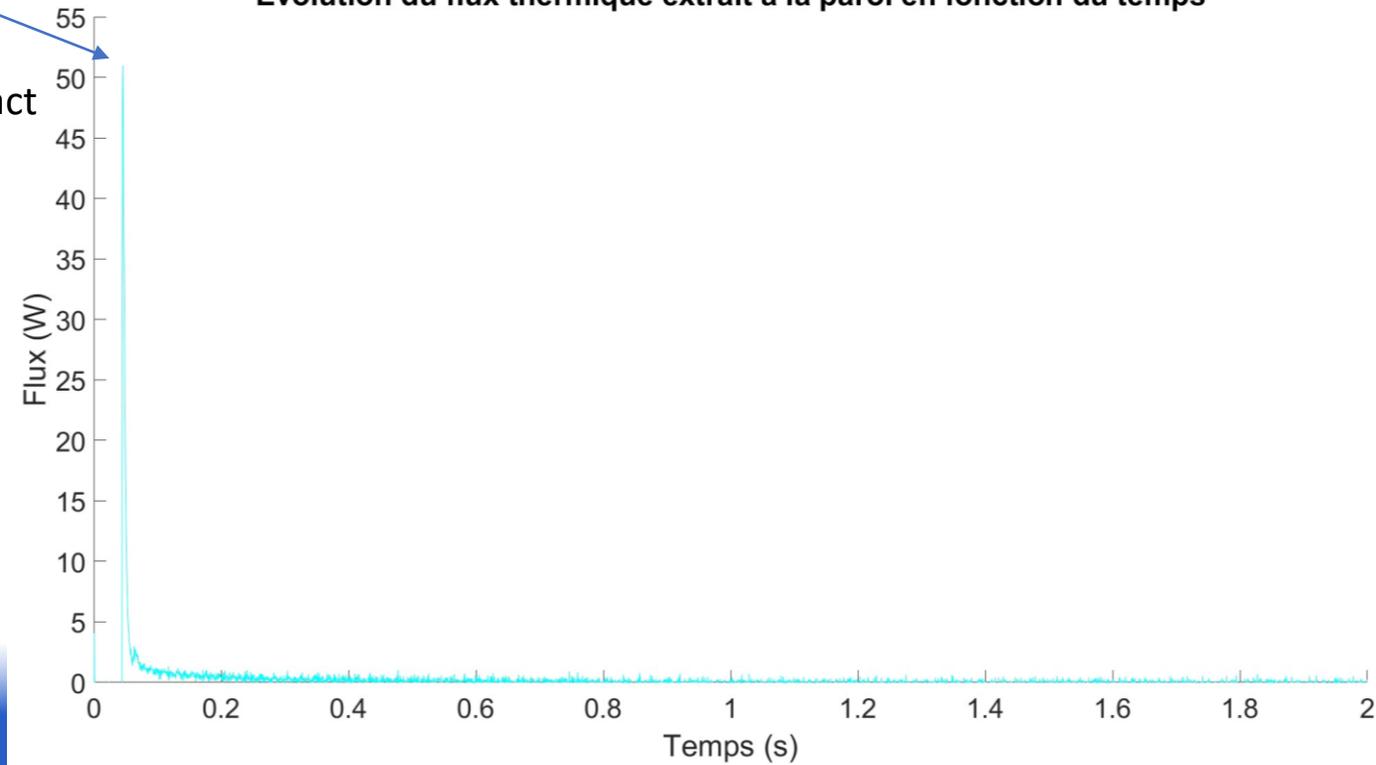


Flux max

au moment de l'impact

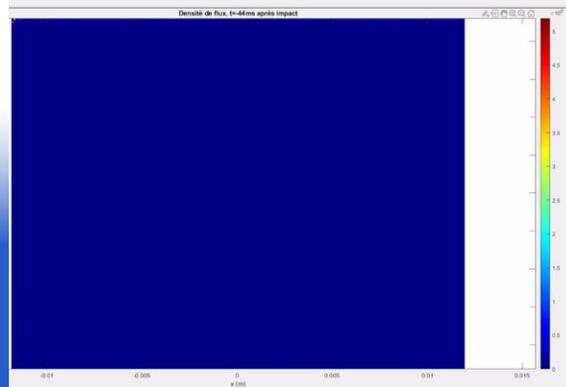
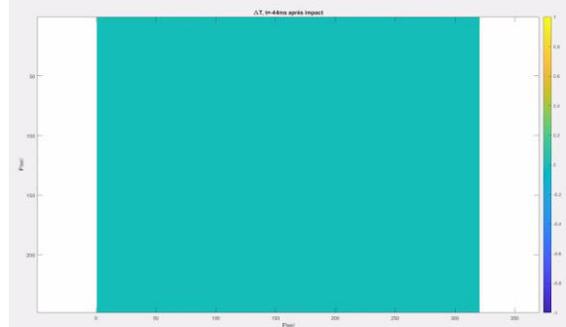
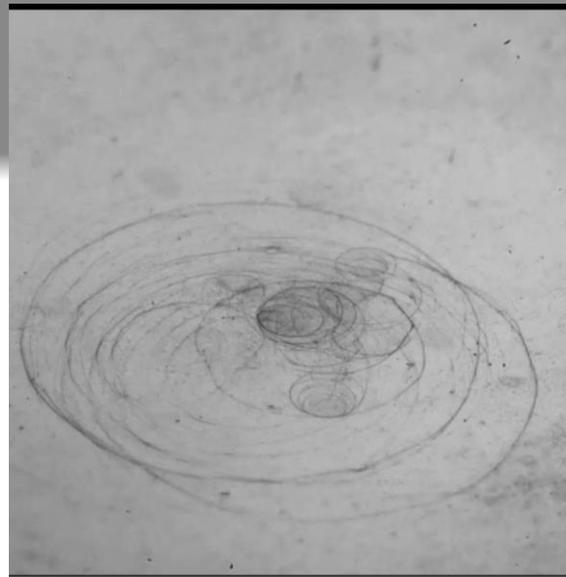


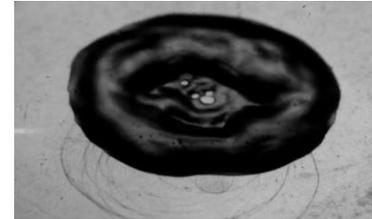
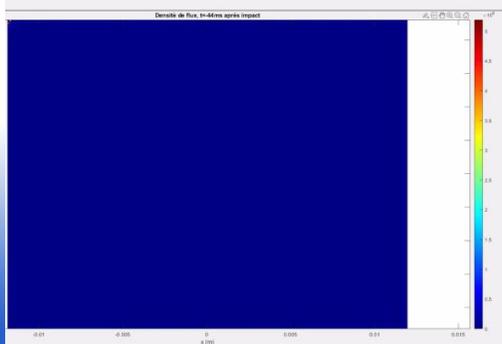
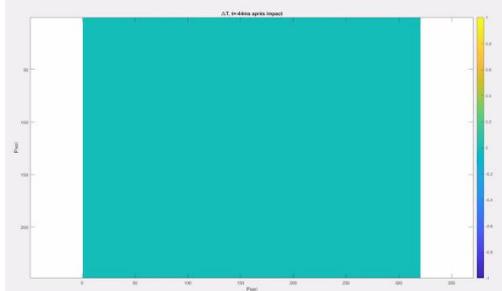
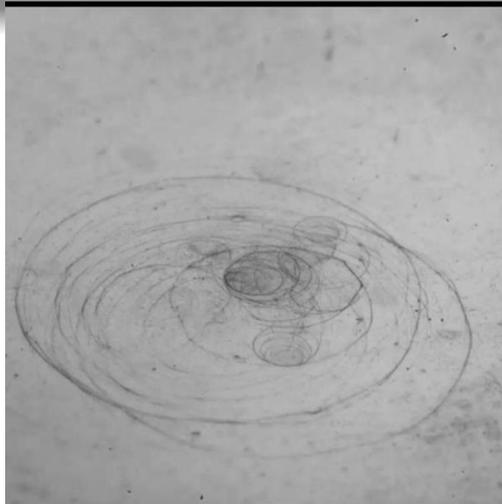
Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



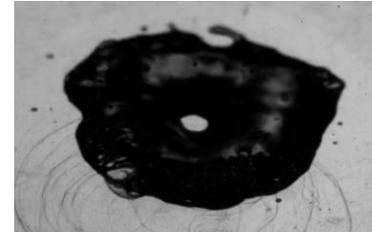
QUELQUES RESULTATS

Température de surface : 125°C

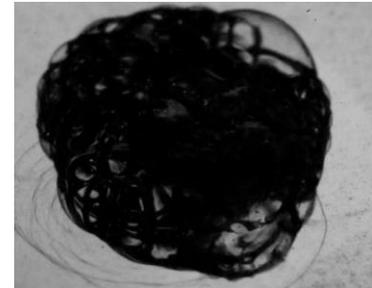




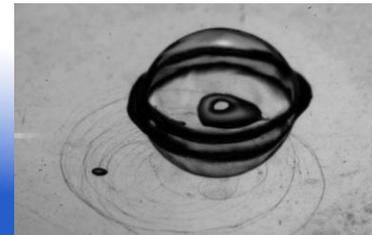
Début d'ébullition

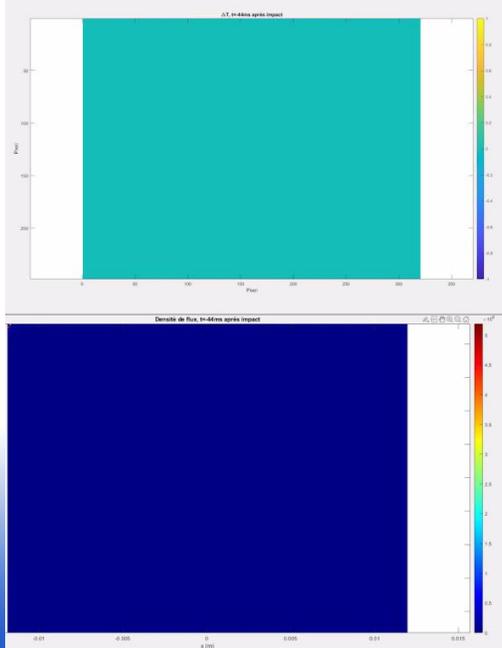
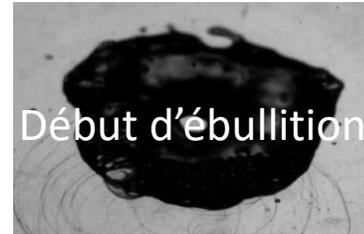
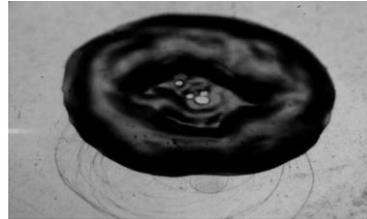
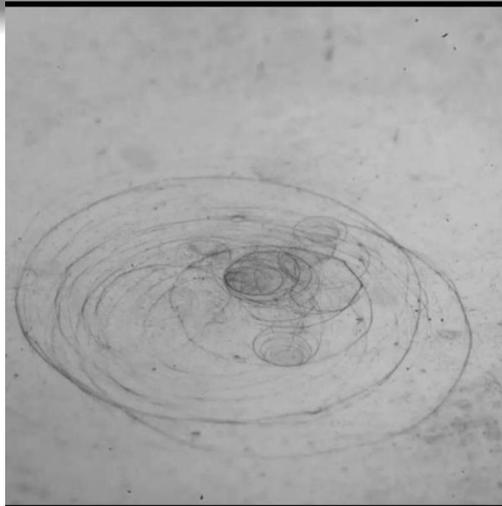


Ebullition en mousse
Foaming

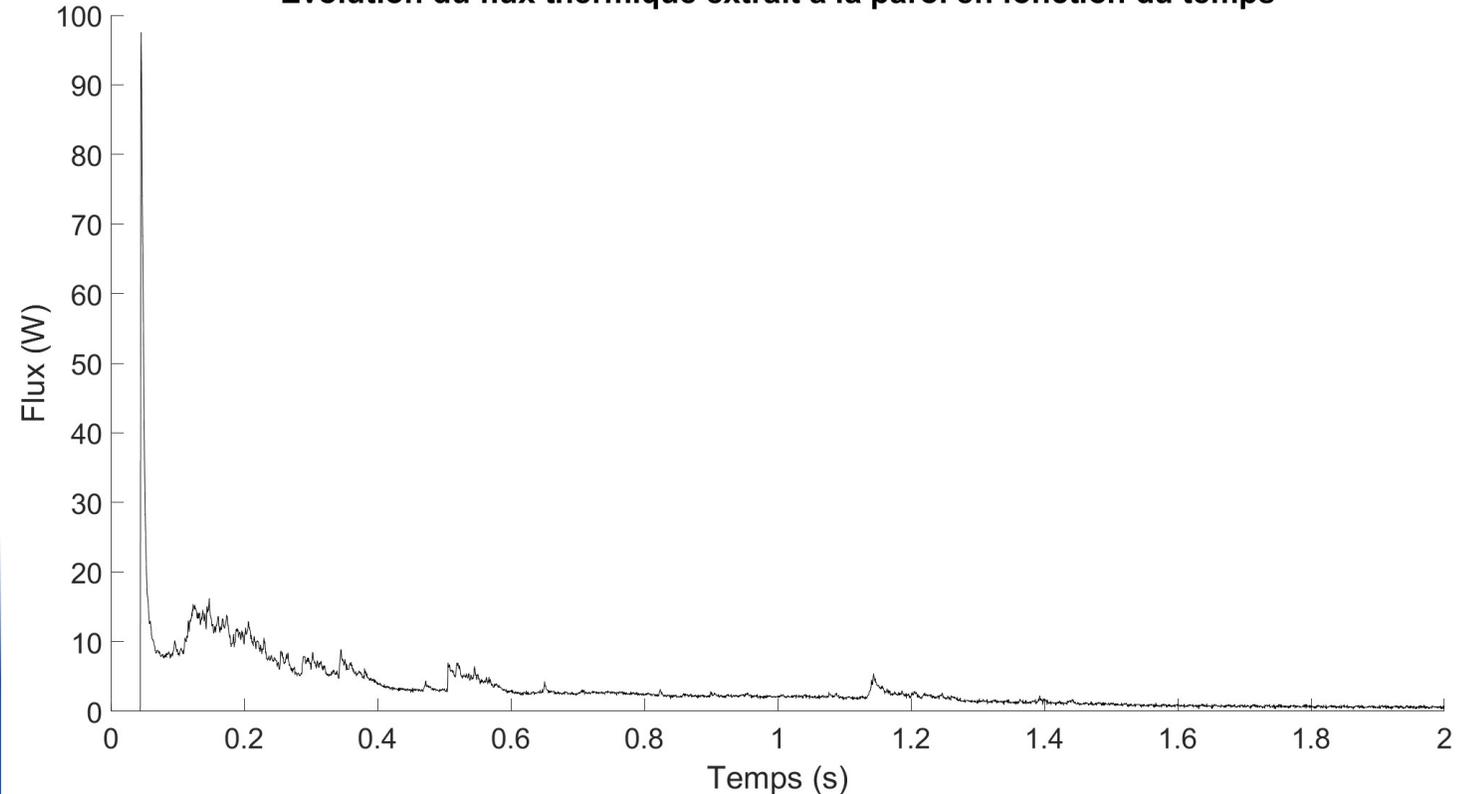


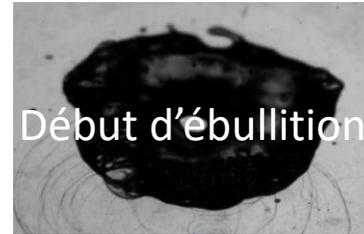
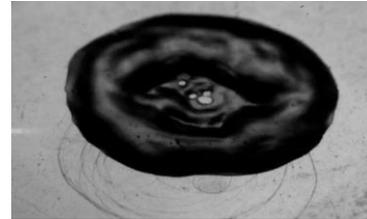
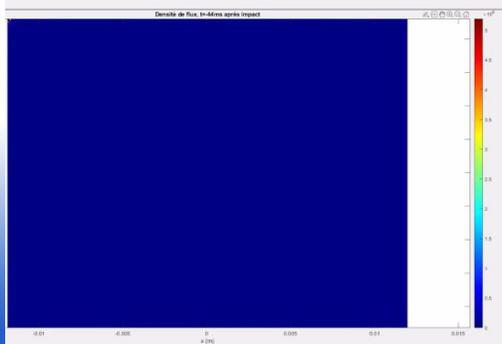
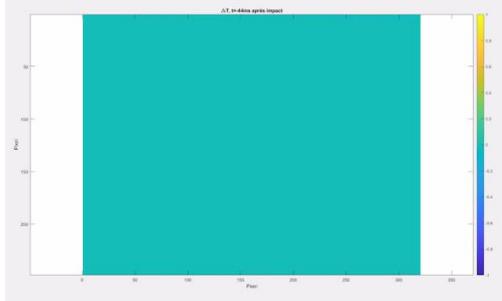
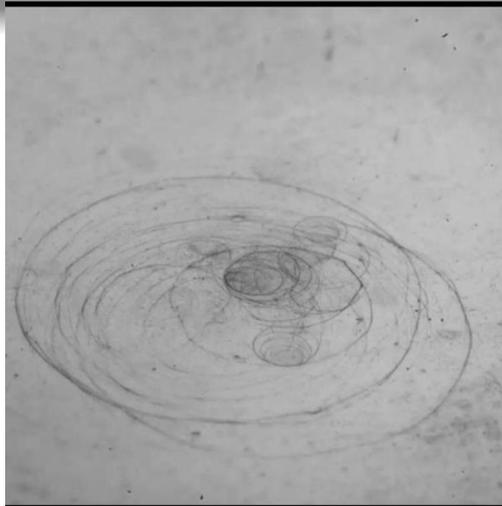
Ebullition/évaporation



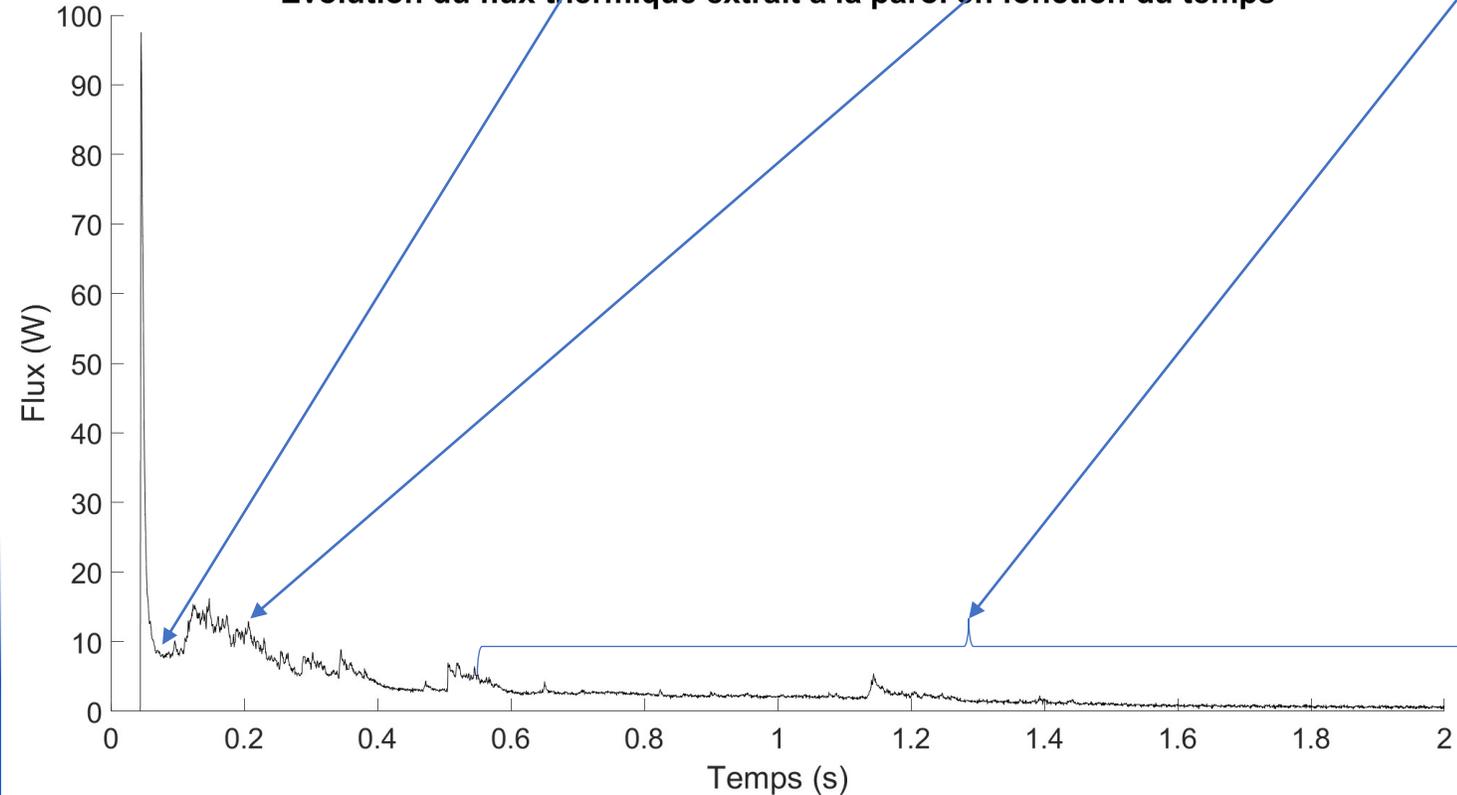


Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



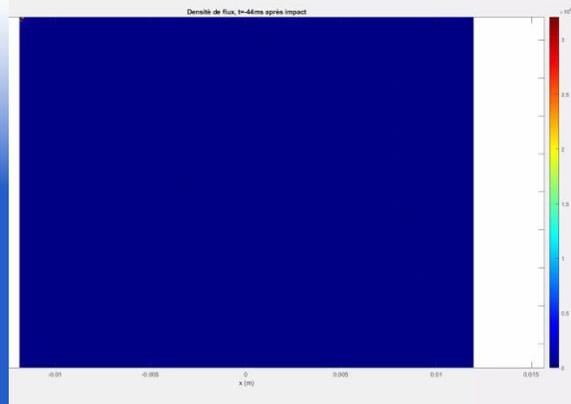
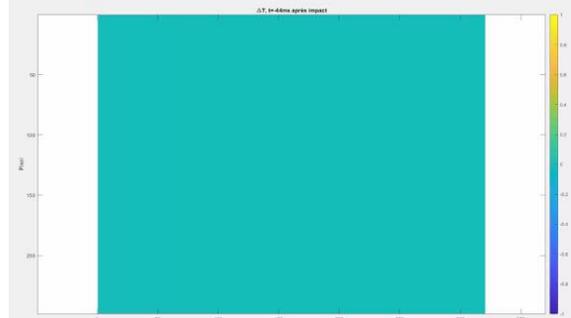
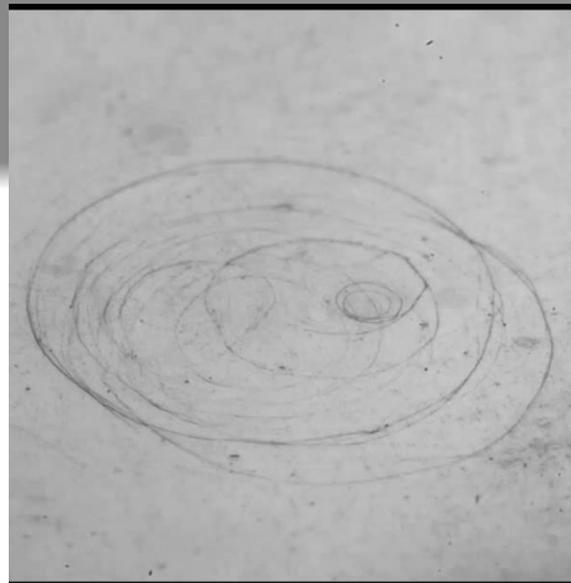


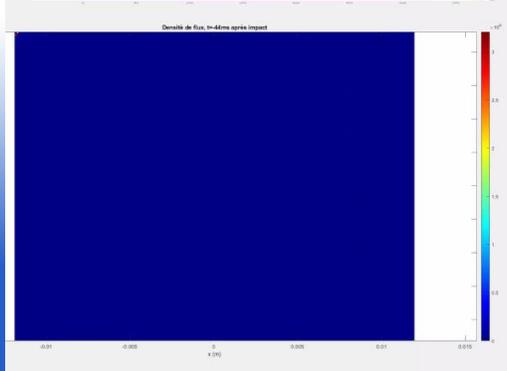
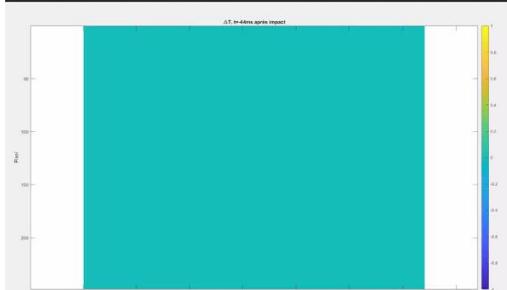
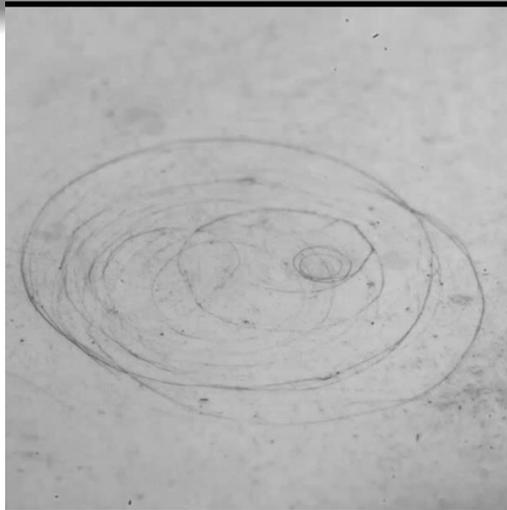
Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



QUELQUES RESULTATS

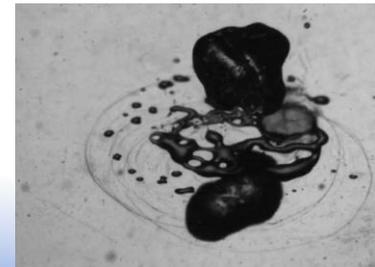
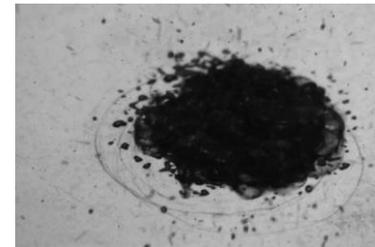
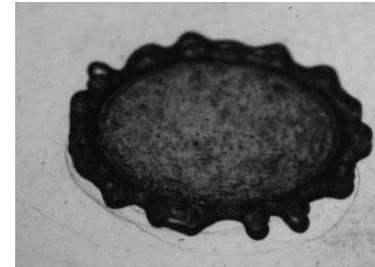
Température de surface : 175°C

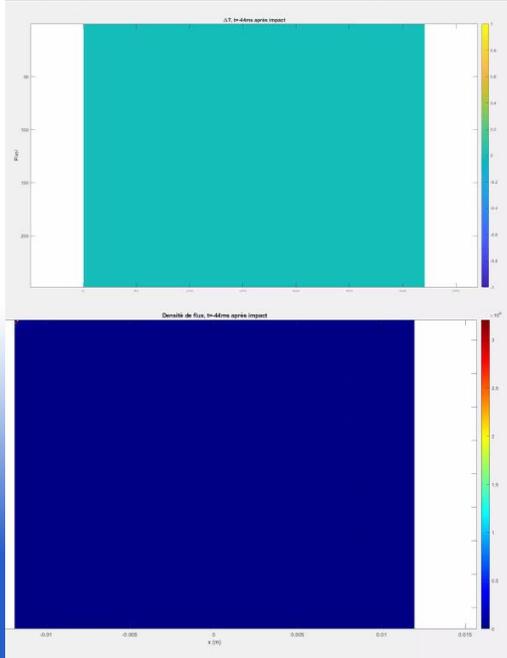
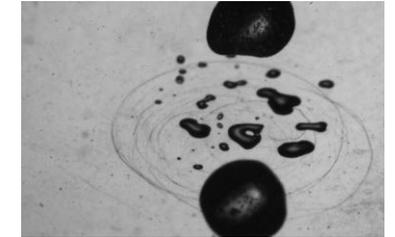
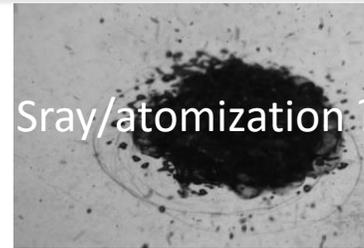
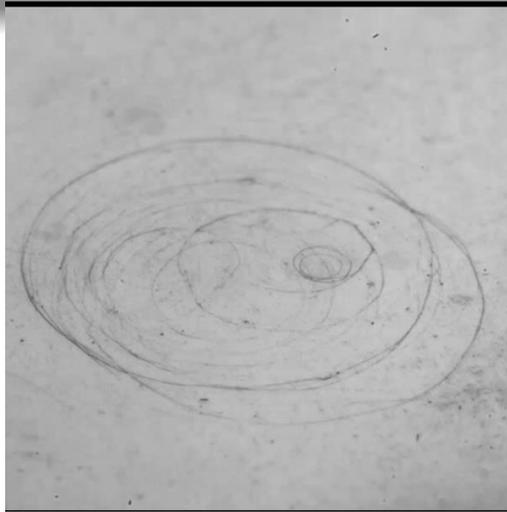




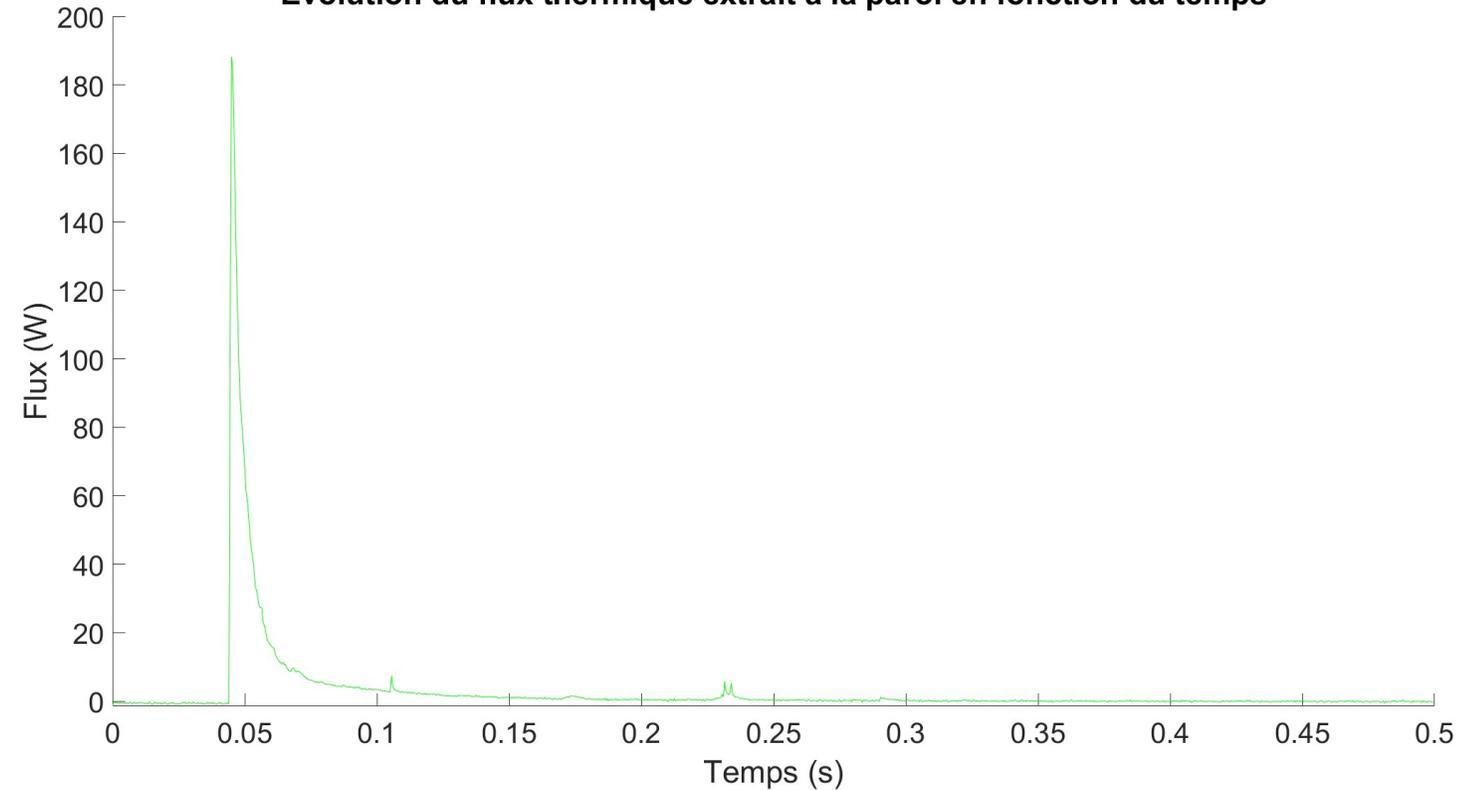
Spray/atomization ?

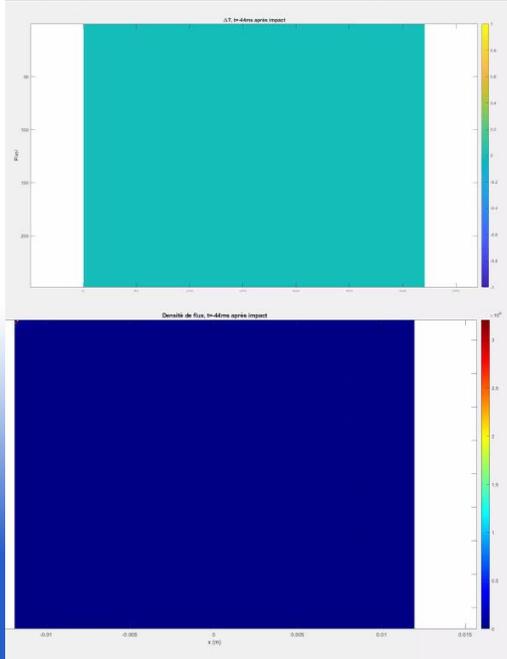
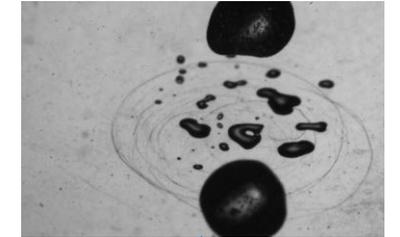
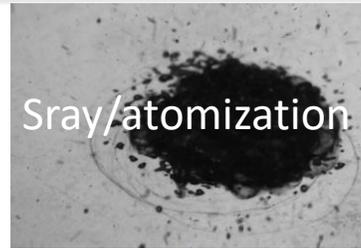
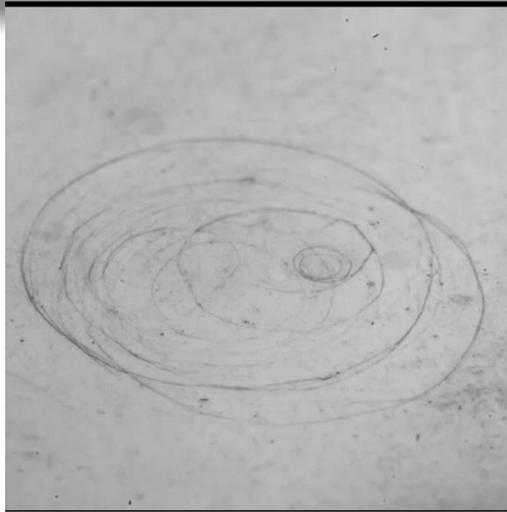
Peu de reste mouillant



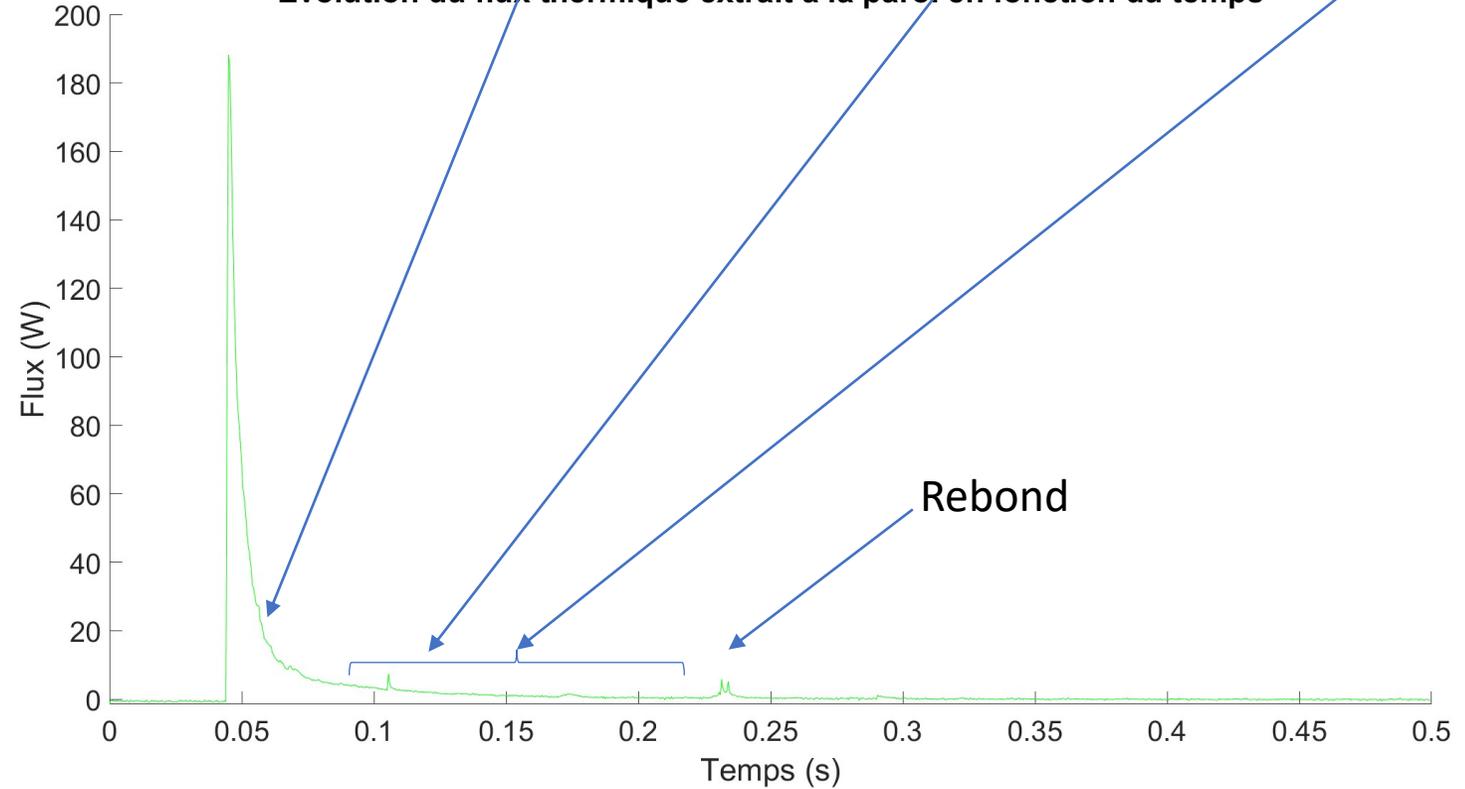


Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



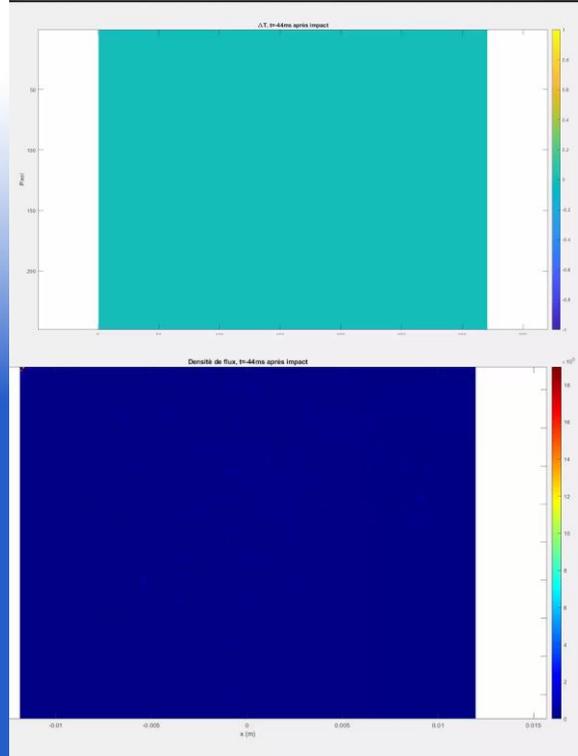
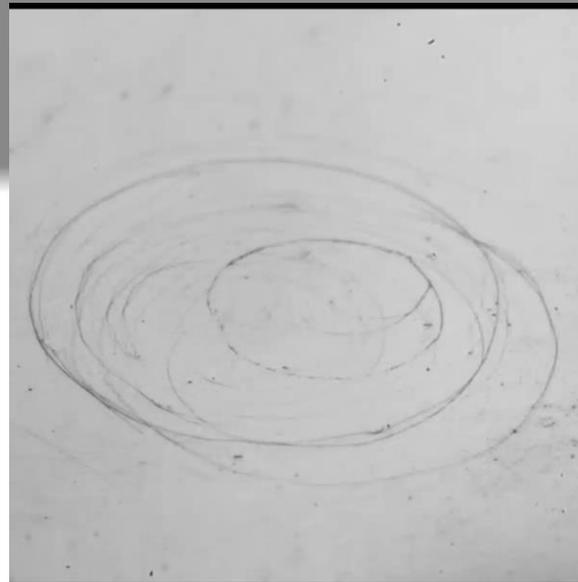


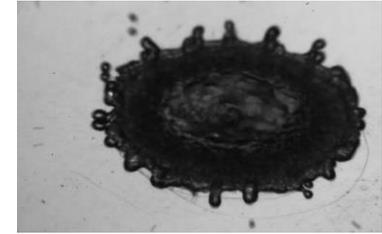
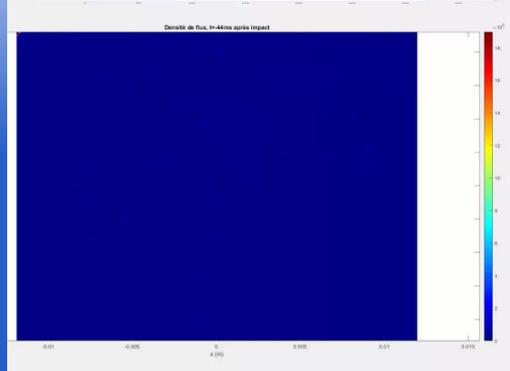
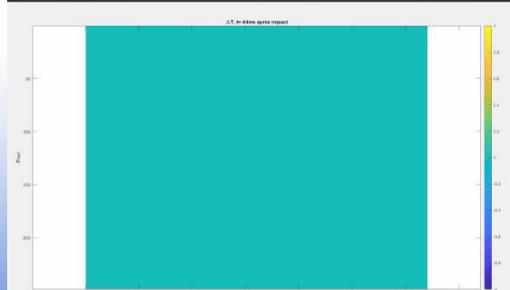
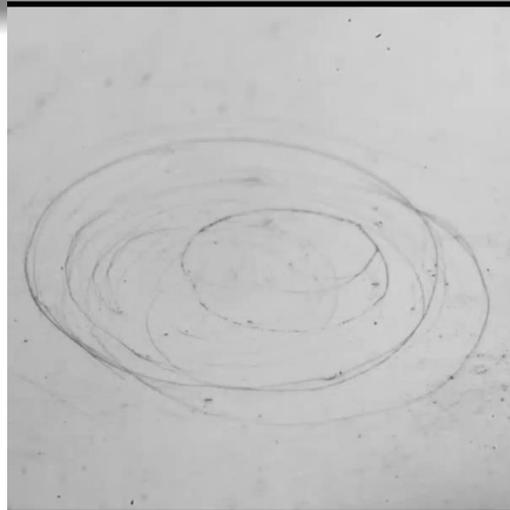
Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



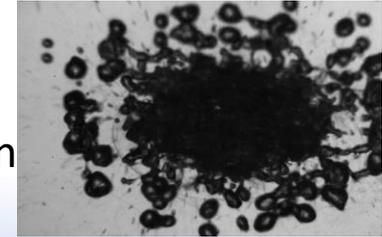
QUELQUES RESULTATS

Température de surface : 250°C

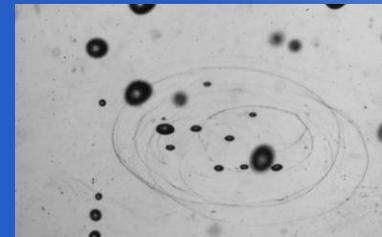
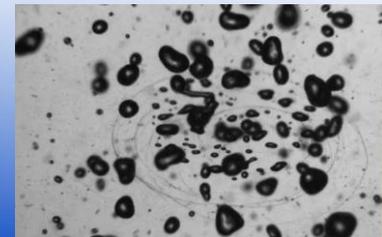


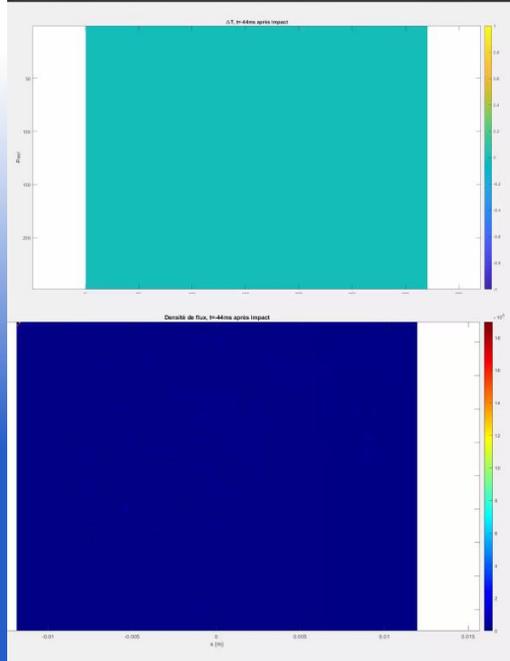
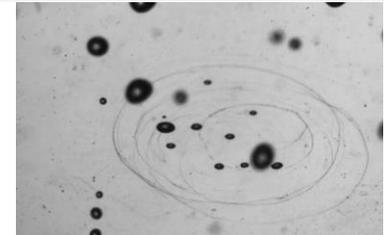
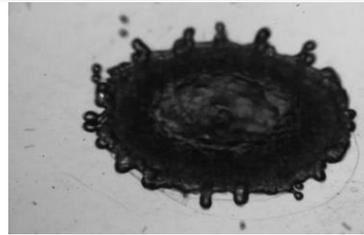
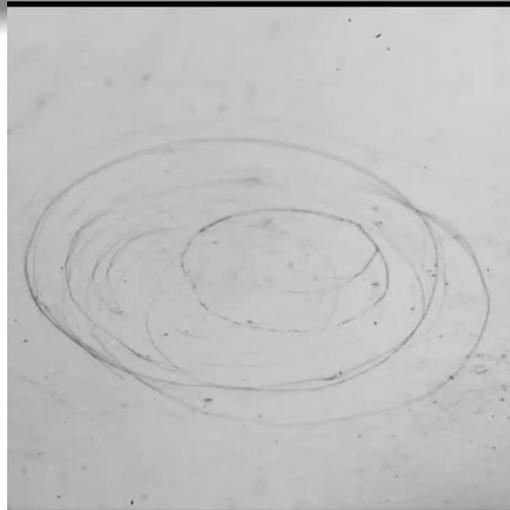


Spray/
fragmentation

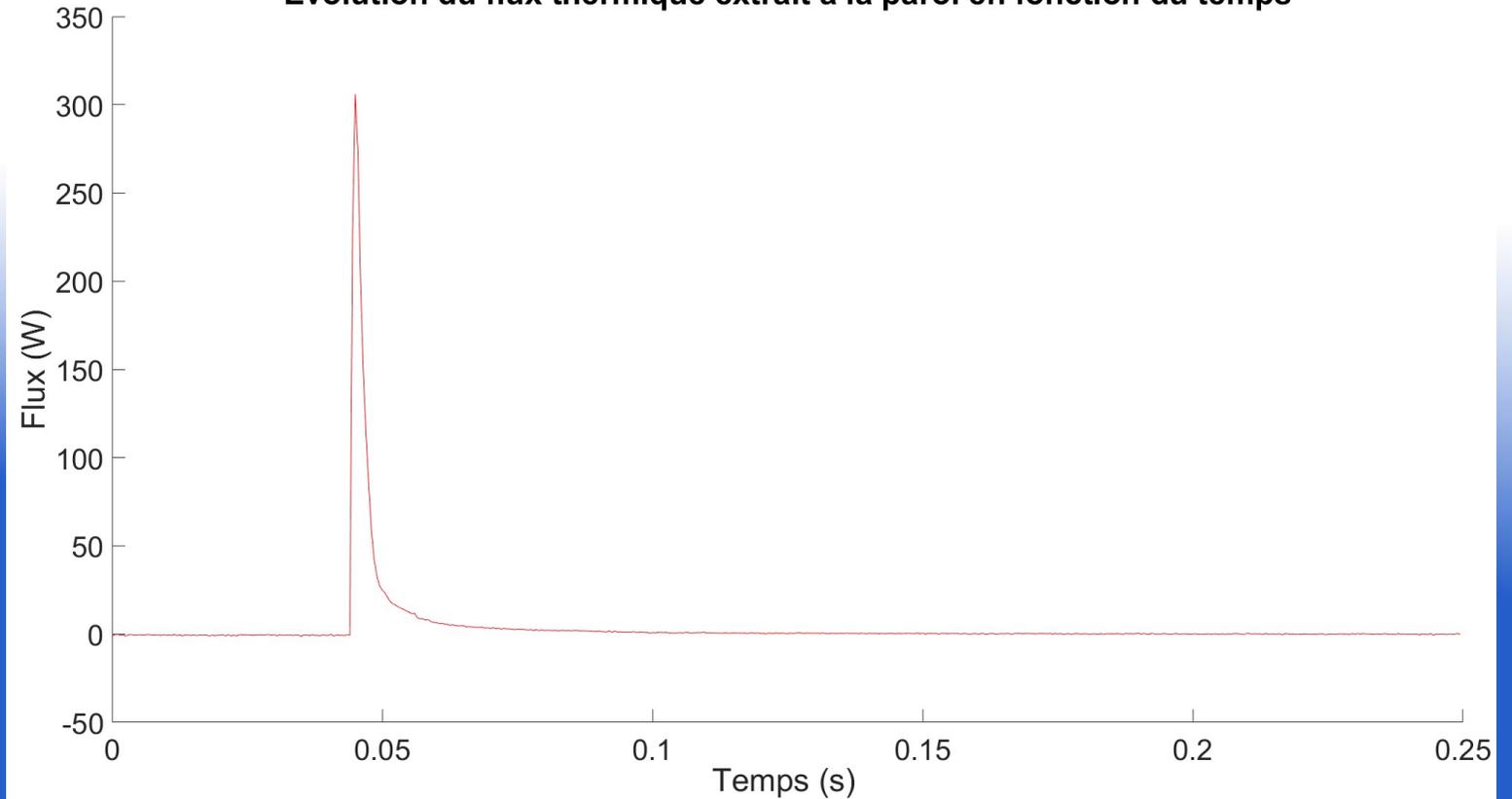


Moins de reste mouillant

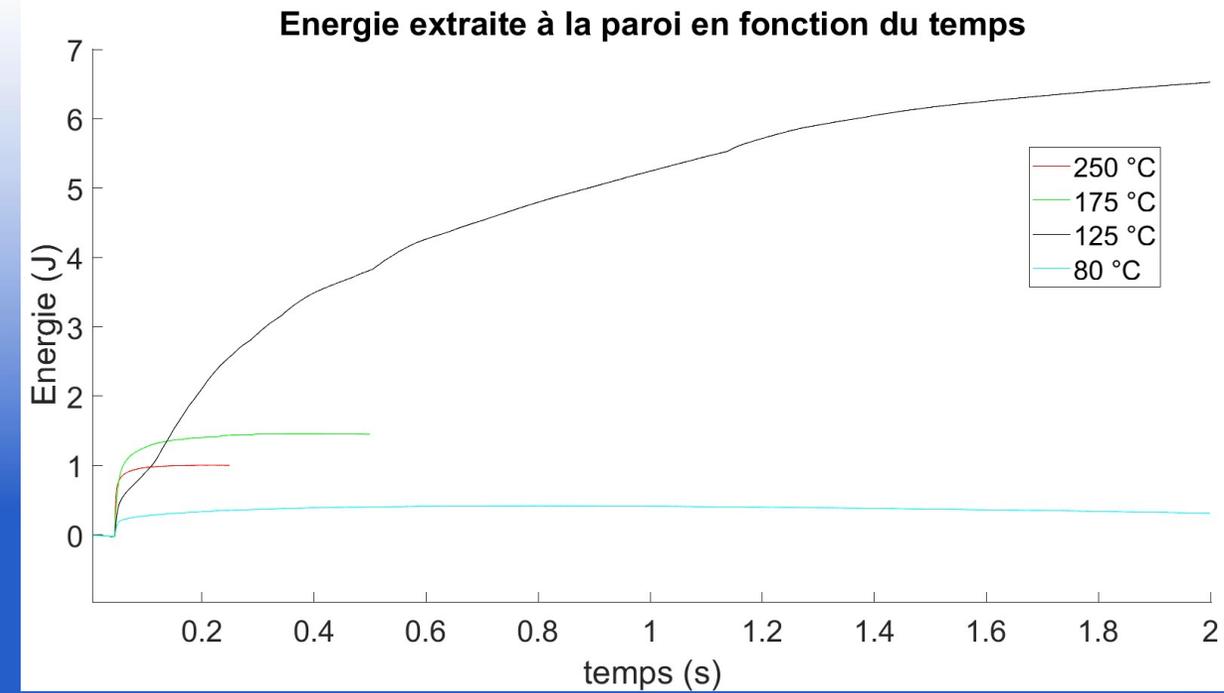
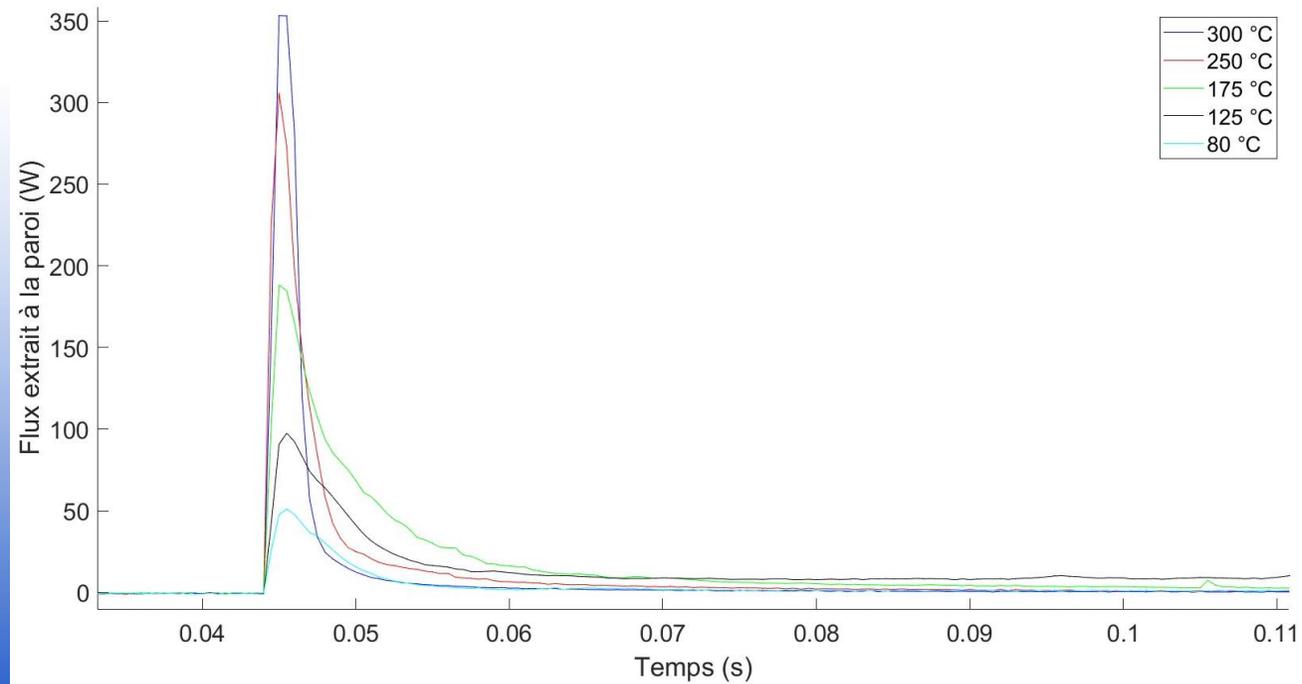




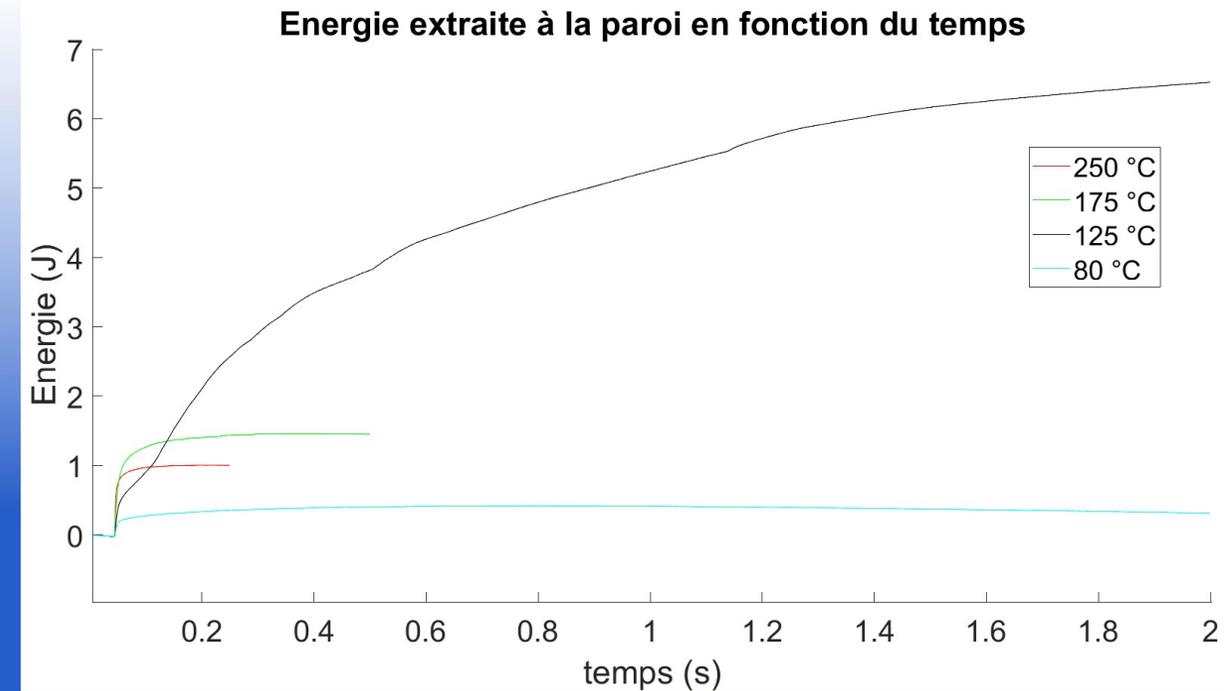
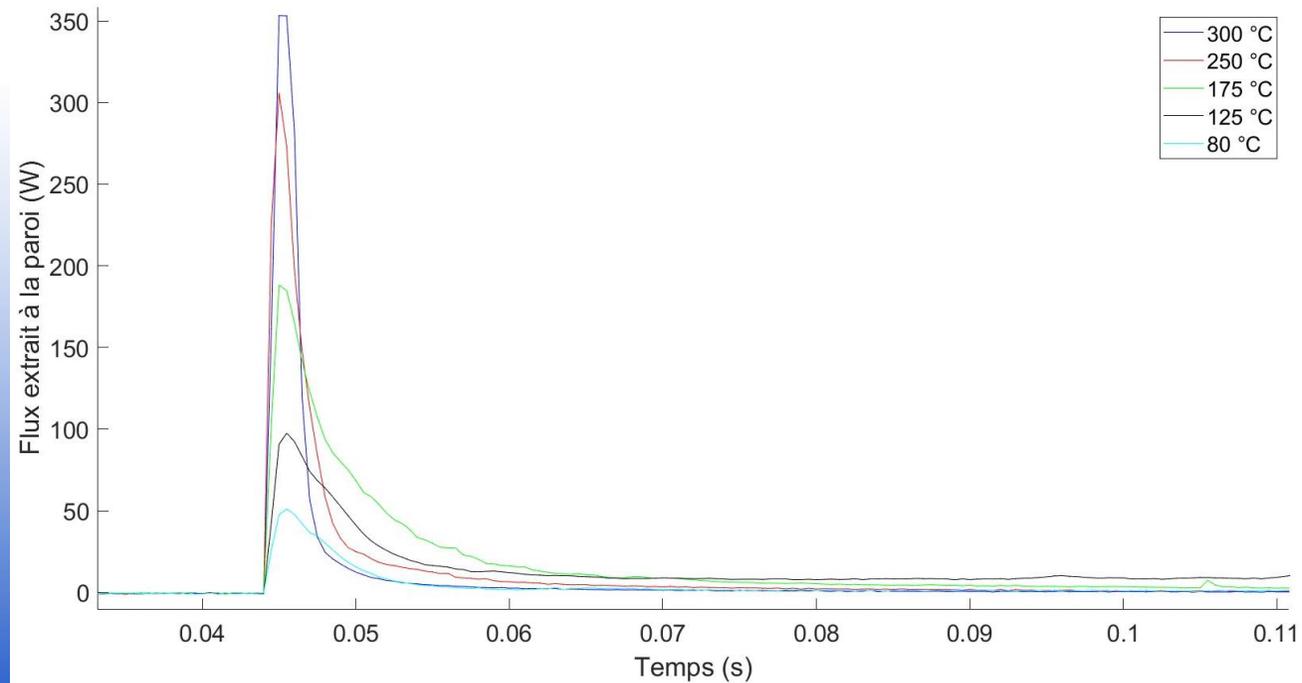
Evolution du flux thermique extrait à la paroi en fonction du temps



Comparaison



Comparaison



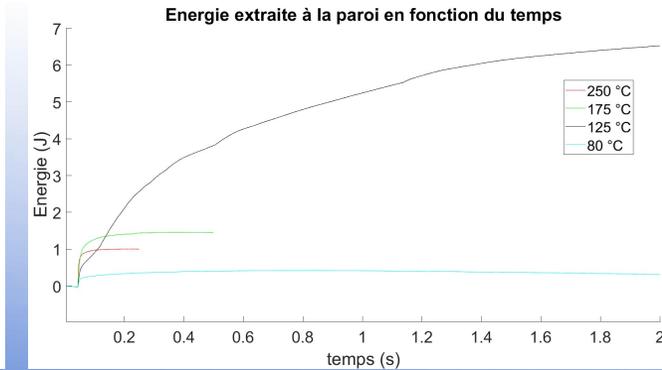
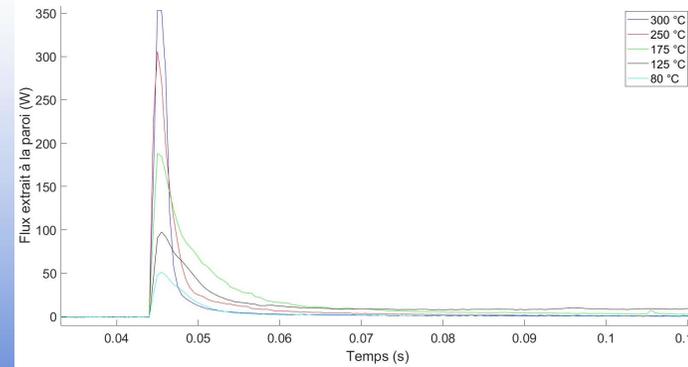
Sur quelle base peut-on comparer ces expériences ?
Comment affirmer qu'une surface ou une condition d'impact est plus intéressante qu'une autre pour intensifier le refroidissement ?

QUELQUES RESULTATS, ET MAINTENANT ??

Comment comparer ces cas ?

Sur quelle base peut-on comparer ces expériences ?

Comment affirmer qu'une surface ou une condition d'impact est plus intéressante qu'une autre pour intensifier le refroidissement ?



- Flux maximal ?
- Energie extraite maximum ?
- Flux moyen sur la durée du contact thermique ?
- Flux moyen surfacique pendant le contact ?
- Temps de contact ?
- Taille de la surface moyenne d'échange ?
-

Qu'en est-il du *CHF* (Critical heat flux) et du *HTC* (heat transfer coefficient) ?

- Méthode efficace pour estimer le flux avec une très bonne résolution spatial et temporelle
- Premiers résultats encourageants

- Finir de traiter les données pour cartographier les différents régimes et leurs fonctions dans le flux et l'énergie transférés
- Étudier les surfaces texturées
- Passage aux multi-gouttes

**Soutenu par
ANR projet DROPSURF**

Merci à vous de m'avoir écouté