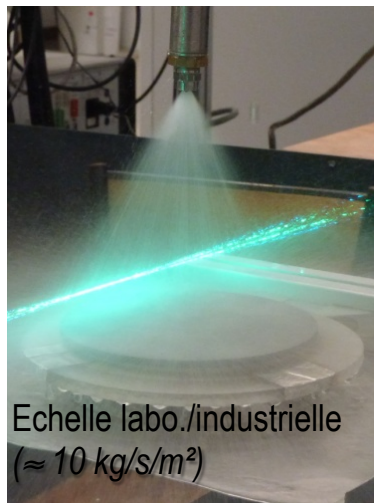
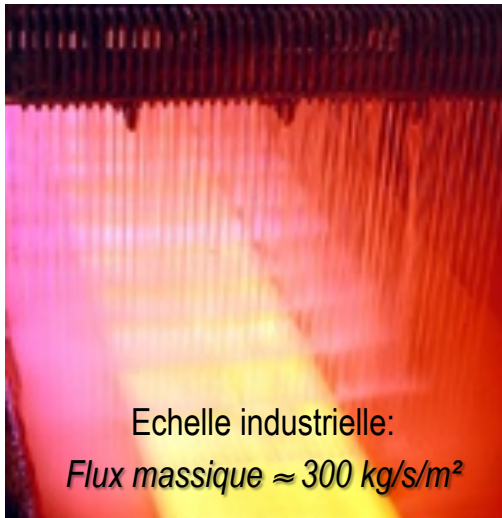


Mesures couplées d'Analyse Phase Doppler et de thermographie infra-rouge pour l'étude du refroidissement de surfaces chaudes par sprays

Alexandre Labergue, Michel Gradeck, Fabrice Lemoine

LEMTA – Université de Lorraine - CNRS
Nancy

Le refroidissement de surfaces chaudes dans la sidérurgie

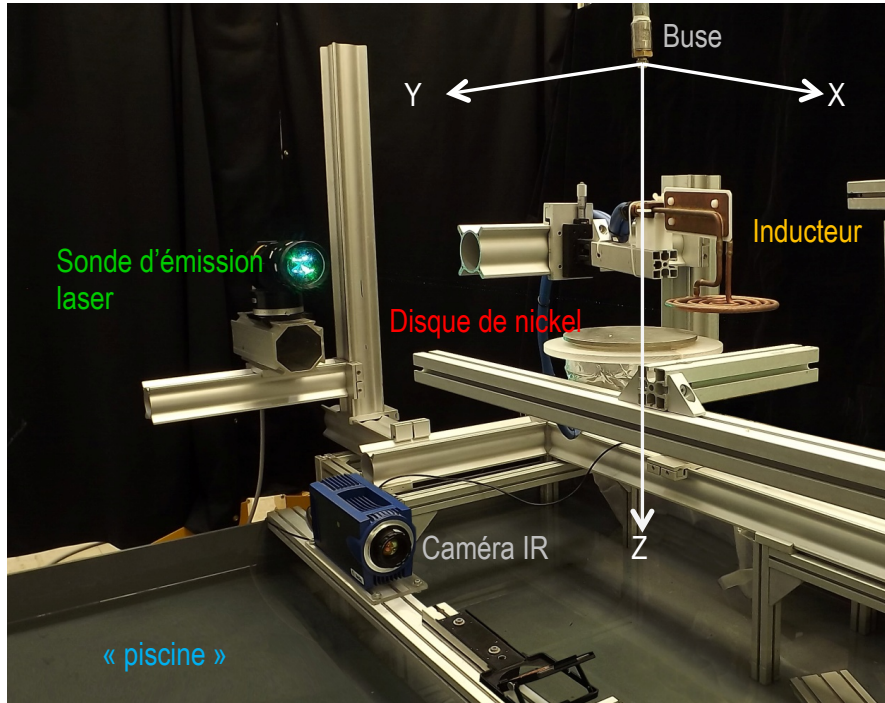


Principaux objectifs de l'étude globale:

1. Travailler avec de grands flux massique: *débit/surface* (en kg/s/m^2)
2. Approfondir la compréhension des liens entre les propriétés des sprays et le flux de chaleur extrait
3. Approfondir l'étude de l'hydrodynamique de l'impact
4. Comparer le refroidissement entre des sprays et jet liquide

⇒ Mise en oeuvre d'un banc expérimental spécifique adapté aux débits importants:

- ✓ *Circuit hydraulique*
- ✓ *Couplage de la technique de phase Doppler avec la technique de thermographie infra-rouge*



➤ Circuit hydraulique en boucle fermée: pompe centrifuge + un grand bac de récupération ($3 \times 4 \times 0.30 \text{ m}^3$)

➤ La surface: disque de nickel ($R = 87.5 \text{ mm}$; $e = 5 \text{ mm}$) chauffé par induction avec un inducteur rétractable placé sur la face avant



➤ Caractéristiques du jet liquide et des sprays

	Angle des sprays (°)	Débit injecté (l/mn)	Pression d'injection	Distance buse-plaque (mm)
Sprays 1	45	6.7	7	250
Sprays 2	45	6.7	3.7	250
Sprays 3	60	6.7	3.7	160
Jet liquide		6.7		250

3 diagnostics :

- Thermographie IR (flux de chaleur)
- 2D-PDA (caractéristiques des gouttes)
- Débitmétrie (flux massique)

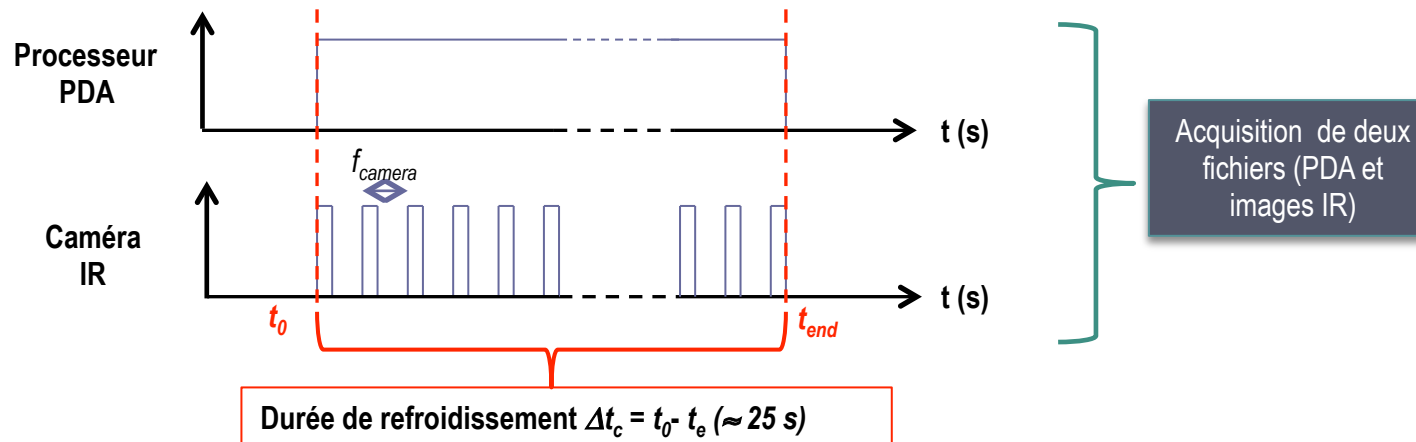
➤ Etude d'un phénomène transitoire

Expériences conduites en 2 étapes:

- Etape 1: chauffage de la plaque jusque environ 800°C
- Etape 2: application du spray (ou jet liquide) et observation du phénomène par PDA et caméra IR

➤ Les deux techniques de PDA et caméra IR sont synchronisées

Utilisation d'une sortie analogique du processeur PDA pour déclencher l'acquisition de la caméra IR



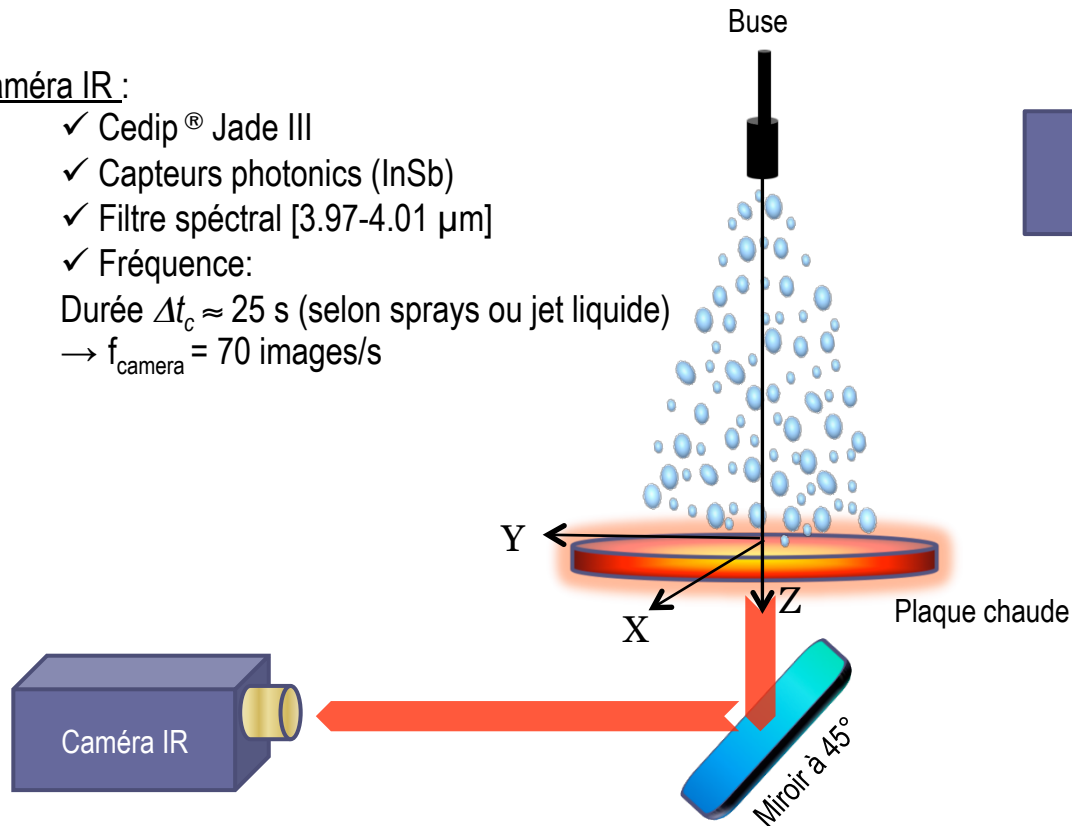
Objectif: déterminer la densité de flux de chaleur extraite par le liquide sur la face avant de la plaque

Caméra IR :

- ✓ Cedip® Jade III
- ✓ Capteurs photonics (InSb)
- ✓ Filtre spectral [3.97-4.01 μm]
- ✓ Fréquence:

Durée $\Delta t_c \approx 25$ s (selon sprays ou jet liquide)

→ $f_{\text{camera}} = 70$ images/s



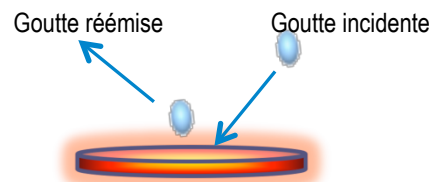
Température locale et instantanée à la face arrière $T_r(r,t)$

Modèle de conduction inverse

Estimation de la température de surface $T_w(r,t)$ et de la densité de flux $q_w''(r,t)$ sur la face avant

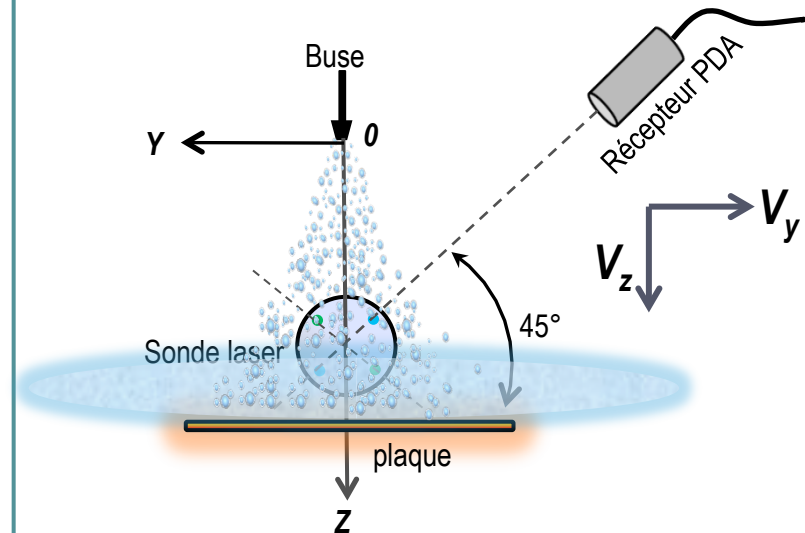
➤ Objectif des mesures PDA :

- Caractériser les sprays libres (*i.e.* sans la plaque)
- Etudier l'influence de la plaque sur l'écoulement amont du spray
- Caractériser l'hydrodynamique de l'impact

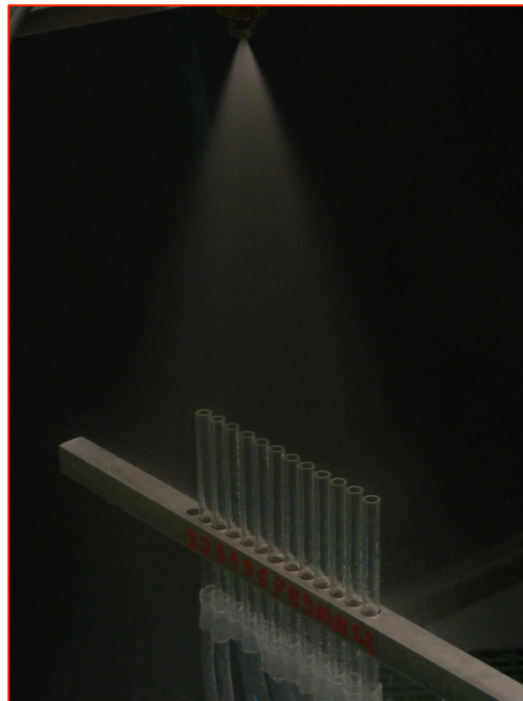
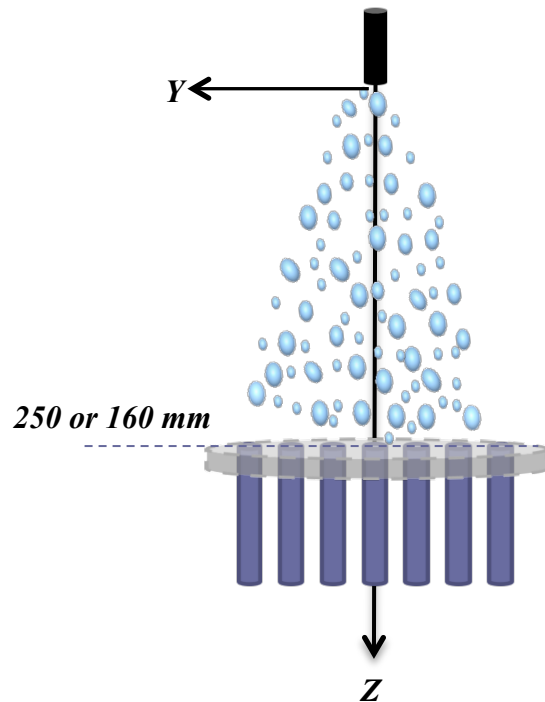


➤ Configuration optique

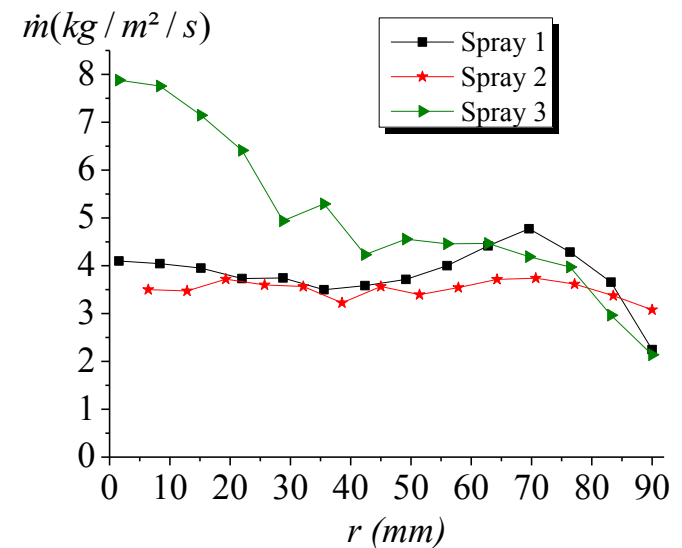
- Optimisation de la détection en élevant le récepteur PDA à 45° au-dessus de la plaque
- ⇒ Sonde émission pivotée à 45°
- ⇒ Vitesse: correction pour avoir 2 composantes (V_z et V_y) le long des axes Z et Y respectivement



- Objectif: déterminer la répartition du flux liquide dans les sections des 3 sprays
- Utilisation d'une rangée de 12 tubes ($\varnothing = 7.5 \text{ mm}$) connectés à des bouteilles individuelles
- Position supérieure des tubes = position face avant de la plaque
- Technique « laborieuse » mais robuste (incertitude de 5% environ)



Réduction: $\dot{m}(X, Y) \Rightarrow \dot{m}(r)$



RESULTATS DES MESURES DE FLUX DE CHALEUR

➤ Comparaison des performances

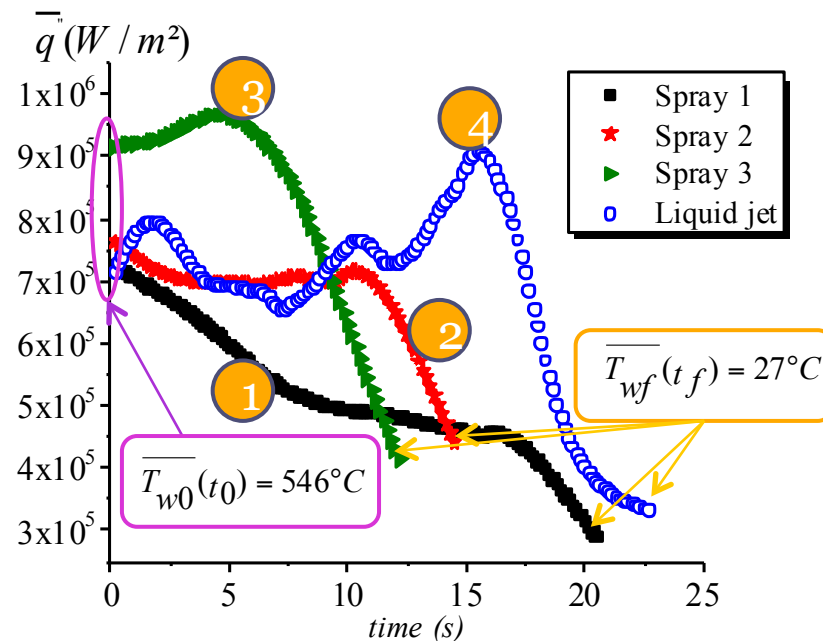
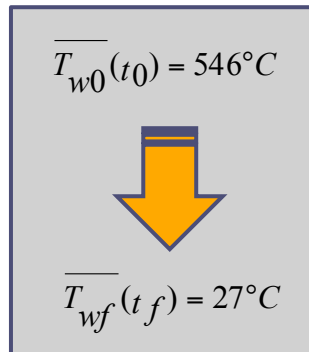
Pour les 3 sprays et le jet liquide: comparer le temps de refroidissement, les flux de chaleur extraits ou la consommation d'eau

➤ Méthode

- Prendre un refroidissement identique = même interval de diminution de la température de surface
- Calcule à chaque instant de la température moyenne spatiale $\bar{T}_w(t)$ ainsi que du flux de chaleur moyen spatial $\bar{q}''(t)$

$$\bar{T}_w(t) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R T_w(r,t) 2\pi r dr$$

$$\bar{q}''(t) = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R q_w''(r,t) 2\pi r dr$$



➤ Spray 3:

- ✓ Plus rapide
- ✓ Flux de chaleur important

➤ Jet liquide

- ✓ Flux de chaleur important
- ✓ Mais longue durée
- ✓ Et fortes fluctuations ⇒ non uniformité spatiale du refroidissement

➤ Cas des sprays

- ⇒ Flux diminue avec la vitesse verticale (cf: mesures locales PDA)
- ⇒ Flux augmente avec flux massique

$$\dot{m}_3 > \dot{m}_1 \approx \dot{m}_2$$

➤ Evolution de l'efficacité de refroidissement

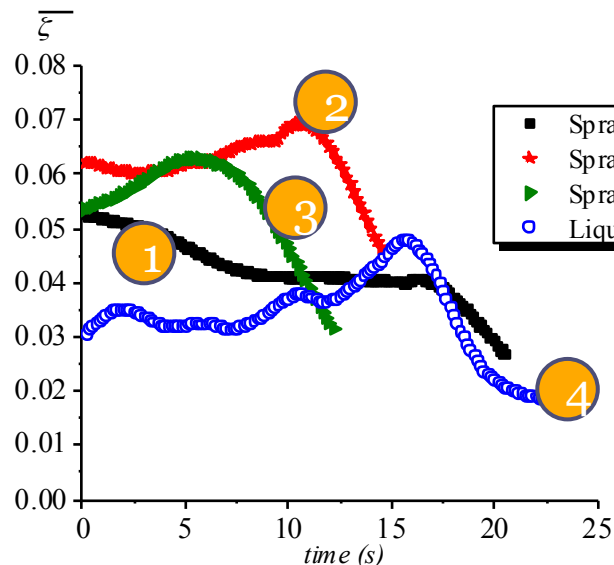
$$\bar{\xi}(t) = \frac{\bar{q}''(t)}{\dot{m}_0 [h_v + c_{pl}(T_{sat} - T_l) + c_{pv}(\bar{T}_w(t) - T_{sat})]}$$

↓ évaporation
 ↓ Chaleur sensible
 ↓ Échauffement de la vapeur

- h_v : chaleur latente de vaporisation (J/kg)
- c_{pl} : capacité liquide (J/kg/K)
- c_{pv} : capacité vapeur (J/kg/K)
- T_{sat} : température de saturation (K)
- T_l : température de la phase liquide (K)

avec \dot{m}_0 le flux liquid spatial moyen obtenu à partir des mesures de flux liquides locales

$$\dot{m}_0 = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R \dot{m}(r) 2\pi r dr$$



➤ Spray 2 a la plus grande efficacité de refroidissement alors que le jet liquide a la plus faible

➤ Cas des sprays
⇒ Efficacité diminue avec flux massique (locale)

Bilan des performances

Dispositif	Energie totale extraite E (kJ/m ²)	Durée Δt_c (s)	Puissance moyenne P_c (kW/m ²)	Débit injecté (L/mn)	Consommation en eau (L)
Spray 1	161	20.5	7.9	6.7	2.3
Spray 2	155	14.3	10.9	6.7	1.7
😊 Spray 3	152	12.2	12.6	6.7	1.4
☹️ Liquid jet	235	22.7	10.5	6.7	2.8

Energie totale extraite $E = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{\Delta t} \left[\int_0^R 2\pi r q''(r, t) dr \right] dt$

Puissance moyenne $P_c = \frac{E}{\Delta t_c}$

- Spray 3 semble avoir les meilleures performances :
 - ☞ plus courte durée de refroidissement
 - ☞ plus grande puissance moyenne
 - ☞ et plus faible consommation d'eau
- Spray 3 a le plus grand angle d'évasement (effet de la composante horizontale de la vitesse?)
- Jet liquide est le plus mauvais candidat

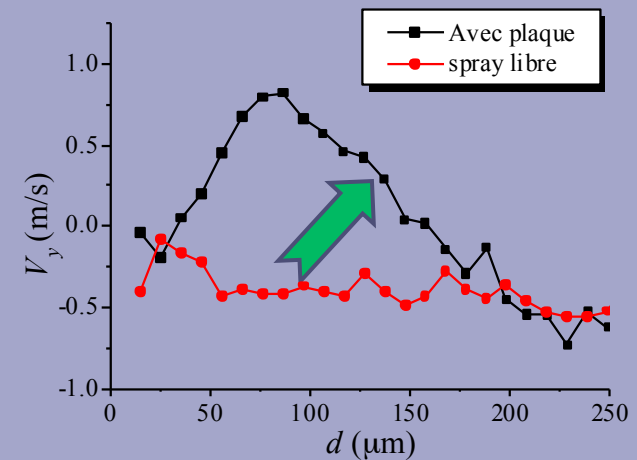
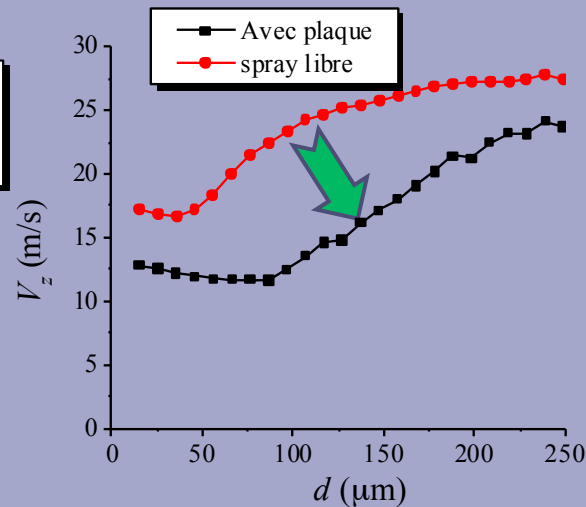
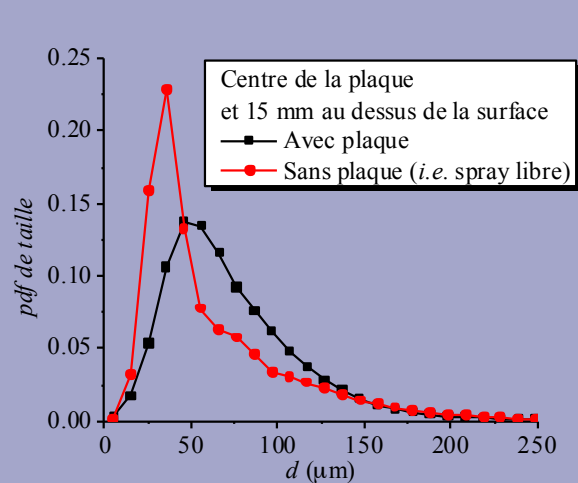
RESULTATS DES MESURES DE PHASE DOPPLER

1. Influence de la plaque

➤ Objectif

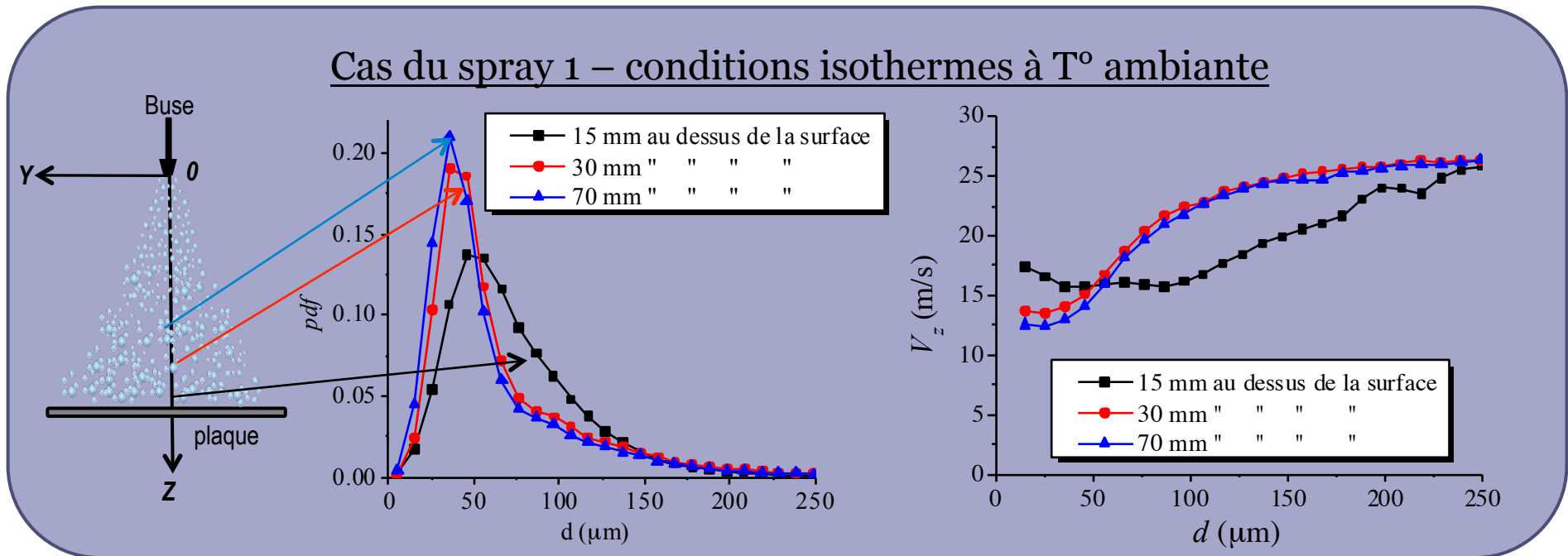
- Souvent, les propriétés des sprays sont mesurées et prises en l'absence de la surface d'impact
 - Ici: vérifier l'influence de la surface sur l'écoulement des sprays
- *comparer les caractéristiques des gouttes incidentes avec et sans la plaque de nickel*

Cas du spray 1 – conditions isothermes à T° ambiante



- Décalage de la distribution en taille vers les grosses gouttes
- Diminution de la vitesse verticale V_z
- Augmentation de la composante horizontale de la vitesse
- ⇒ **Déviation des gouttes incidentes (les plus petites) vers l'extérieur de la plaque**

➤ Mesures à différentes hauteurs au dessus de la surface du disque



→ l'effet de la plaque (déviation de l'écoulement gazeux) diminue bien en s'éloignant de la plaque

RESULTATS DES MESURES DE PHASE DOPPLER

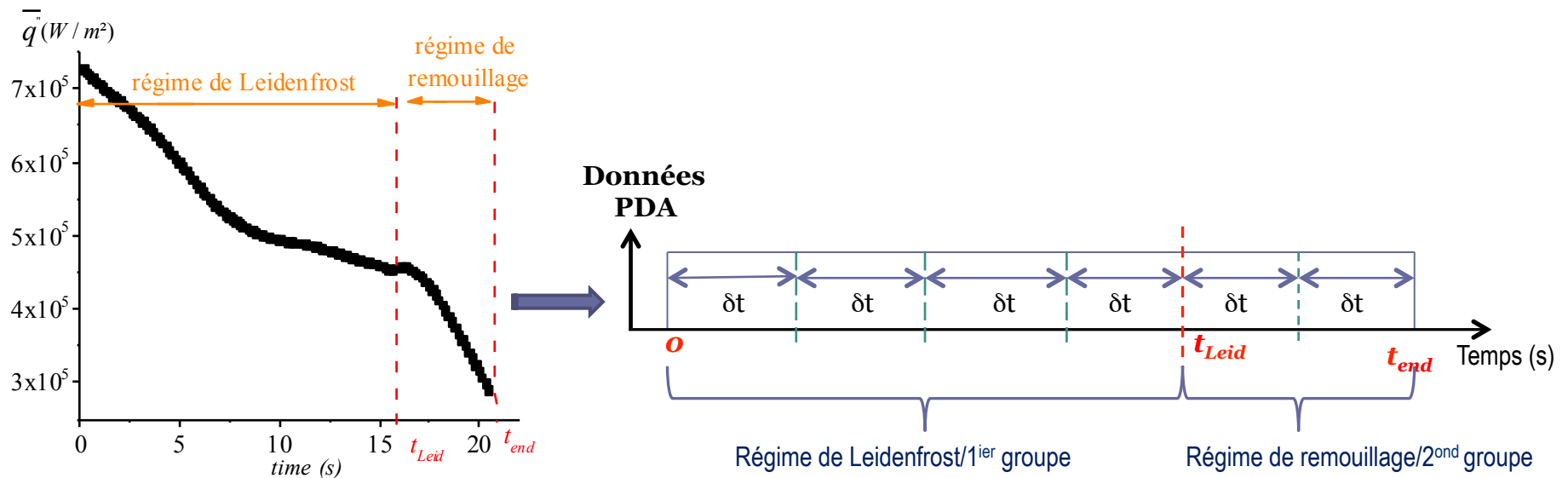
2. Evolution temporelle de l'impact

➤ Objectif

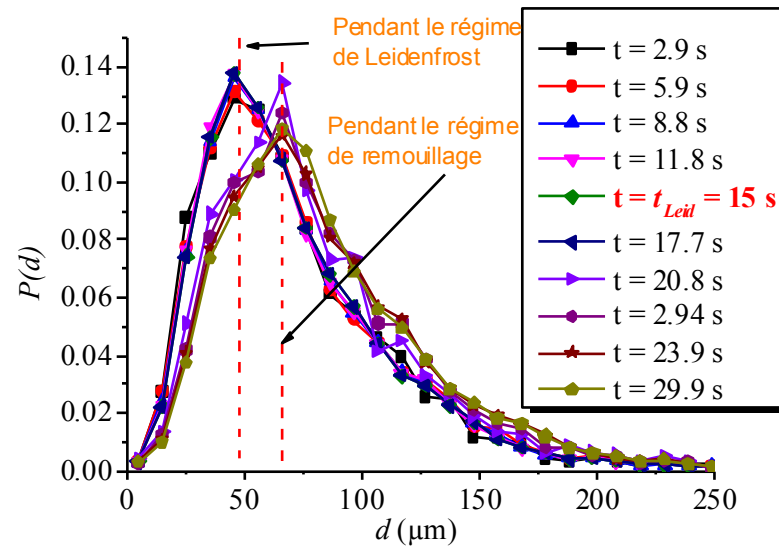
Etudier l'évolution temporelle de l'impact des gouttes pendant la durée complète du refroidissement, régime de Leidenfrost et de remouillage

➤ Méthode

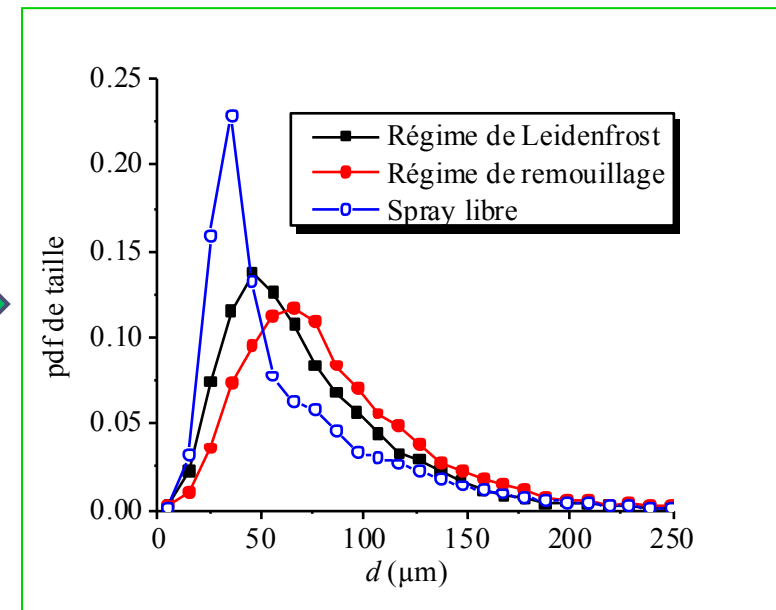
1. A partir d'une courbe de refroidissement, identifier le temps t_{Leid} qui correspond à la fin du régime de Leidenfrost
2. A partir des fichiers PDA, séparer les données en deux groupes:
→ un 1^{er} groupe avant t_{Leid} (c.à d. de $t = 0$ jusque $t = t_{Leid}$) et un 2nd jusque t_{Leid} (c.à d. de $t = t_{Leid}$ jusque $t = t_{end}$)
3. Pour chaque groupe, les propriétés des gouttes sont tracées pendant des intervalles de temps δt successifs



Cas du spray 1



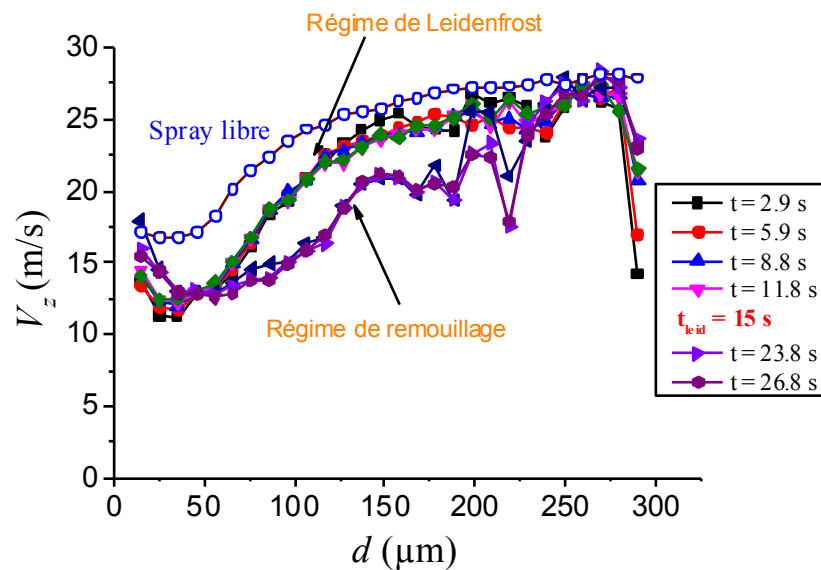
Distribution en taille des gouttes incidentes à différents instants (mesures au centre et 15 mm au-dessus de la plaque)



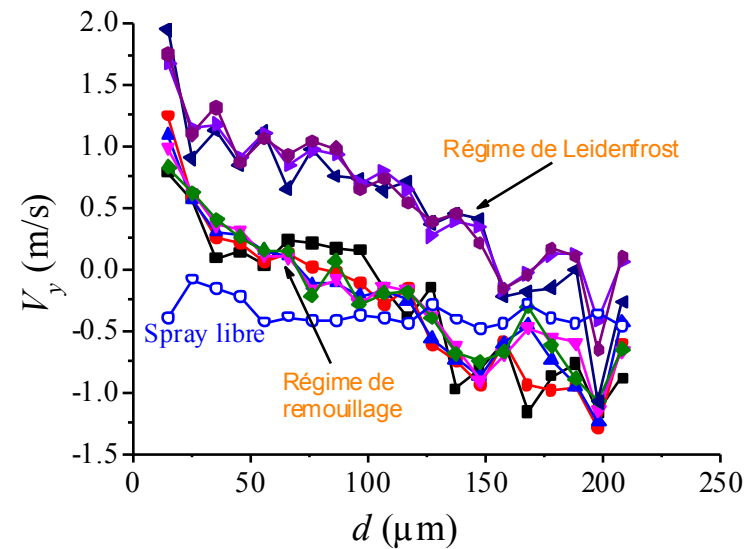
Distribution en taille des gouttes incidentes avant et après le régime de Leidenfrost

- Il apparaît deux groupes de distribution distincts: un par type de régime d'impact
- Les gouttes incidentes en régime de remouillage sont plus grosses : en adéquation avec l'évolution du diamètre moyen
 - diminution du nombre de petites gouttes incidentes détectées après le régime de Leidenfrost?
- A nouveau l'effet de la présence de la plaque avant et après le régime de Leidenfrost
 - déviation des petites gouttes?

Cas du spray 1



Corrélation taille/ V_z à différents instants

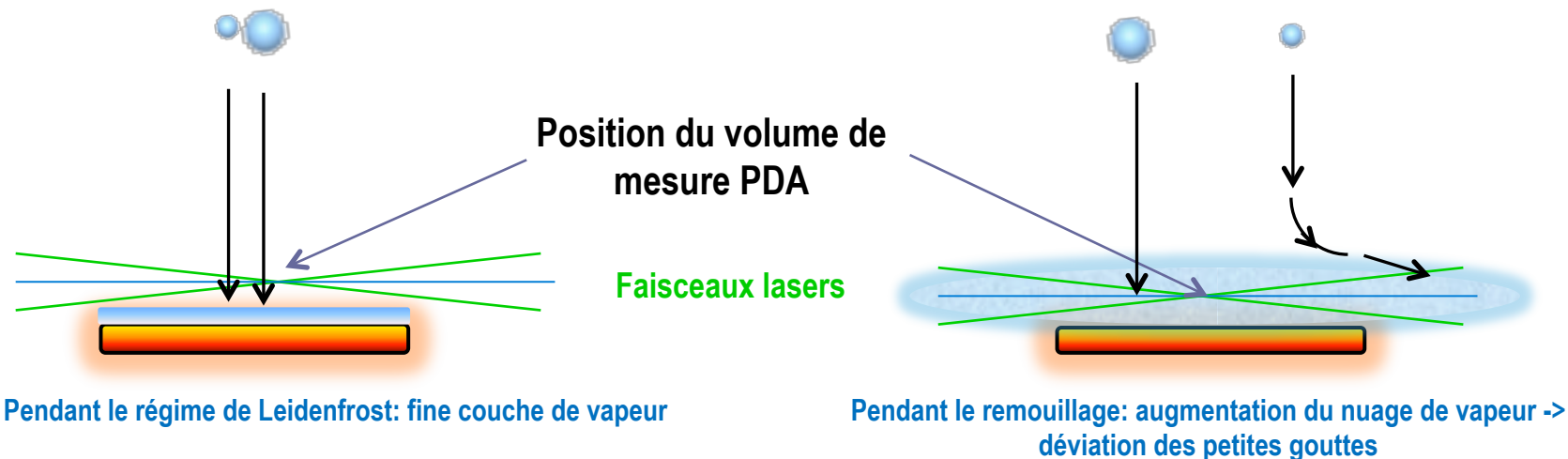


Corrélation taille/ V_y à différents instants

- Toujours deux groupes : un par type de régime d'impact
- A nouveau effet de la présence de la plaque pendant le refroidissement total: les petites gouttes sont ralenties et déviées
- Pourquoi une déviation plus importante lors du remouillage?

➤ Explication et hypothèse potentielle

- Le régime de remouillage est caractérisé par une plus forte évaporation (contact direct des gouttes avec la surface accentuée) et donc apparition d'un nuage de vapeur plus important
- Déviation des plus petites gouttes (faible Stokes) par le nuage de vapeur
- Comme le volume de mesure du PDA est dans le nuage de vapeur, diminution du nombre de petites gouttes détectées

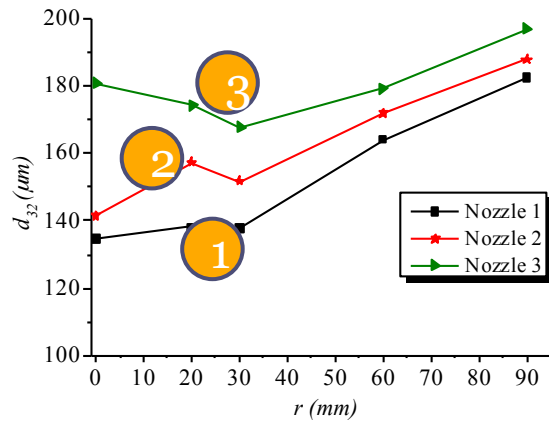


Perspectives

- Mesures avec des débits liquides encore plus grands (déjà réalisées et en cours d'analyse)
- Introduire la technique de LIF, couplée avec celle du PDA, sur le banc expérimentale (en cours de réalisation)

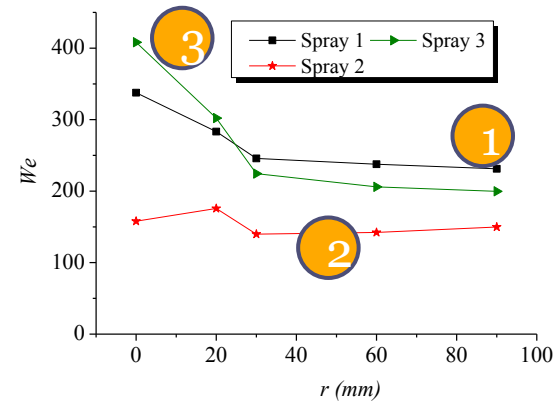
Use of PDA measurements

➤ Influence of the Sauter Mean diameter (SMD) d_{32} and the normal Weber number (based on the vertical velocity w and the SMD)



Evolution of the SMD along the radius

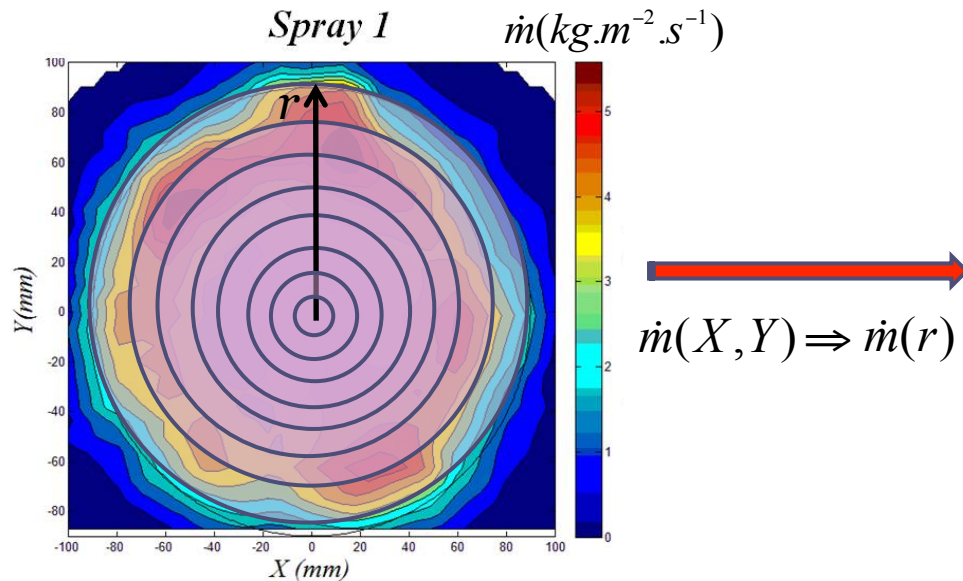
➤ In mean along the radius:
 $SMD(3) > SMD(2) > SMD(1)$
 ☞ $[q''(3) > q''(2) > q''(1)]$
 ⇒ Heat flux increases with the SMD



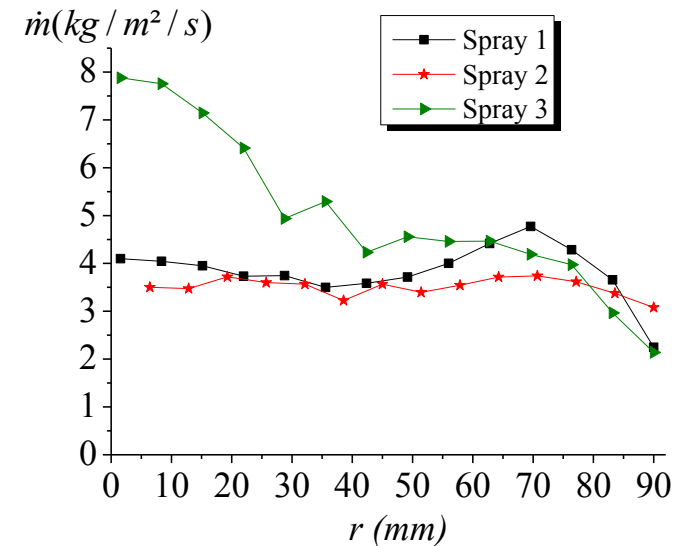
Evolution of the normal Weber number along the radius

➤ In mean along the radius:
 $We(3) \approx We(1) > We(2)$
 ☞ $[\xi(2) > \xi(3) > \xi(1)]$
 ⇒ Influence of the normal We number
 also harder for spray 1 et 3

- **Objectif:** corréler localement les propriétés des sprays avec le flux de chaleur extrait
- Toutes les grandeurs **G** issues de *IRT*, *PDA* ou *flux massique* sont moyennées selon la coordonnée azimutale dans une couronne de rayon r et d'épaisseur dr . $\mathbf{G}(X;Y) \Rightarrow \mathbf{G}(r)$



Exemple: flux massique du spray 1

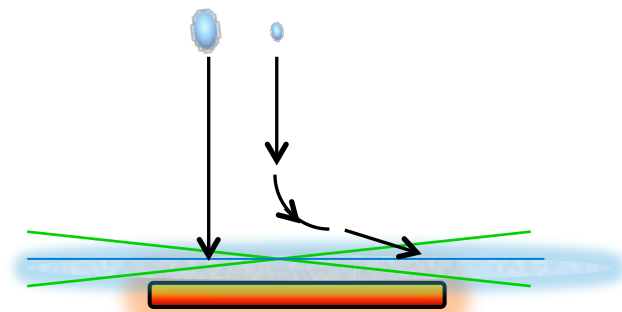


Pour les 3 sprays

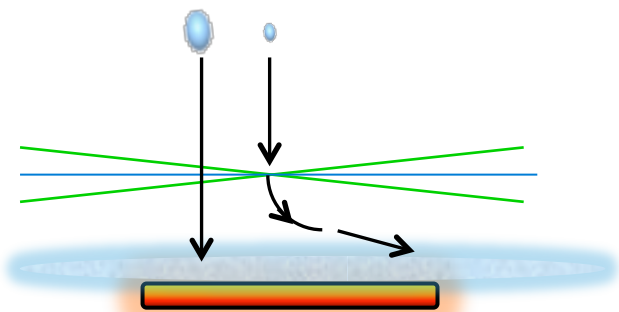
$$\dot{m}_3 > \dot{m}_1 \geq \dot{m}_2$$

➤ Vérification de l'hypothèse

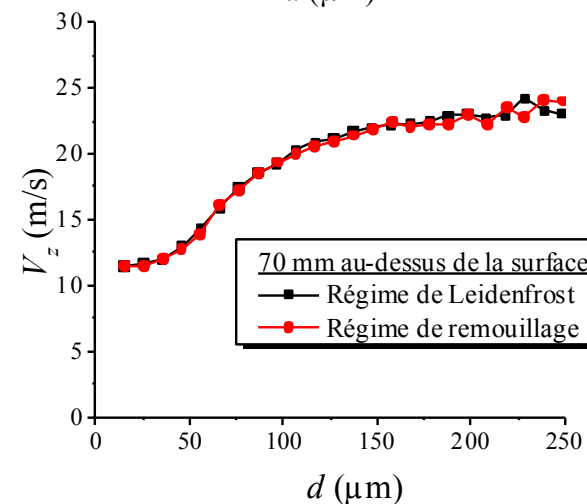
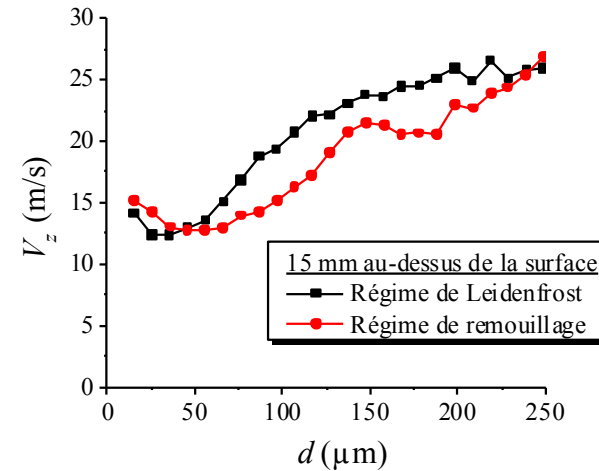
- Mesures PDA en s'éloignant de la surface pour "sortir" du nuage de vapeur
- Corrélation taille/ V_z avant et après le régime de Leidenfrost



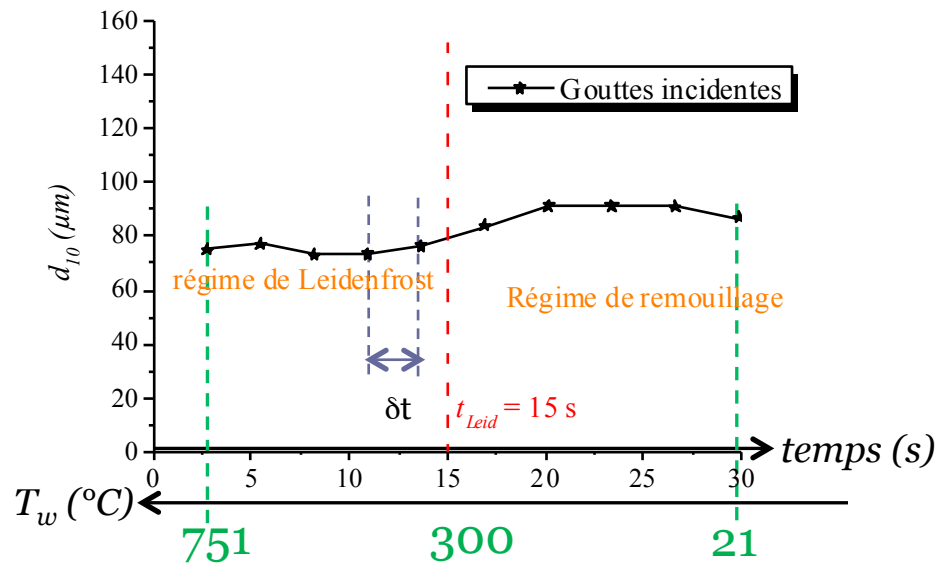
Remouillage; Volume de mesure PDA 15 mm au-dessus de la surface



Remouillage; Volume de mesure PDA 70 mm au-dessus de la surface



Cas du spray 1



Evolution du diamètre moyen d_{10} à différents instants (mesures au centre et à 15 mm au dessus de la plaque) ou en fonction de la température de surface T_w

- Evolution stable du diamètres moyen incident et ré-émis avant et après t_{Leid}
- Le diamètre moyen incidents et ré-émis augmente au passage de t_{Leid}
→ diminution du nombre de petites gouttes détectées?