

Mesures couplées de LIF3c, d'analyse Phase Doppler et de thermographie infra-rouge pour l'étude du refroidissement de surfaces chaudes par sprays

A Labergue¹, JD Pena-Carillo¹, M Gradeck¹, F Lemoine¹

¹LEMETA, UMR 7563, Université de Lorraine, 54518 Vandoeuvre lès Nancy,

¹LEMETA, UMR 7563, CNRS, 54518 Vandoeuvre lès Nancy,
alexandre.labergue@univ-lorraine.fr

Cette étude expérimentale traite du refroidissement de surfaces chaudes par sprays dans des conditions proches de l'industrie sidérurgiques : débits importants (7l/mn), températures importantes (800°C) et large surface à refroidir (disque de nickel de 175 mm de diamètre). Le refroidissement est réalisé par trois sprays d'eau conique plein différents. La littérature sur le sujet fournit de nombreuses références concernant la caractérisation des flux de chaleur mesurés au niveau de la paroi. Par contre, selon nos connaissances, il n'existe aucune étude caractérisant l'échauffement des gouttes. Ainsi, la présente étude vise à appliquer le couplage de la fluorescence induite par laser (LIF) avec un système de phase Doppler (PDA) afin de mesurer la température de gouttes par classes de tailles avant et après impact sur une surface chaude. La combinaison de mesures obtenues par thermographie infrarouge afin d'estimer le flux extrait à la paroi par les gouttes, permet également d'en déduire le flux de vapeur généré lors du refroidissement. Les principaux résultats montrent que l'échauffement des gouttes augmente avec la taille des gouttes, et, plus généralement, avec le nombre de Weber incident. Enfin, il apparaît que la masse de liquide évaporée durant le refroidissement est de l'ordre de quelques pourcent mais que le phénomène de vaporisation contribue à environ 50% des pertes totales vues par le disque de nickel. Ces résultats très prometteurs, et constituant une première dans le domaine, sont également en bon accord avec de précédents travaux réalisés avec des gouttes individuelles.

1 Introduction

Bien que théoriquement plus performants que les jets liquides pour le refroidissement de surfaces chaudes (homogénéité spatiale du refroidissement pour une consommation de liquide réduite), l'utilisation des sprays reste peu répandue dans le monde industriel. Les raisons sont liées aux nombreux paramètres régissant les mécanismes d'interactions gouttes/parois qui rendent difficile la compréhension et maîtrise des procédés de refroidissement.

Généralement, les études se focalisent soit sur l'aspect hydrodynamique de l'impact des gouttes [1-3] soit sur les transferts de chaleurs [4-9]. Concernant l'étude des transferts de chaleur, celles-ci se limitent essentiellement du point de vue de la surface solide et très rarement de celui de la goutte. L'évaluation de l'échauffement d'une goutte nécessite de mesurer sa température. Seul des techniques optiques non intrusives permettent d'accéder à ce paramètre. Parmi celles-ci on peut citer la réfractométrie d'arc en ciel basée sur la thermodépendance de l'indice de réfraction du liquide [10-12] ou la diffusion Raman spontanée [13-14]. Une autre famille de méthode concerne la fluorescence induite par laser, une technique basée sur la thermodépendance d'un traceur fluorescent préalablement dilué dans le liquide à étudier. La fluorescence induite à deux couleurs (LIF2c) a été largement testée et validée dans le cas de gouttes en évaporation ou combustion [15-16]. Plus récemment, la LIF2c a été appliquée dans l'étude du refroidissement de surfaces chaudes et a permis d'estimer le flux de vapeur généré mais uniquement dans le cas de gouttes individuelles [17].

Le présent travail a donc pour ambition d'étendre la LIF2c pour l'étude du refroidissement mais dans le cas de sprays polydispense. D'autre part, l'étude vise à opérer dans des conditions expérimentales qui sont proches de celles rencontrées dans l'industrie sidérurgique : débits importants (7 l/mn), grands diamètres de gouttes (300 µm), hautes températures (800°C) et large surface à refroidir (175 mm de diamètre). Enfin, le récent couplage de la LIF2c avec la technique d'analyse phase Doppler (PDA) pour la mesure de taille de gouttes, permet d'obtenir une corrélation entre la température des gouttes par classe de tailles [18-19]. Dans le cas de l'interaction gouttes/paroi, le couplage LIF2c/PDA dispose d'un intérêt majeur puisqu'il est possible de distinguer les gouttes avant et après impact.

Ainsi, l'objectif de l'étude est d'appliquer le couplage LIF2c/PDA afin de pouvoir caractériser, pour la première fois, l'échauffement de gouttes dans le cas de sprays impactant sur une surface chaude. Par ailleurs, le flux de chaleur extrait à la paroi par le spray est mesuré par thermographie infra-rouge (IRT). En combinant ces mesures avec la technique de couplage LIF2c/PDA, un bilan énergétique est établi afin d'en déduire le flux de vapeur généré. Trois sprays différents sont utilisés afin d'analyser l'influence de la répartition du flux liquide et du nombre de Weber incident.

2 Banc de refroidissement

La Figure 1 présente le dispositif expérimental complet. Le banc de refroidissement consiste en une boucle fluide fermée. Le fluide est de l'eau ensemencée en traceur fluorescent. La surface à refroidir est un disque de nickel (rayon $R=87.5$ mm et épaisseur $e=5$ mm) chauffée par induction. Typiquement, une expérience est divisée en une étape de chauffage et en une étape de refroidissement, assuré par des sprays coniques pleins. Trois buses (Lechler®) de caractéristiques différentes (angle d'ouverture et pression d'injection) sont utilisées afin d'avoir des nombres de Weber incidents s'étendant jusque 1500 et des flux liquides compris entre 2 et 8 kg/m²/s. Afin de limiter la durée d'établissement du spray lors de la phase de refroidissement (essentiellement dû à la pompe centrifuge), un second spray (buse B) s'écoule en permanence à côté du disque pendant la phase de chauffage.

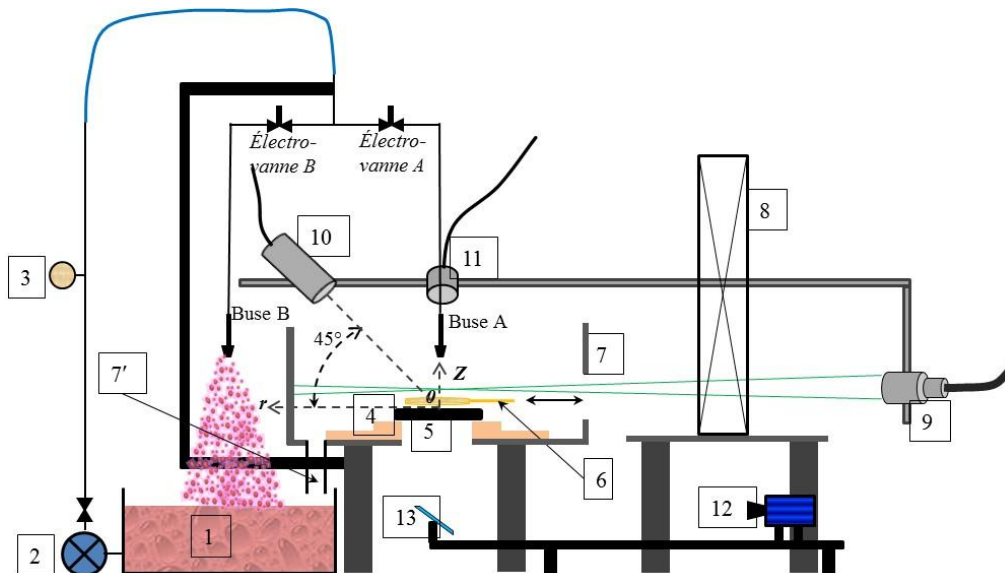


Figure 1 : Banc expérimental et implémentation des techniques optiques de mesure (couplage PDA-LIF et thermographie IR). Vue de côté. 1- Cuve d'eau; 2 -pompe centrifuge; 3-manomètre ; 4- Support en quartz ; 5- disque de nickel ; 6- Inducteur électromagnétique ; 7- enceinte métallique ; 8- système de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

Pour contenir les projections d'eau lors du refroidissement, une enceinte est utilisée. Son diamètre (environ 3 fois celui du disque de nickel) est pris suffisamment grand pour ne pas affecter l'écoulement du spray. Le disque est posé au fond de l'enceinte sur un support isolant en quartz et centré avec l'axe principale de la buse A. Le repère de l'étude est le repère (Z, r) où l'origine est prise au centre du disque. L'axe Z est dirigé vers le haut et r correspond à la coordonnée radiale du disque.

3 Mise en œuvre des diagnostics optiques

3.1 Couplage LIF3c/PDA

Seules les grandes lignes de la LIF2c et du principe du couplage LIF2c/PDA sont ici rappelés. Tous les détails se trouvent dans les références [15-19]. Le principe de la LIF consiste à diluer un traceur fluorescent, à très faible concentration, dans le liquide à caractériser. Ici, il s'agit de sulforhodamine B à $C = 5.10^{-6} \text{ mol.l}^{-1}$ diluée dans de l'eau déionisée. La fluorescence est induite par le faisceau vert d'un laser à Argon (514.5 nm). Le signal de fluorescence se présente sous la forme d'un large spectre dont l'intensité I_{fi} collectée sur bande spectrale i s'écrit [15] :

$$I_{fi}(T) \approx K_{opt,i} K_{spec,i} V_c I C e^{\frac{\beta_i}{T}} \quad (1)$$

où V_c et I ont respectivement le volume de collection des photons fluorescents et l'intensité du laser incident. T est la température absolue du liquide et β caractérise la sensibilité en température du traceur et est déterminé par une calibration en température. Généralement, les paramètres V_c , I et C sont inconnus. En mesurant l'intensité du signal de fluorescence simultanément sur deux bandes spectrales (2 couleurs), I_{f1} et I_{f2} , il est possible d'en déduire un rapport R_{12} ne dépendant en théorie que de la température. Les deux constantes K_{opt} et K_{spec} , caractérisant les propriétés du montage optiques et spectroscopiques du traceur respectivement, peuvent être supprimés en réalisant une mesure de référence R_{120} à une température T_0 connue. Toutefois, il a été montré que la LIF2c ne peut être appliquée directement dans le cas des sprays [20-21]. Il est nécessaire de rajouter une troisième bande spectrale de détection conduisant à la LIF trois couleurs (LIF3c). Un second rapport de fluorescence R_{32} est mesuré et la température T est déduite de l'équation :

$$\frac{R_{f12}}{R_{f120}} e^{\beta_{12} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)} = a \left[e^{\beta_{32} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \frac{R_{f32}}{R_{f320}} \right]^2 + b \left[e^{\beta_{32} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T} \right)} \frac{R_{f32}}{R_{f320}} \right] + c \quad (2)$$

Le couplage de la LIF3c avec la technique d'analyse phase Doppler (PDA) consiste à obtenir une température de goutte par classe de taille. Le PDA utilisé est un système commercialisé par Dantec-Dynamic® : optique de réception classique (focale de 500 mm) en mode réflexion (60°) et processeur P80. Le système utilise la même source laser à Argon que la LIF3c. Une sonde d'émission Fiber-Flow® (focale de 1200 mm) est utilisée pour générer le volume illuminé, également employée pour induire la fluorescence. La composante de vitesse mesurée est la composante normale w_d à la paroi, i e le long de l'axe Z. Typiquement, le développement et la faisabilité du couplage repose sur deux conditions. Premièrement, les deux techniques de LIF3c et de PDA sont synchronisées en utilisant la sortie TRIGGER et l'horloge du processeur PDA. Deuxièmement, afin d'optimiser la détection de gouttes communes vues par le PDA et la LIF3c, un protocole a été spécifiquement développé pour améliorer la coïncidence spatiale des deux volumes de mesures. Les volumes de mesures sont définis comme l'intersection du volume illuminé avec ceux définis par les optiques de collection du PDA et de la LIF3c. Le traitement des gouttes communes donne une température de gouttes pour une classe de taille D donnée. Puis, en utilisant le signe de la vitesse normale au disque délivrée par le PDA, il est possible de distinguer les gouttes avant et après impact. Par la suite, on utilisera les indices b et a pour désigner la vitesse, diamètre et température des gouttes avant et après impact respectivement.

3.2 Thermographie infrarouge

Le flux de chaleur extrait à la paroi (face avant) par le spray est estimé par thermographie infrarouge (IRT). Une caméra infrarouge (Cedip® Jade III ; résolution spatiale 320x240 px) équipée d'un filtre spectral étroit [3.97 – 4.01 μm] mesure le champ de température en face arrière. Une méthode de conduction inverse appliquée dans le disque permet d'estimer la température $T_w(r, t)$ et le flux $\varphi_w(r, t)$ en face avant à chaque instant t et position radiale r . L'étalonnage entrepris pour la caméra ne permet pas de mesurer des températures inférieures à 100°C. Enfin, le disque de nickel reposant sur le support isolant, la surface du disque visualisée par la caméra IR est tronquée, correspondant à un rayon maximum de $r = 75 \text{ mm}$. Le processeur du PDA est également utilisé pour synchroniser la caméra IR avec le couplage LIF3c/PDA.

4 Résultats expérimentaux

4.1 Conditions et protocole expérimental

Le couplage LIF3c/PDA étant une technique ponctuelle, un système de déplacement 3D est utilisé pour effectuer des mesures à différentes positions (Z , r) au-dessus du disque de nickel. La forte densité de gouttes proches de la paroi n'a pas permis de réaliser des mesures de bonnes qualités en dessous de $Z = 15$ mm. Par ailleurs, lorsque la température de la plaque est inférieure à la température de Leidenfrost (température à partir de laquelle un film de vapeur apparaît sur la surface du disque), l'importance du flux de vapeur généré, qui se déposait sur les optiques de collection LIF et PDA, perturbait l'acquisition des signaux optiques. Ainsi, l'analyse des résultats couplés LIF3c/PDA est limitée à une durée de refroidissement correspondant au régime de Leidenfrost. Quel que soit le spray utilisé, la durée d'une expérience est de l'ordre de 20 s environ. Cette courte durée ne permet pas d'enregistrer un très grand nombre de gouttes. Par conséquent, seulement trois classes de taille sont utilisées : $D = 37.5$, 102.5 et 167.5 μm . Enfin, on adoptera la notation T et T pour la température mesurée par LIF et IRT respectivement. A noter que la température de l'eau à l'injection avant impact est de 35°C .

4.2 Etude de l'échauffement des gouttes

La Figure 2 donne un exemple typique de température de gouttes après impact pour les trois classes de taille D et trois sprays, et mesuré à deux positions radiales : $r = 0$ (a) et $r = 75$ mm (b). D'une manière globale, on observe un échauffement des gouttes de l'ordre 15°C et qui augmente avec la classe de taille. L'influence du diamètre seul est généralement insuffisante pour interpréter l'échauffement. Le nombre de Weber, qui compare les forces d'inertie aux forces de cohésion de la goutte, est préféré. La Figure 3 présente l'évolution de l'échauffement des gouttes, *ie* $\Delta T = T_a - T_b$, en fonction du nombre de Weber incident We_n obtenus pour les trois sprays, les trois classes de tailles et à trois positions radiales. Le nombre de Weber We_n est défini par :

$$We_n = \frac{\rho w_d^2 D}{\sigma} \quad (3)$$

où les paramètres σ et ρ sont respectivement la tension superficielle et la masse volumique de l'eau. w_d représente la vitesse normale moyenne des gouttes pour la classe de taille D .

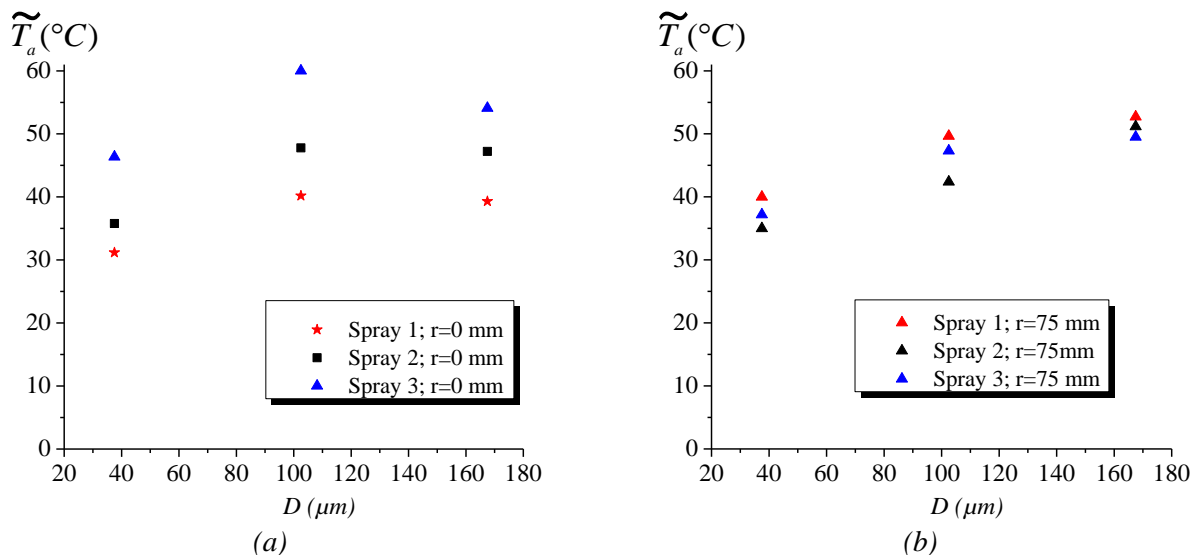


Figure 2: Température des gouttes après impact en fonction de la classe de taille pour les trois sprays mesuré au centre du disque (a) et en $r = 75$ mm (b).

Il apparaît d'abord une augmentation de l'échauffement des gouttes avec le nombre de Weber avant d'atteindre un plateau. L'augmentation de l'échauffement est attribuée à une augmentation de la surface d'échange de la goutte qui s'étale davantage sur la paroi quand le Weber augmente.

Le plateau est lié au plus grand diamètre d'étalement possible avant désintégration de la goutte. Les transferts de chaleur entre la goutte et la paroi atteignent donc un maximum.

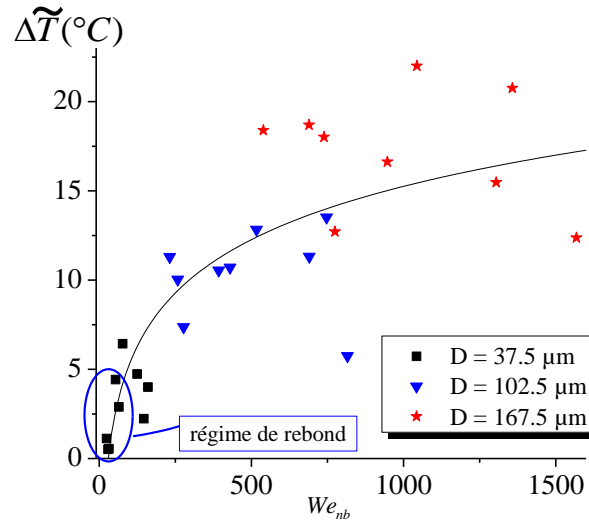


Figure 3 : évolution de l'échauffement des gouttes en fonction du nombre de Weber incident pour trois classes de taille.

4.3 Estimation de l'évaporation

L'objectif de cette section est de combiner les résultats obtenus par IRT et LIF3c pour en déduire le flux de vapeur généré pendant régime de Leidenfrost. La méthode est basée sur l'établissement d'un bilan des flux de chaleur qui entrent en jeux lors de l'impact d'une goutte individuelle sur une paroi chaude.

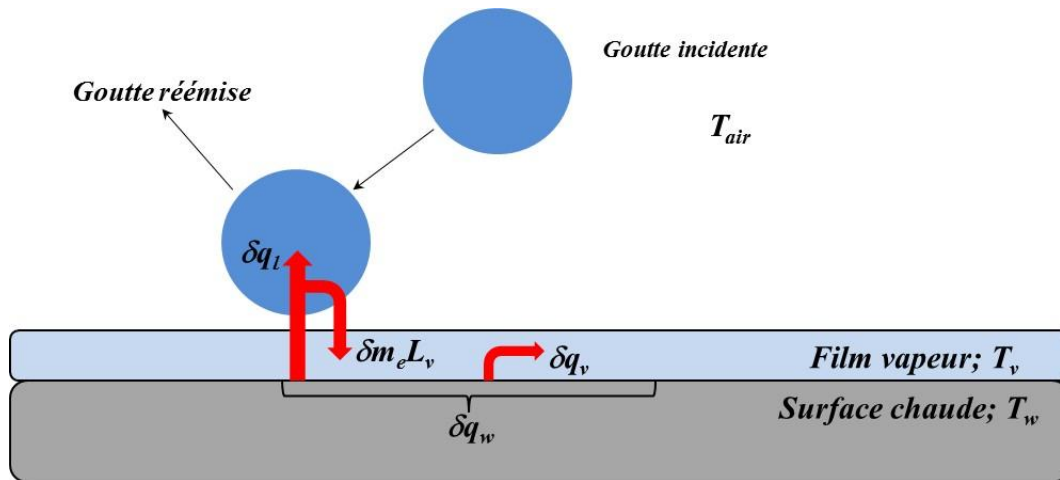


Figure 4 : Bilan énergétique de l'impact d'une goutte individuelle en régime de Leidenfrost.

Le phénomène observé étant instationnaire, le bilan est effectué à chaque pas de temps δt qui correspond en fait à la durée entre 2 images infrarouge. Les pertes par rayonnement et l'effet de l'écoulement de l'air le long de la plaque étant négligeable, la chaleur totale extraite à la paroi δq_w et à chaque position radiale r est la somme de trois principales contributions (Figure 4) :

$$\delta q_w(r, \delta t) = \delta q_l(r, \delta t) + \delta m_e(r, \delta t)L_v + \delta q_v(r, \delta t) \quad (4)$$

Avec :

- δq_l la chaleur sensible prélevée par les gouttes,
- $\delta m_e L_v$ la chaleur de changement de phase due à l'évaporation,
- δq_v la chaleur prélevée à la paroi pour maintenir le film de vapeur.

L_v est la chaleur latente de vaporisation de l'eau et δm_e est la densité de vapeur générée durant l'intervall δt . La chaleur totale est déduite directement des mesures d'IRT :

$$\delta q_w(r, \delta t) = \varphi_w(r, t) \delta t \quad (5)$$

Or, le flux de chaleur φ_w donné par l'IRT correspond au flux extrait par toutes les gouttes qui impactent la paroi durant l'intervalle δt . Il n'est donc pas possible d'effectuer le bilan par classe de taille. En conséquence, la chaleur sensible δq_l est calculée en prenant la température moyenne T_m des mesures couplées LIF3c/PDA. Ainsi, la chaleur sensible peut s'écrire :

$$\delta q_l(r, \delta t) = c_{pl} [\delta m(r) - \delta m_e(r, \delta t)] [T_{ma}(r) - T_{mb}(r)] + c_{pl} \delta m_e(r, \delta t) [T_{sat} - T_{mb}(r)] \quad (6)$$

où C_{pl} et T_{sat} est respectivement la capacité thermique massique de l'eau et la température d'ébullition de l'eau. δm est la densité de liquide qui impacte la paroi durant l'intervalle δt et est déduit de mesures de répartition du flux liquide selon r (G en $kg/m^2/s$) effectuée dans une précédente étude sur le même sujet [22] : $\delta m(r) = G(r)$. δt , G étant bien entendu supposé constant en fonction du temps. La chaleur prélevée par le film de vapeur est donnée par :

$$\delta q_v(r, \delta t) = \delta m_e(r, \delta t) c_{pv} (T_v(r, \delta t) - T_{sat}) \quad (7)$$

T_v est la température du film de vapeur. Cette température n'est pas mesurée mais est approximée en prenant la température de film T_{film} . Cette dernière est définie avec la température de paroi $T_w(r, t)$, issue des mesures d'IRT, et T_{sat} .

Ainsi, en introduisant le nombre de Jakob, $Ja = C_{pv}(T_{film} - T_{sat})/L_v$, la densité de vapeur générée à chaque instant δt s'écrit :

$$\delta m_e(r, \delta t) = \frac{\varphi_w(r, t) - G(r) c_{pl} [T_{ma}(r) - T_{mb}(r)]}{L_v [1 + Ja(r, \delta t)] + c_{pl} [T_{sat}(r) - T_{ma}(r)]} \delta t \quad (8)$$

Il est aussi possible d'intégrer δm_e sur toute la surface du disque et ainsi obtenir le flux de vapeur moyen $\overline{\delta m_e}$ généré à chaque instant δt . La Figure 5 décrit l'évolution du flux de vapeur moyen, relativement au flux total impactant $\overline{\delta m}$, en fonction du temps et pour les trois sprays durant le régime de Leidenfrost.

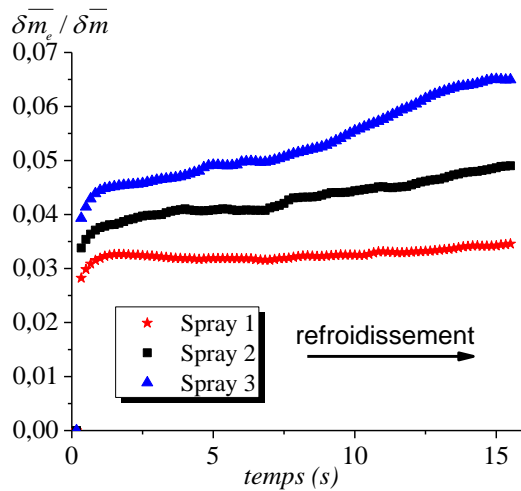


Figure 5: Evolution du flux de vapeur moyen relatif en fonction du temps pour les trois sprays.

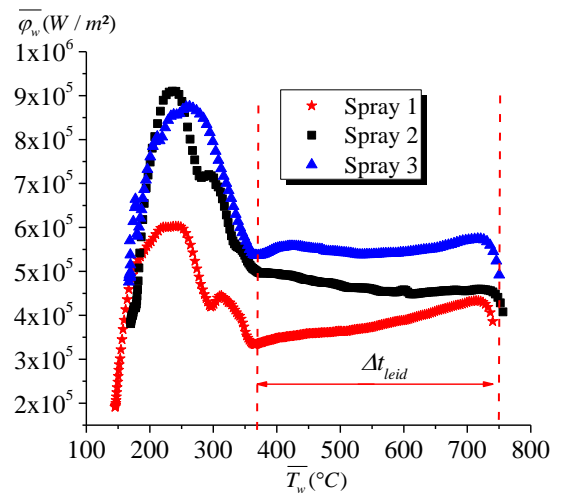


Figure 6: Evolution du flux de chaleur moyen extrait à la paroi en fonction de la température moyenne pour les trois sprays.

Un premier constat indique que, globalement, la masse de liquide évaporée est comprise entre 3 et 6% environ selon le spray.. Par ailleurs, la Figure 5 montre que le spray 3 génère la plus grande

quantité de vapeur et que le flux de vapeur moyen augmente au cours du refroidissement. Au contraire, les deux autres sprays semblent indiquer un plateau, synonyme d'un phénomène de saturation. Or des mesures de PDA [22] indiquent que le spray 3 a les vitesses radiales les plus importantes, favorisant ainsi l'évacuation de la vapeur produite vers les bords du disque.

L'évolution du flux de vapeur peut être corrélée au flux de chaleur extrait à la paroi ϕ_w . La Figure 6 présente l'évolution du flux moyen intégré sur la surface du disque $\overline{\phi_w}$ en fonction de la température moyenne $\overline{T_w}$. Ainsi, il apparaît clairement que, durant le régime de Leidenfrost, le flux de vapeur augmente avec le flux de chaleur extrait à la paroi.

4.4 Analyse des flux

Connaissant le flux de vapeur instantané, il est intéressant de comparer les trois contributions de l'équation (4). Ces trois contributions sont également intégrées spatialement sur la surface du disque à chaque instant. Leurs évolutions en fonction du temps pour le spray 1 sont présentées à la Figure 7. Il apparaît que le refroidissement du disque est essentiellement dû au changement de phase et à la chaleur sensible prélevée par les gouttes. Bien qu'une très faible partie du liquide impactant se vaporise, ce résultat met bien en évidence l'importance de la chaleur latente de l'eau. Au contraire, la chaleur prélevée par le film de vapeur reste marginale.

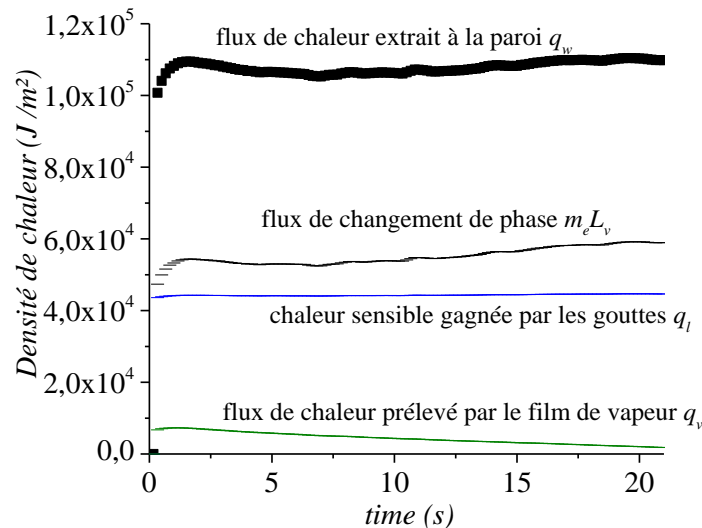


Figure 7 Comparaison des différents flux de chaleur moyen contribuant au refroidissement du disque de nickel pour le spray 1.

5 Conclusion

Cette étude expérimentale a présenté les premières mesures de températures de gouttes dans le cas de sprays impactant sur une surface portée à hautes températures. Le couplage de la technique de fluorescence induite par laser avec la technique d'analyse Phase Doppler permet d'obtenir la température des gouttes par classe de taille avant et après impact. Les essais ont été conduits avec trois sprays différents afin d'analyser l'influence de la répartition du flux liquide et du nombre de Weber incident. Les principaux résultats montrent une augmentation de l'échauffement des gouttes avec la taille des gouttes et le nombre de Weber incident. Ces résultats sont bien accords avec ceux trouvés dans le cas de gouttes individuelles. Enfin, la combinaison de mesures par thermographie infrarouge pour la mesure du flux de chaleur extrait à la paroi par les sprays a permis d'estimer le flux de vapeur généré durant le refroidissement de la plaque. Il apparaît que le flux de vapeur est fortement corrélé au flux de chaleur extrait à la paroi. Enfin, les résultats montrent également qu'une très faible quantité du liquide se vaporise mais que le phénomène de changement de phase contribue à hauteur de 50 % du refroidissement de la plaque.

6 Références

- [1] Cossali G.E., Marengo M., Santini M., Single-drop empirical models for spray impact on solid walls: a review, *Atomization And Sprays* 15 (2005) 699-736.

- [2] Rioboo R., Tropea C., Marengo M., Outcomes from a drop impact on solid surfaces, *Atomization and Sprays*, 11 (2001) 155-165.
- [3] Sikalo S., Marengo M., Tropea C., Analysis of impact of droplets on horizontal surfaces, *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 25 (2002) 503-510.
- [4] Al-Ahmadi H.M., Yao, S.C., Spray cooling of high temperature metals using high mass flux industrial nozzles, *Experimental Heat Transfer*, 21 (2008) 38-51.
- [5] Bernardin J.D., Mudawar I., Film boiling heat transfer of droplets streams and sprays, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (11) (1997a) 2579- 2593.
- [6] Bernardin J.D., Stebbins C.J., Mudawar I., Mapping of impact and heat transfer regimes of water drops impinging on a polished surface, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 40 (2) (1997b) 247-267
- [7] Chen R.H., Chow L.C., Navedo J.E., Effects of sprays characteristics on critical heat flux in subcooled water sprays cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 45 (2002) 4033-4043.
- [8] Jia W. and Qiu H.H., Experimental investigation of droplet dynamics and heat transfer in spray cooling, *Experimental Thermal and Fluids Science*, 27 (2003) 829-838.
- [9] Mudawar I., Valentine W.S., Determination of the local quench curve for sprays-cooled metallic surfaces, *Journal of Heat Treating*, 7 (1989) 107-121.
- [10] Van Beek J., Grosjes T., De Giorgi M.G., Global rainbow thermometry assessed by airy and Lorenz-Mie theories and compared with phase Doppler anemometry, *Applied Optics*, 42 (2003) 4016-4022.
- [11] Vetrano M., Gauthier S., Van Beek J., Boulet P., Buchlin JM Characterization of a non-thermal water spray by global rainbow thermometry, *Experiments in Fluids*, 50 (2006) 15-22.
- [12] Saengkaew S. , Charinpanikul T., Laurent C., Biscos Y., Lavergne G., Gouesbet G., Gréhan G., Processing of individual rainbow signals to study droplets evaporation, *Experiments in Fluids*, 48 (2010) 111-119.
- [13] Walfaren GE, Raman spectral studies of the effects on temperature on water structure, *Journal of Chemical Physique*, 47 (1967) 114
- [14] Müller T., Grünfeld G., Beushausen V., High-precision measurements of the temperature of methanol and ethanol droplets using spontaneous Raman scattering, *Applied Physics B Lasers Optics*, 70 (2010) 155-158
- [15] Castanet G., Lavieille P., Lebouche M. Lemoine F., Measurement of the temperature distribution within monodisperse combusting droplets in linear streams using two-color laser-induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, 35 (2003) 563-571.
- [16] Lavieille P., Lemoine F., Lebouche M., Evaporating and combusting droplet temperature measurements using two-color laser-induced fluorescence, *Experiments in Fluids*, 31(2001) 45-55.
- [17] Dunand, P., Castanet G., Gradeck M., Maillet D., Lemoine F., Energy balance of droplets impinging onto a wall heated above the Leidenfrost temperature, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 44 (2013), 170-180.
- [18] Depredurand V., Delconte A., Lemoine F., Combined PDA and LIF applied to size-temperature correlations measurements in heated sprays, *Experiments in Fluids* 50 (2011) 561-571.
- [19] Labergue A., Delconte A., Lemoine F., Study of the thermal mixing between two non-isothermal sprays using combined three-color LIF thermometry and phase Doppler analyze, *Experiments in Fluids*, 54 (6), 1-15 (2013).
- [20] Labergue A., Delconte A., Lemoine F., New insight into two-color LIF thermometry applied to temperature measurements of droplets, *Experiments in Fluids*, 49 (2010) 547-556.
- [21] Labergue A., Delconte A., Lemoine F., Study of the droplet size effect coupled with the laser light scattering in sprays for two-color LIF thermometry, *Experiments in Fluids*, 52 (2012) 1121-1132.
- [22] Labergue A., Gradeck M., Lemoine F., Comparative study of the cooling of a hot temperature surface using sprays and liquid jets, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 81 (2015) 889-900.