HAL
open science

# Mesures couplées PDA-LIF3c et thermographie infrarouge appliquées à l'étude de l'impact de sprays sur une paroi chaude en régime de Leidenfrost

Juan-David Peña-Carrillo, Alexandre Labergue, Michel Gradeck, Fabrice Lemoine

## To cite this version:

Juan-David Peña-Carrillo, Alexandre Labergue, Michel Gradeck, Fabrice Lemoine. Mesures couplées PDA-LIF3c et thermographie infrarouge appliquées à l'étude de l'impact de sprays sur une paroi chaude en régime de Leidenfrost. Congrès Français de Thermique SFT 2016, Société Française Thermique, May 2016, Toulouse, France. hal-01449540

**HAL Id: hal-01449540**

**https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01449540v1**

Submitted on 30 Jan 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Mesures couplées PDA-LIF3c et thermographie infrarouge appliquées à l'étude de l'impact de sprays sur une paroi chaude en régime de Leidenfrost

**Juan-David PEÑA-CARRILLO[1,2*], Alexandre LABERGUE[1,2], Michel GRADECK[1,2], Fabrice LEMOINE[1,2]**

[1]LEMTA, UMR 7563, Université de Lorraine, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France

[2] LEMTA, UMR 7563, CNRS, Vandœuvre-Lès-Nancy, 54518, France

[*](auteur correspondant : penacarr1@univ-lorraine.fr )

**Résumé -** Cet article présente une étude du refroidissement de surfaces chaudes en utilisant des sprays d'eau dans des conditions semi-industrielles. Des mesures couplées d'analyse par phase Doppler (PDA) et de fluorescence induite par laser (3cLIF) sont menées afin de déterminer la température des gouttes par classe de taille avant et après impact. En parallèle, le flux extrait à la paroi par le spray est estimé par thermographie infrarouge. De cette façon, la combinaison des trois techniques de mesures permet d'établir un bilan d'énergie afin d'estimer la masse de liquide évaporée.

**Nomenclature**

| | |
|---|---|
| *we* | nombre de Weber |
| *ja* | nombre de Jakob |
| *cp* | chaleur massique, $J.kg^{-1}.K^{-1}$ |
| *lv* | chaleur latente de vaporisation, $J.kg^{-1}$ |
| *q* | densité d'énergie, $J.m^{-2}$ |
| $\varphi$ | densité de flux de chaleur, $W.m^{-2}$ |
| g | debit surfacique, $kg.m^{-2}.s^{-1}$ |
| *m* | flux massique, $kg.m^{-2}$ |
| $\Delta t_{leid}$ | durée du régime de Leidenfrost, s |
| *t* | température, °C |
| *r* | coordonnée radiale, m |
| *z* | coordonnée verticale, m |

*Symboles grecs*

| | |
|---|---|
| $\lambda$ | longueur d'onde, m |
| $\rho$ | masse volumique, $kg.m^{-3}$ |
| $\sigma$ | tension de surface, $N.m^{-1}$ |

*Indices et exposants*

| | |
|---|---|
| *d* | goutte |
| *l* | liquide |
| *v* | vapeur d'eau |
| e | évaporation |
| *leid* | Leidenfrost |
| *film* | film de vapeur |
| *a* | après impact |
| *b* | avant impact |
| *sat* | saturation |
| *w* | surface |
| 10 | diamètre moyen |

## 1. Introduction

L'eau est largement utilisée pour refroidir une surface à haute température lorsqu'il est nécessaire d'extraire des hauts flux de chaleur. Les applications industrielles sont nombreuses : dans l'industrie métallurgique, cette technologie est appliquée au traitement thermique afin d'améliorer les propriétés des matériaux ou dans la sécurité nucléaire pour garantir l'état du cœur du réacteur en cas d'accidents de perte de refroidissement par exemple. Différentes méthodes de refroidissement sont utilisées : l'immersion ('pool boiling'), l'impact de jets liquides et sprays. L'immersion et les jets d'eau permettent un refroidissement rapide mais il n'est pas complétement uniforme. En comparaison, le refroidissement par sprays d'eau semble

intéressant parce qu'il permet une meilleur uniformité spatiale du refroidissement tout en diminuant la consommation d'eau conduisant ainsi à des économies d'énergie. Cependant, l'utilisation des sprays d'eau dans l'industrie n'est pas encore répandue parce que la connaissance des mécanismes qui se produisent lorsque des gouttes interagissent avec une paroi chauffée est encore incomplète.

Le présent travail caractérise le refroidissement de surfaces chaudes en régime de Leidenfrost en utilisant des sprays polydispersés. Les paramètres qui définissent l'interaction paroi/goutte sont nombreux : caractéristiques des gouttes (viscosité, masse volumique, tension superficielle, angle d'incidence, vitesse d'incidence, diamètre et température) et caractéristiques de la paroi (température, rugosité). Afin d'étudier l'influence de ces paramètres, quelques travaux de recherche ont été menés; En général, ces études ont centré leur attention soit sur l'hydrodynamique de l'impact [1][2], soit sur les transferts de chaleur[3][4]. Par contre, la caractérisation des transferts thermiques au niveau des gouttes (phase vapeur/liquide et transfert liquide/solide) est nettement moins abordée: l'estimation de la variation relative de la chaleur sensible des gouttes ainsi que de la masse évaporée lors de l'impact n'a encore jamais été traitée. En effet, l'estimation de ces grandeurs nécessite de mesurer la température des gouttes et seules des techniques optiques non intrusives peuvent relever ce défi. Récemment, la fluorescence induite par laser 2cLIF a permis de mesurer la température de gouttes individuelles en régime de Leidenfrost. La chaleur sensible lors de l'impact a pu être déterminée ainsi que la masse évaporée.[5]

Dans ce cadre, la présente étude vise à utiliser la technique de 2cLIF dans le cas de l'impact d'un spray d'eau sur une surface chaude. Toutefois, il a été démontré que l'application directe de la 2cLIF n'est pas possible dans le cas de sprays notamment à cause de la polydispersion en taille des gouttes qui induit un biais. Ainsi, la fluorescence induite à trois couleurs (3cLIF) a été mise en œuvre afin de pouvoir effectuer des mesures dans le cas de sprays [6], [7]. En plus, la 3cLIF a été couplée avec la technique d'analyse par phase Doppler PDA afin d'obtenir la température des gouttes par classe de taille [8], [9].

L'objectif principal du présent travail consiste à appliquer la technique couplée PDA-3cLIF afin de déterminer la température de gouttes par classe de taille avant et après impact dans le cas d'un spray polydispersé impactant une surface chaude en régime de Leidenfrost. En outre, ce travail est réalisé dans des conditions semi-industrielles : flux massiques liquides importants (8 $kg.m^{-2}.s.$), taille de gouttes jusque 300 µm et surface à refroidir de grande dimension (plaque de diamètre 175 mm). Le flux de chaleur extrait par les gouttes est déterminé à l'aide de mesures par thermographie infrarouge couplées à une technique inverse. En combinant les résultats des techniques de mesure précédentes, un bilan d'énergie pourra être établi afin d'estimer la masse de liquide évaporée. Des sprays ayant différentes caractéristiques (angle de sortie, pression d'injection ou débit) seront utilisés afin d'analyser l'influence du nombre de Weber impactant ou de la distribution du flux liquide.

## 2. Dispositif expérimental

Une représentation du banc expérimental est illustrée dans la *Figure 1*. Il s'agit principalement d'un circuit permettant la circulation en boucle fermé de l'eau ensemencée avec de la sulforhodamine-B et composé d'une pompe centrifuge (repère 2), d'une cuve de stockage d'eau (repère 1) et d'une enceinte métallique cylindrique où le refroidissement de la surface chaude a lieu (repère 7). L'expérience est divisée en 2 étapes. La première étape est la phase de chauffage de la plaque à refroidir (disque de nickel de 87.5 mm de rayon et de 5 mm

d'épaisseur) qui est placée au centre de l'enceinte sur un support en quartz (repère 5). Le chauffage est effectué par induction électromagnétique (12 kW ; Five-Celes®). La deuxième étape est la phase de refroidissement en appliquant le spray. L'axe de l'injecteur coïncide avec le centre de la plaque. Afin de limiter la durée d'établissement du refroidissement, essentiellement liée à la pompe, un second spray identique est injecté directement dans la cuve durant la phase de chauffage. Les buses des deux sprays sont pilotées avec des électrovannes.

Pour analyser l'influence des différentes grandeurs caractéristiques lors du refroidissement (Distribution en taille et vitesse des gouttes), trois buses ont été utilisées. Un analyseur par phase Doppler est utilisé (Dantec Dynamic®) (repère 10) pour avoir accès à la taille des gouttes ainsi qu'à la composante verticale de la goutte (axe Z) grâce à la mesure de fréquence de la lumière réfractée par les gouttes en traversant le volume éclairé formé par l'intersection de deux faisceaux lasers (sonde d'émission Dantec Dynamic®) issus d'une source laser à argon ($\lambda$=514.5nm). En utilisant la technique de la Fluorescence induite par laser à trois bandes spectrales (3cLIF) il est possible déterminer la température des gouttes en fonction de l'intensité d'émission spontanée du traceur fluorescent dilué dans de l'eau (sulforhodamine-B). La fluorescence est activée en utilisant la même source laser de la PDA. Pour estimer le flux de chaleur extrait par les gouttes en face avant du disque de nickel, une caméra infrarouge (Cedip Jade III) permet de mesurer la température en face arrière pour ensuite remonter à l'information en face avant en utilisant un problème inverse de conduction de la chaleur [10]. La répartition de flux massique est mesurée par débitmètre en utilisant des tubes alignés de diamètre 7.5 mm. La section supérieure des tubes est au même niveau que la face avant du disque

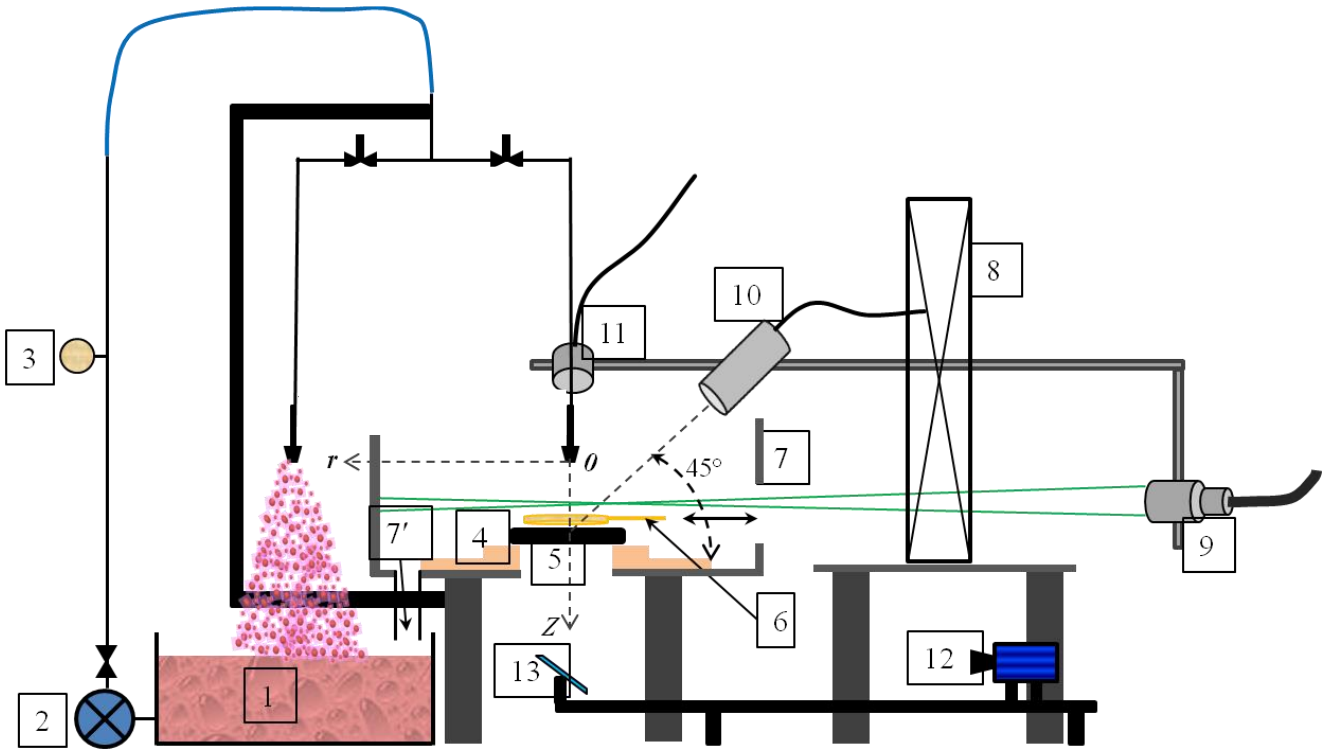


Figure 1. *Banc expérimental et implémentation des techniques optiques de mesure (couplage PDA-LIF et thermographie IR). Vue de côté. 1- Cuve d'eau; 2 -pompe centrifuge; 3-manomètre ; 4-Support en quartz ; 5- disque de nickel ; 6- Inducteur électromagnétique ; 7- enceinte métallique ; 8- système de déplacement 3D ; 9- source d'émission laser ; 10-Sonde PDA ; 11- Optique de collection 3cLIF ; 12- caméra IR ; 13- miroir*

### 2.1. Procédure expérimentale

La plaque de nickel est d'abord chauffée jusqu'à 800°C (contrôle en temps réel avec la caméra IR). Ensuite, le spray est appliqué et les techniques de mesure couplage PDA-3cLIF et caméra IR sont synchronisées (*Figure 2*). Pour cela, la sortie Trigger du processeur PDA est utilisée afin de piloter les techniques de mesures ainsi que les électrovannes. Ce procédé permet de suivre en même temps le flux de chaleur, la vitesse, le diamètre et la température des gouttes avant et après impact. L'acquisition des données est arrêtée lorsque le disque atteint la température ambiante. Néanmoins, l'étalonnage de la caméra limite la gamme de température mesurable (peu de sensibilité pour des températures inférieures à 100°C ).
Etant donné que le couplage PDA-LIF3c est une technique ponctuelle, un système de déplacement 3D (repère 8, *Figure 1*) est utilisé afin de déplacer le volume de mesure le long de les axes *Z* et *r*. En conséquence, les expériences de refroidissement doivent être répétées afin de caractériser spatialement le refroidissement au-dessus du disque. Enfin, pour des raisons pratiques, l'analyse du refroidissement est limitée au régime de Leidenfrost pendant une durée notée $\Delta t_{leid.}$

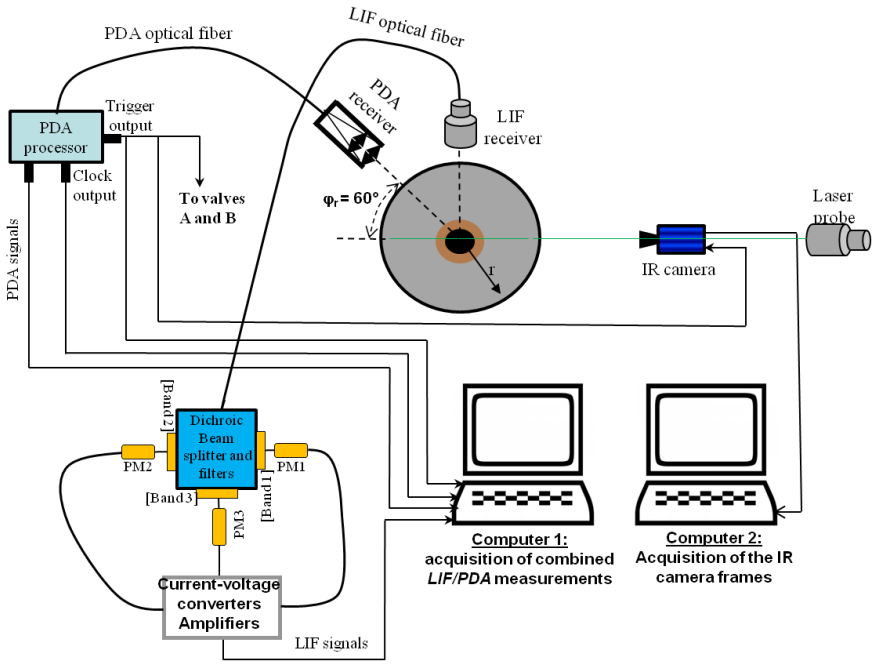


Figure 2. *Principe de synchronisation des techniques PDA-LIF3et caméra IR*

## 3. Résultats

Les résultats obtenus pour des mesures réalisées à Z=15 mm au-dessus de la face avant de la plaque sont présentés. Pour chaque spray, les mesures ont été faites pour trois positions radiales : r/R=0, 0.5 et 0.8 ; comme conséquence, 9 expériences ont été menées au total. La *Figure 3* illustre l'échauffement moyen des gouttes $\Delta\tilde{T}_m$ le long du rayon du disque. Cette valeur correspond à l'augmentation moyenne en température lors de l'impact $\Delta\tilde{T}_m = \tilde{T}_{ma} - \tilde{T}_{mb}$ calculée sur toutes les classes de taille. Il est possible de constater qu'il n'y a pas de variation considérable de température radiale. Ainsi, une valeur moyenne d'échauffement de l'ordre de 8°C est mise en évidence pour les trois buses analysées.

La *Figure 4* illustre la température après impact pour trois classes de taille pour les trois buses analysées et les trois positions r/R. Il est possible de constater une augmentation significative de la température après l'impact lorsque le diamètre des gouttes augmente.

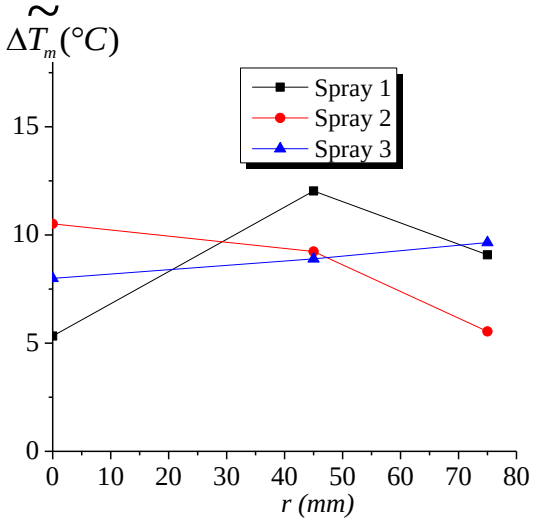


Figure 3. *Evolution de l'échauffement moyen le long de l'axe pour les 3 sprays*

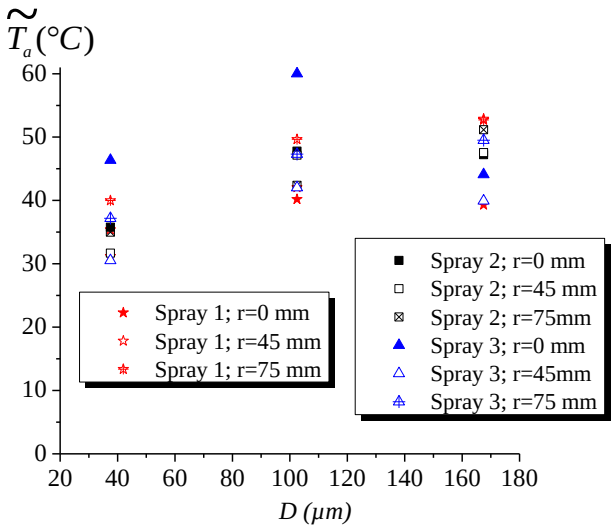


Figure 4. *Température moyenne des gouttes après l'impact en fonction du diamètre pour les 9 expériences réalisées.*

Le bilan d'énergie pour une seule goutte impactant la surface pendant le régime de Leidenfrost est schématisée dans la *Figure 5*. Avant l'impact, la goutte a une masse initiale *m* à une température $T_b$. Après l'impact, la température est $T_a$ et la masse devient $m- m_e$, *avec* $m_e$ la masse évaporée.

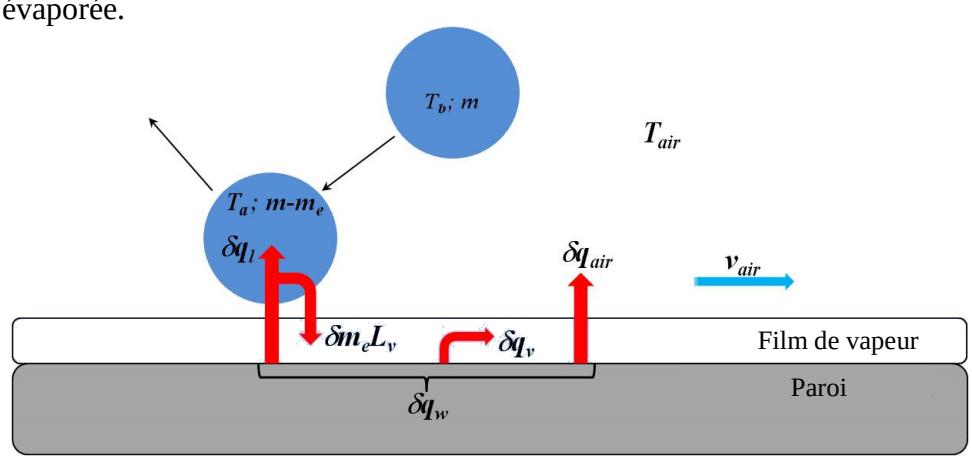


Figure 5. *Bilan d'énergie pour une goutte impactant une surface chaude en régime de Leidenfrost.*

En négligeant le flux de chaleur extrait par convection forcée dû au flux d'air entrainé par le spray impactant la surface $\delta q_{air}$, l'énergie total extraite de la surface chaude peut être quantifié comme la somme de trois contributions :

- La chaleur sensible prise par la goutte $\delta q_l$
- La chaleur latente de vaporisation $\delta m_e L_v$
- La chaleur prise par la couche de vapeur entre la goutte et la paroi $\delta q_v$

Comme le flux de chaleur extrait $\varphi_w$ est une fonction du temps, le bilan d'énergie par unité de surface ($J/m^2$) est écrit pour chaque pas de temps $\delta t$ au cours du refroidissement

$$\delta q_w\,(\mathrm{r}, \delta t) = \delta q_l\,(\mathrm{r}, \delta t) + \delta m_e\,(\mathrm{r}, \delta t) + \delta q_v\,(\mathrm{r}, \delta t) \qquad (1)$$

$\delta q_w$ est obtenu par méthode inverse à partir des mesures par thermographie IR [10]:

$$\delta q_w\,(\mathrm{r}, \delta t) = \varphi_w(\mathrm{r}, \delta t).\,\delta t \qquad (2)$$

La densité de flux estimée correspond au cumul des flux individuels extrait par toutes les

gouttes impactant la surface chaude quelles que soient leurs caractéristiques (diamètre et vitesse normale). Il n'est donc pas possible d'exploiter le bilan d'énergie par classe de taille.

La chaleur sensible par unité de surface extraite par le liquide pour une position radiale déterminée peut s'écrire :

$$\delta q_l\,(\mathrm{r}, \delta t) = C_{pl}[\delta m(r) - \delta m_e(r, \delta t)][\mathrm{T}_{ma}(r) - \mathrm{T}_{mb}(r)] + C_{pl}\,\delta m_e(r, \delta t)[\mathrm{T}_{sat} - \mathrm{T}_{mb}(r)] \qquad (3)$$

Dans l'expression précédente, $\delta m$ est le flux liquide massique ($kg/m^2$) impactant la surface pendant l'intervalle du temps $\delta t$. Cette valeur peut être estimée en utilisant les mesures de flux massique par débitmètre G(r) ($\delta m = G.\,\delta t$). $\delta m_e$ le flux instantanée massique évaporé ($kg/m^2$) qui dépend également du temps ainsi que de la position radiale. $\mathrm{T}_{ma}$ et $\mathrm{T}_{mb,}$ les températures moyennes des gouttes après et avant impact respectivement mesurées à l'aide de la technique 3cLIF. La chaleur extraite par la couche de vapeur peut être estimée de la façon suivante :

$$\delta q_v(\mathrm{r}, \delta t) = C_{pv}\,\delta m_e(r, \delta t)[\mathrm{T}_v(r, \delta t) - \mathrm{T}_{sat}] \qquad (4)$$

La température de vapeur $\mathrm{T}_v$ est inconnue. Cependant, une bonne approximation consiste à utiliser la température du film de vapeur :

$$\mathrm{T}_v(r, \delta t) \approx T_{film}(r, \delta t) = \frac{T_w(r, \delta t) - T_{sat}}{2} \qquad (5)$$

Finalement, en utilisant le nombre de Jakob ($Ja = C_{pv}\left[T_{film} - T_{sat}\right]/\,Lv$), le flux massique de liquide évaporé pendant l'intervalle $\delta t$ devient:

$$\delta m_e = \left(\frac{\varphi_w(\mathrm{r}, \delta t) - \mathrm{G(r)}C_{pl}[\mathrm{T}_{ma}(r) - \mathrm{T}_{mb}(r)]}{Lv[1 + Ja(\mathrm{r}, \delta t)]}\right)\delta t \qquad (6)$$

L'expression précédente a été établie pour analyser le régime de Leidenfrost, pour cela il est nécessaire de bien identifier le point de Leidenfrost du refroidissement en exploitant les résultats issus de la caméra IR. Ce point se trouve à l'instant où la dérivée de la température tombe sur sa valeur minimum

Un exemple d'évolution du flux massique évaporé relatif ($\delta m_e/\delta m$) pour le spray en utilisant les corrélations précédentes est montré dans la *Figure 6* pour le spray 1 à r/R=0 et 0.8. On constate que :

- Les pertes de masse liquide varient entre 2% et 5% après impact en fonction de la position au long du disque
- Une augmentation de la masse relative évaporée pour les deux positions au fur et à mesure que l'expérience de refroidissement évolue.
- L'évolution de la masse évaporée relative est plus significative pour la position r/R=0.8. Pour le centre de la plaque (r/R=0), une tendance plus stable est notée.

Les derniers points précédents peuvent s'expliquer ainsi :

- L'épaisseur de la couche de vapeur diminue avec la température de paroi en régime de Leidenfrost et cela implique qu'au fur et à mesure que le refroidissement évolue, le contact des gouttes d'eau avec la surface chaude soit plus performant entrainant ainsi une masse de vapeur plus significative.
- La non homogénéité du chauffage par induction et la poly-dispersion du spray engendrent une différence entre les températures du centre et du bord du disque au long de l'expérience (*Figure 7*). On note un refroidissement différent à r/R=0 et à r/R=0.8. En effet, au centre de la plaque (r/R=0), la vitesse du flux d'air entraîné par le spray est relativement faible. L'air ambiant est saturé plus rapidement en vapeur, diminuant ainsi considérablement la vaporisation du liquide.

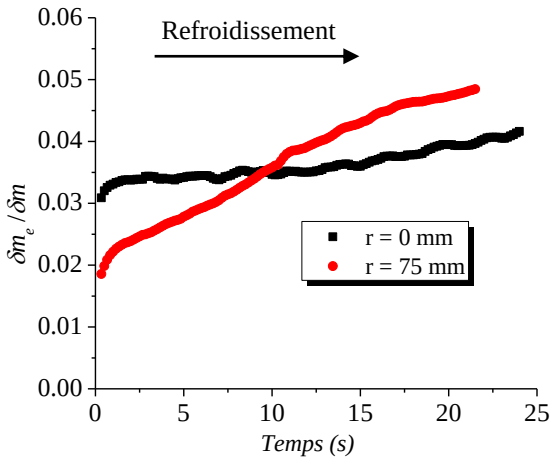


Figure 6. *Evolution de la masse relative d'évaporation en fonction du temps pour r/R=0 et 0.8.*

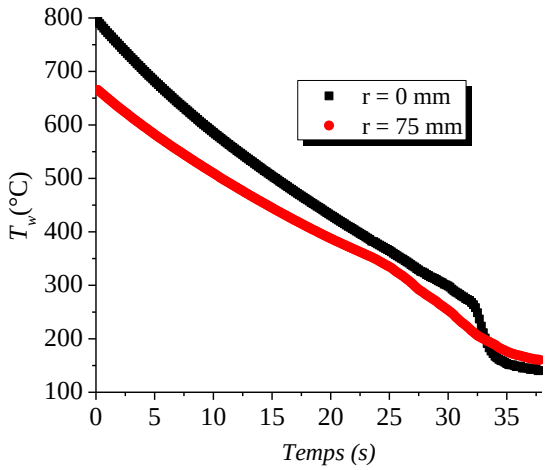


Figure 7. *Evolution de la température de paroi en fonction du temps pour r/R=0 et 0.8*

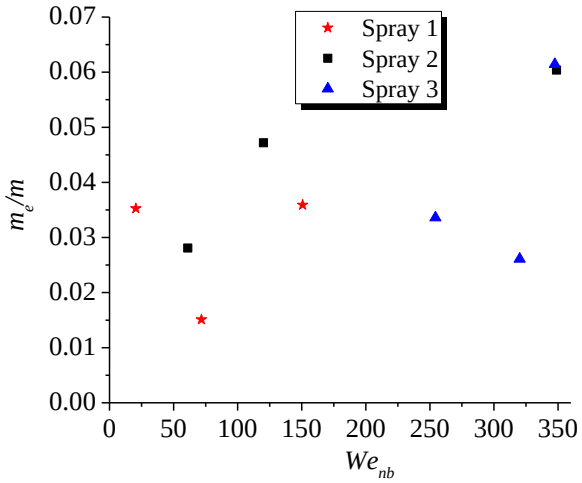


Figure 8. *Evolution de la masse relative évaporée pendant tout le régime de Leidenfrost en fonction du nombre de Weber normal incident pour les trois buses à trois positions radiales.*

En outre, la masse relative évaporée totale (i.e. intégrée sur toute la durée du régime de Leidenfrost) a été analysée pour les trois positions radiales r/R et pour les trois sprays. Pour cela, la masse évaporée a été cumulée au long du régime de Leidenfrost pour les trois positions radiales en utilisant l'expression suivante :

$$m_e(r) = \int_0^{\Delta tLeid} \left( \frac{\varphi_w(\mathrm{r}, \delta t) - \mathrm{G}(\mathrm{r}) C_{pl}[\mathrm{T}_{ma}(r) - \mathrm{T}_{mb}(r)]}{Lv[1 + Ja(\mathrm{r}, \delta t)]} \right) \delta t \approx \sum_{i=1}^{\frac{\Delta tLeid}{\delta t}} \delta m_{ei}(r, \delta t) \qquad (7)$$

Les résultats sont consignés dans la *Figure 8* en fonction du nombre de Weber incident avant impact $We_{nb}$ qui est calculé à partir de la vitesse moyenne $V_b$ et le diamètre moyen $D_{10b}$ :

$$We_{nb} = \frac{\rho w_b D_{10b}}{\sigma} \qquad (8)$$

La masse de liquide évaporée reste dans l'ordre de quelques pourcents (jusqu'au 6%). Comme on pouvait s'y attendre en raison de l'augmentation du diamètre d'étalement de la goutte proportionnellement au nombre de Weber, la masse relative évaporée $m_e/m$ s'accroit avec le nombre de Weber pour les trois buses analysées même si les résultats sont relativement disparates. Ce résultat est conforme à une série de travaux précédents menés pour des gouttes mono-disperses calibrées [5]

## 4. Conclusions:

Quelques techniques de métrologie fluide et thermique ont été exploitées afin d'étudier l'interaction d'une population de gouttes avec une paroi chaude. La technique de fluorescence induite par laser LIF-3c couplée avec l'analyse par phase Doppler (PDA) a permis de déterminer la température par classe de taille de gouttes avant et après impact sur la paroi. En utilisant des mesures par thermographie IR, ainsi qu'un modèle de conduction inverse, un bilan d'énergie a été établi afin d'estimer la masse de liquide évaporée en régime de Leidenfrost. Pour étudier l'influence du nombre normal de Weber sur la vaporisation du liquide, 3 injecteurs différents ont été utilisés.

L'étude du bilan d'énergie montre que la masse de liquide évaporée augmente aussi avec le nombre de Weber. Ces deux résultats fondamentaux sont conformes aux travaux précédents menés avec des gouttes mono-disperses calibrées, validant ainsi l'utilisation des mesures couplées 3cLIF-PDA dans le cas de sprays.

**Références**


[1] R. Rioboo, M. Marengo, and C. Tropea, "Outcomes from a drop impact on solid surfaces," *At. ans Sprays*, vol. 11, pp. 155–165, 2001.

[2] Š. Šikalo, M. Marengo, C. Tropea, and E. N. Ganić, "Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 25, no. 7, pp. 503–510, 2002.

[3] J. D. Bernardin and I. Mudawar, "Film Boiling Heat Transfer of Droplet Streams and Sprays," *Int. J. Heat Transf.*, vol. 40, no. 11, pp. 2579–2593, 1997.

[4] W. Jia and H. H. Qiu, "Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 27, no. 7, pp. 829–838, 2003.

[5] P. Dunand, G. Castanet, M. Gradeck, F. Lemoine, and D. Maillet, "Energy balance of droplets impinging onto a wall heated above the Leidenfrost temperature," *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 44, pp. 170–180, 2013.

[6] A. Labergue, V. Deprédurand, A. Delconte, G. Castanet, and F. Lemoine, "New insight into two-color LIF thermometry applied to temperature measurements of droplets," *Exp. Fluids*, vol. 49, pp. 547–556, 2010.

[7] A. Labergue, A. Delconte, G. Castanet, and F. Lemoine, "Study of the droplet size effect coupled with the laser light scattering in sprays for two-color LIF thermometry measurements," *Exp. Fluids*, vol. 52, pp. 1121–1132, 2012.

[8] V. Deprédurand, a. Delconte, and F. Lemoine, "Combined PDA and LIF applied to size-temperature correlations measurements in a heated spray," *Exp. Fluids*, vol. 50, pp. 561–571, 2011.

[9] A. Labergue, A. Delconte, and F. Lemoine, "Study of the thermal mixing between two non-isothermal sprays using combined three-color LIF thermometry and phase Doppler analyzer," *Exp. Fluids*, vol. 54, pp. 1–15, 2013.

[10] M. Gradeck, J. A. Ouattara, B. Rémy, and D. Maillet, "Solution of an inverse problem in the Hankel space - Infrared thermography applied to estimation of a transient cooling flux," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 36, pp. 56–64, 2012.


**Remerciements**


Ce travail est réalisé dans le cadre du projet RSNR financé par l'Etat français et géré par l'Agence Nationale de la Recherche dans le cadre du programme d'investissements d'avenir portant la référence n ° ET-11-RSNR-0017.