

Impact d'une goutte en situation de Leidenfrost - Modélisation des échanges et expériences

M. Gradeck^{a,b}, D. Maillet^{a,b}

a. Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

b. CNRS, LEMTA, UMR 7563, Vandoeuvre-lès-Nancy, F-54500, France

Résumé :

Comprendre les mécanismes des interactions gouttes-parois est primordial pour aborder le problème multiphysique que pose le refroidissement par spray. Avant de pouvoir proposer un modèle pertinent permettant de prédire la cinétique de refroidissement d'une pièce de métallurgie refroidie par un spray, il est nécessaire de (1) pouvoir modéliser les échanges de chaleur liés à l'évaporation partielle des gouttes lors de leur impact sur une surface dans des conditions non isothermes, (2) d'étendre ces modèles à des interactions multiples (plusieurs gouttes en interaction) avant (3) d'aborder le problème plus complexe du refroidissement par sprays. Dans cet article, nous présentons les modèles nous permettant d'estimer les flux de chaleur à l'impact d'une goutte individuelle, puis des résultats expérimentaux concernant l'interaction goutte individuelle-paroi sont analysés. Pour ce faire, nous disposons d'un banc dédié à la mesure du flux extrait en paroi ; une mesure par thermographie IR associée à une méthode inverse permet la détermination du flux de refroidissement dû aux gouttes et des visualisations par caméra rapide rendent compte de la topologie des gouttes à l'impact. L'ensemble de ces informations étant nécessaire pour proposer un modèle pertinent et prédictif du flux extrait à l'impact.

Abstract :

Understanding the mechanisms of drops-wall interactions is essential to address the multiphysics problems of spray cooling. Before proposing a relevant model to predict cooling of a slab of metal which is cooled by a spray, it is necessary (1) to model heat exchange related to the partial evaporation of the droplets during its impact on a hot surface, (2) to extend these models to multiple interactions (several drops interactions) before (3) to address the more complex problem of spray cooling. In this paper, we present thermal models that allow us to estimate the flux (heat and mass) during the impact of an individual drop, and experimental results related to the individual drop-wall interaction are analyzed. To achieve that, a bench for measuring heat flux was designed, IR thermography associated with an inverse method allows the determination of cooling flux due to drops and visualizations using high speed camera report the topology of the droplets during impact. All of this information is necessary to provide a relevant model to predict heat flux.

Mots clefs : goutte, Leidenfrost, modèle inverse

1 Introduction

La phase de refroidissement de pièces en acier laminées est destinée à conférer au métal des propriétés mécaniques bien déterminées ; ceci requiert un contrôle optimal de la cinétique de refroidissement. Le procédé utilise couramment des jets d'eau cohérents mais ceci provoque des non uniformités de flux de chaleur qui conduisent à des hétérogénéités de phase cristalline au sein du matériau dans le moins pire des cas. L'utilisation de sprays semble quant à elle prometteuse. Contrairement au refroidissement par jet qui ne requiert que quelques paramètres de contrôle (e.g. vitesse du jet à l'impact, vitesse de défilement, diamètre du jet et température du jet), le refroidissement par sprays est beaucoup complexe. Cette complexité provient essentiellement des multiples interactions gouttes-parois que l'on peut rencontrer ; il existe principalement trois grandes classes de régimes : les régimes de rebond et de splashing pour des températures de parois supérieures à la température de Leidenfrost et les régimes de dépôts pour des températures de parois inférieures à cette température de transition.

Les régimes d'impact observés peuvent être prédits à l'aide d'une température adimensionnelle, T^* et du

nombre de Mundo, K .

$$T^* = \frac{T_P - T_{SAT}}{T_{Leid} - T_{SAT}} \text{ et } K = \sqrt{We} \cdot Re^{0.25} \quad (1)$$

Pour des gouttes d'eau impactant une paroi chauffée : si $T^* < 1$, la goutte va se déposer à la paroi sans «rebondir» et ce quelle que soit la valeur de K ; les régimes de rebond sont observés pour $T^* > 1$ et $K < 380$, [1]. Pour des nombres de Mundo supérieurs à cette limite, on observe une désintégration de la goutte à l'impact (splashing). En situation de rebond (ou de splashing), un film de vapeur va être instantanément créé entre la goutte et la paroi solide, empêchant ainsi tout contact de la goutte avec celle-ci (effet Leidenfrost). C'est cette situation que nous étudions ici.

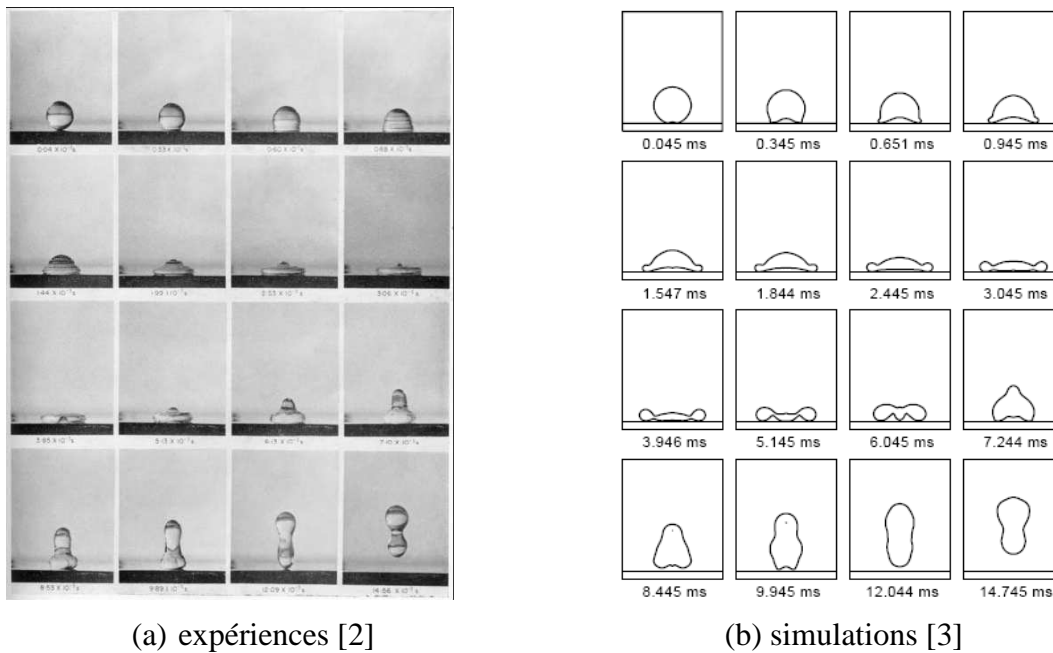


Figure 1. Exemple d'évolution de la topologie d'une goutte en régime de rebond ($We=15$)

Dans un premier temps, il s'agit de mesurer les flux thermiques associés à chaque régime: flux de refroidissement en paroi, flux transmis à la goutte, flux d'évaporation. Ces quantités sont nécessaires à la compréhension fine de l'interaction goutte-paroi mais une modélisation complète requerra d'autres paramètres liés tant à la dynamique de l'interaction (e.g. évolution du diamètre d'étalement pour un rebond ou distribution taille-vitesse pour un cas de splashing), qu'à la thermique (épaisseur du film vapeur). Dans cette étude, nous nous sommes volontairement limités aux régimes de Leidenfrost pour lesquels il est possible de dissocier les effets individuels des effets collectifs (collision ou coalescence de gouttes). Le flux de chaleur perdu par la paroi à l'impact de la goutte est estimé par méthode inverse (Lelong et al. [4]), l'échauffement de la goutte peut être mesuré à l'aide d'une méthode optique originale à savoir la fluorescence induite par laser à deux couleurs étendue à de l'imagerie (2cPLIF), Dunand et al. [5]. Finalement, le couplage de ces deux techniques permet le calcul du flux d'évaporation par l'établissement d'un bilan thermique de l'impact [6].

2 Description du montage expérimental

Le banc d'essais et les moyens de mesures associés sont schématiquement représentés sur la figure 2. Un train de gouttes monodispersées est obtenu par la fragmentation contrôlée d'un jet liquide ; des instabilités de Rayleigh sont générées par la vibration d'une piezocéramique. Ce train impacte en son centre une pastille de nickel ($r_{Ni} = 12,5\text{mm}$ et $e = 500\mu\text{m}$) chauffée par induction électromagnétique à une température supérieure à la température limite de Leidenfrost. Les diamètres ($80\mu\text{m} < D_g < 300\mu\text{m}$) et les vitesses des gouttes générées ($3\text{m/s} < U < 12\text{m/s}$) dépendent de la fréquence excitatrice ($5\text{kHz} < f_{inj} < 30\text{kHz}$), du diamètre de l'orifice et de la pression d'alimentation de l'injecteur (1 à 6 bars). La température des gouttes à la sortie de l'injecteur est

finement réglée et mesurée à l'aide d'un thermocouple de *type K*. Sur la figure 2 n'est pas représenté le dispositif (caméra rapide + éclairage) permettant la mesure par ombroscopie des paramètres dynamiques de l'impact des gouttes (diamètre, vitesse, temps de résidence). Les profils de température en face arrière de l'échantillon sont mesurés par thermographie infrarouge à l'aide d'une caméra matricielle *Cedip Jade III* équipée d'un objectif de 200mm.

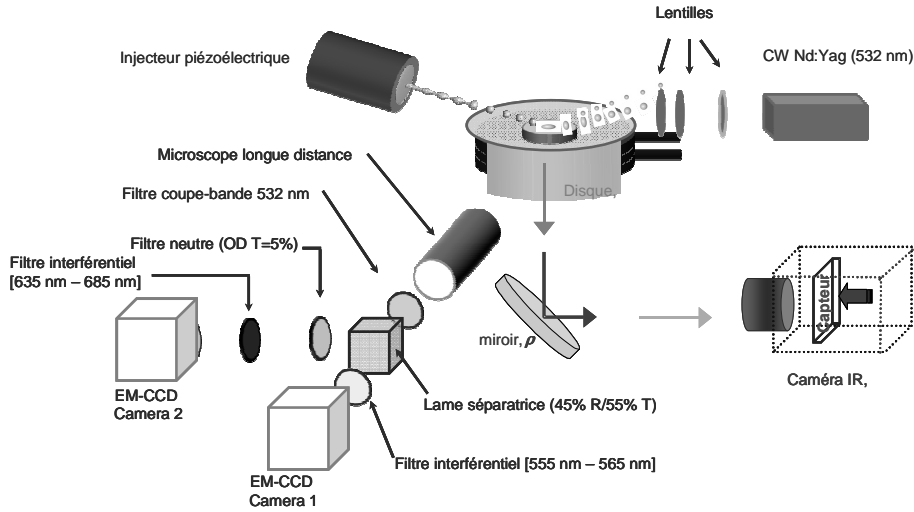


FIG. 2 - Schéma du dispositif expérimental et moyens de mesure associés

3 Estimation du flux de refroidissement

L'estimation du flux de refroidissement du aux seules gouttes en interaction avec la cible en nickel repose sur une méthodologie inverse [4] brièvement décrite ci-dessous et plus largement détaillée dans la thèse de F. Lelong [7]. Les champs de température mesurés sont reliés au flux de chaleur perdu par le disque de Nickel. Un modèle tenant compte de toutes les pertes thermiques de la cible en Nickel (conduction, convection, rayonnement et impacts des gouttes) permet finalement d'obtenir le flux du aux impacts des gouttes seul [7]. Pour cela, le problème de conduction 3D instationnaire est réduit à un problème 2D instationnaire par une prise de moyenne angulaire des champs. Ce modèle « dégradé » est suffisant pour mesurer le flux recherché. En effectuant une double transformée de l'équation de la chaleur en repère cylindrique, on obtient une équation dans les espaces de Laplace (—) et dans l'espace de Hankel (~) qui peut être intégrée. On note p la variable de Laplace et j , l'harmonique de Hankel. L'équation transformée (2a) associée aux conditions limites suivantes (2b,c) est :

$$\frac{\partial^2 \tilde{\theta}_j}{\partial z^2} - \gamma_j^2 \tilde{\theta}_j = 0 \quad (2a)$$

Avec $\theta(r, z, t) = T(r, z, t) - T_{init}$; $\gamma_j^2 = \alpha_j^2 + \frac{p}{a}$; $\alpha_0 = 0$ et $\alpha_j R = j\pi + \frac{\pi}{4} - \frac{3}{8} \frac{1}{j\pi + \pi/4}$ si $j > 1$

$$\rightarrow \text{face avant (F)} : \quad k \left. \frac{\partial \tilde{\theta}_j}{\partial z} \right|_{z=0} = h_{EQ}^F \left(\tilde{\theta}_j - \frac{\tilde{\theta}_{\infty, j}}{p} \right) + \tilde{q}_{j, G} \quad (2b)$$

$$\rightarrow \text{face arrière (R)} : -k \left. \frac{\partial \tilde{\theta}_j}{\partial z} \right|_{z=e} = h_{EQ}^R \left(\tilde{\theta}_j - \frac{\tilde{\theta}_{\infty, j}}{p} \right) + K_{cond} R_{cav} J_0(\alpha_j R_{cav}) \left(\bar{\theta}(r = R_{cav}) - \frac{\tilde{\theta}_{stum, j}}{p} \right) \quad (2c)$$

Dans l'équation (2b), la fonction q représente le flux de chaleur recherché. Ce système offre une solution analytique en considérant que les propriétés thermophysiques du nickel constantes dans la gamme de température de l'expérience (300-700°C). Sa solution permet d'exprimer une relation entre le champ de température mesuré en face arrière, le flux de refroidissement dû aux gouttes (inconnue du système) et la

contribution des autres pertes thermiques que subit l'échantillon de nickel : convection naturelle en face avant et arrière et caractérisée par un coefficient d'échange h , rayonnement en face avant et arrière caractérisé par une émissivité ε et conduction dans le support de la cible caractérisée par une conductance K_{cond} , cf fig. 3. Il est à noter qu'une détermination précise de ces différentes contributions est préalable à toute estimation du flux de refroidissement dû aux gouttes. Finalement, une inversion de Laplace de la solution du système précédant fait apparaître plusieurs produits de convolution ; la relation¹ entre l'harmonique de température en face arrière et l'harmonique du flux recherché peut s'exprimer sous forme matricielle à partir de la relation suivante en assimilant le flux $q_{n,G}(t)$ à une fonction constante par morceaux sur chaque pas de temps correspondant à la fréquence d'acquisition de la caméra (ou à un multiple) :

$$\begin{aligned} \tilde{\theta}_n^R(t) = & - \left[e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^A(t) \right] * \tilde{q}_{n,G}(t) + \left[\int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^B(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{\infty,n} + \left[\int_0^t e^{-a\alpha_n^2 t'} \tilde{Z}_n^C(t') dt' \right] \tilde{\theta}_{stum,n} \\ & - \left[e^{-a\alpha_n^2 t} \tilde{Z}_n^C(t) \right] * \theta(r = R_{cav}, t) \end{aligned} \quad (3)$$

Finalement un retour dans l'espace réel est effectué par une inversion de Hankel. En remarquant que le flux de refroidissement $q_G(t)$ est la moyenne temporelle à chaque pas de temps du flux de refroidissement des n gouttes incidentes ayant interagi avec la paroi pendant le temps d'interaction t_R . L'énergie (E_{1G}) prélevée à chaque impact de goutte est donc une moyenne statistique sur un échantillon de $n_G = 1/f_{inj}$ gouttes :

$$E_{1G}(t) = \frac{q_G(t)\Delta t}{n_G} = \frac{q_G(t)}{n_G f_{camera}} = \frac{q_G(t)}{f_{inj}} \quad (4)$$

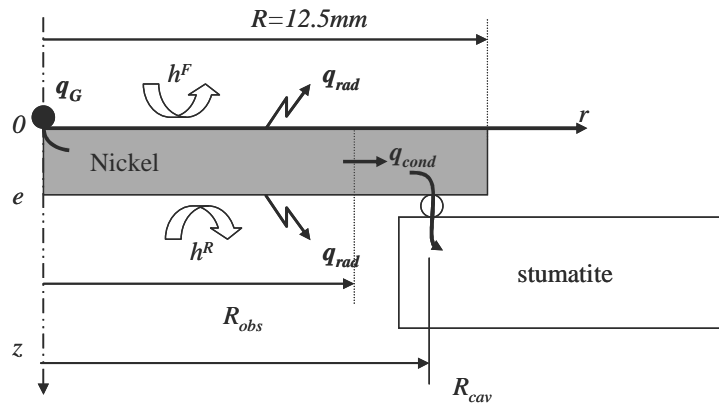


FIG.3 - Représentation schématique des transferts associés à la cible de nickel

4 Energie de refroidissement

L'énergie prélevée à l'impact d'une goutte est extrêmement faible ($\sim 0,1\text{mJ}$) car nous en sommes en régime de Leidenfrost ; de ce fait, la précision sur les pertes convecto-radiatives et les pertes par conduction dans le support (supposées connues) est cruciale. Ceci nécessite un étalonnage préalable. Sur la figure 4, nous montrons l'évolution des énergies mesurées pour un diamètre de goutte de l'ordre de $156\mu\text{m}$ (goutte d'eau), pour différentes valeurs de l'angle d'incidence permettant une variation de la vitesse normale (différents régimes d'impacts sont donc décrits, cf § 1). Le régime d'interaction évolue du régime de rebond vers un régime de splashing. La valeur de l'énergie prélevée par l'impact d'une goutte, E_{1G} (décrite dans le sens des

¹ L'expression des différentes impédances Z_n est détaillée dans la référence [5].

températures décroissantes) baisse de façon quasi monotone jusqu'à la température de Leidenfrost où on observe une brutale augmentation de l'énergie qui est due au mouillage de la paroi (régime de dépôt). On met également en évidence la dépendance de la température de Leidenfrost au nombre de Weber basé sur la vitesse normale. Cet effet est connu sous le nom de température dynamique de Leidenfrost et a été déjà mis en évidence par ailleurs [8].

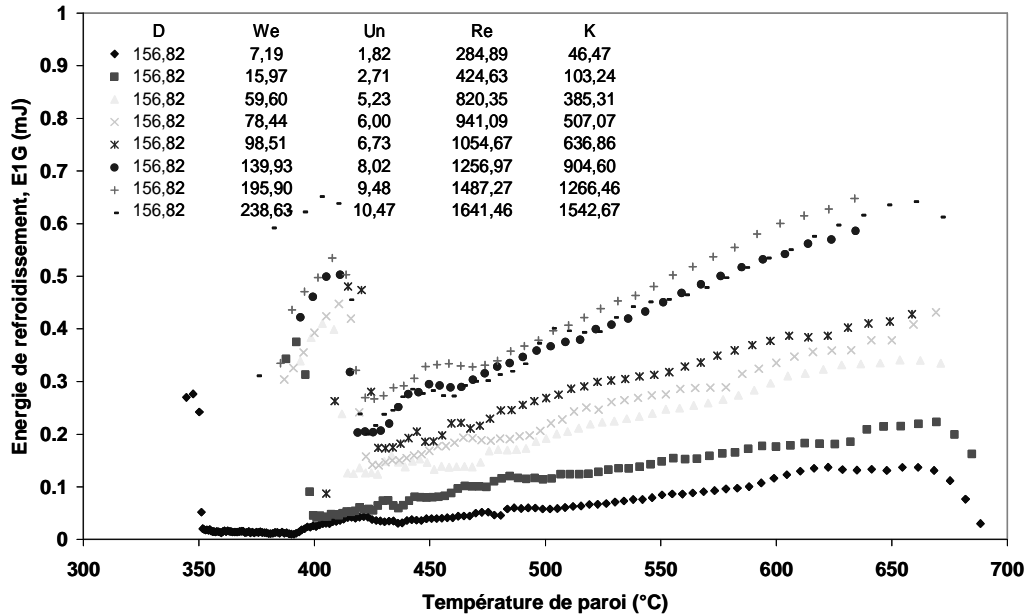


FIG. 4 - Exemple d'énergie de refroidissement pour différents nombres de Weber

5 Modélisation des échanges en paroi

Une goutte interagit avec la paroi pendant un temps d'interaction t_R . Si le nombre de Weber incident n'est pas très élevé, la goutte va s'étaler sur la paroi puis retrouver sa forme sphérique après rebond. L'évolution du diamètre d'étalement et le temps de résidence peuvent être modélisés en fonction des paramètres dynamiques de la goutte incidente [9] et finalement, de l'énergie estimée expérimentalement, on peut déduire une valeur estimée du coefficient d'échange correspondant à partir de la relation suivante :

$$E_{IG} = h_{p,v}(T_P - T_V) \int_0^{t_R} \pi R_e(t)^2 dt \quad (5)$$

On remarque que les valeurs obtenues pour le coefficient d'échange sont bien supérieures à la valeur de 900 W/m².K mesurée par Bianco et al. [9] pour une goutte d'eau sessile. En effet, l'épaisseur de la couche de vapeur est beaucoup plus faible dans le cas d'une goutte en impact, ce qui a pour conséquence directe une nette augmentation du transfert. Cependant, nos mesures ont également montrées que le modèle établi par Guo et al. [10] pour estimer E_{IG} sous-estime nettement nos valeurs mesurées. Leur modèle tient pourtant compte de la déformation des gouttes à l'impact.

6 Conclusions et perspectives

Cette étude avait pour but la mesure et l'analyse de l'énergie prélevée par des gouttes individuelles en impact sur une surface portée à haute température ($T > T_{Leidenfrost}$). La méthode utilisée permet d'obtenir une valeur moyenne de l'énergie perdue par la paroi à chaque impact de goutte. Les valeurs mesurées montrent que les modèles précédemment établis sous-estiment les valeurs expérimentales car la topologie des gouttes à l'impact est insuffisamment décrite. Dans le futur, il s'agira de modéliser complètement ce type d'interaction. Pour ce faire, il nous faut obtenir des données supplémentaires comme l'évolution de l'épaisseur de vapeur formée sous la goutte.

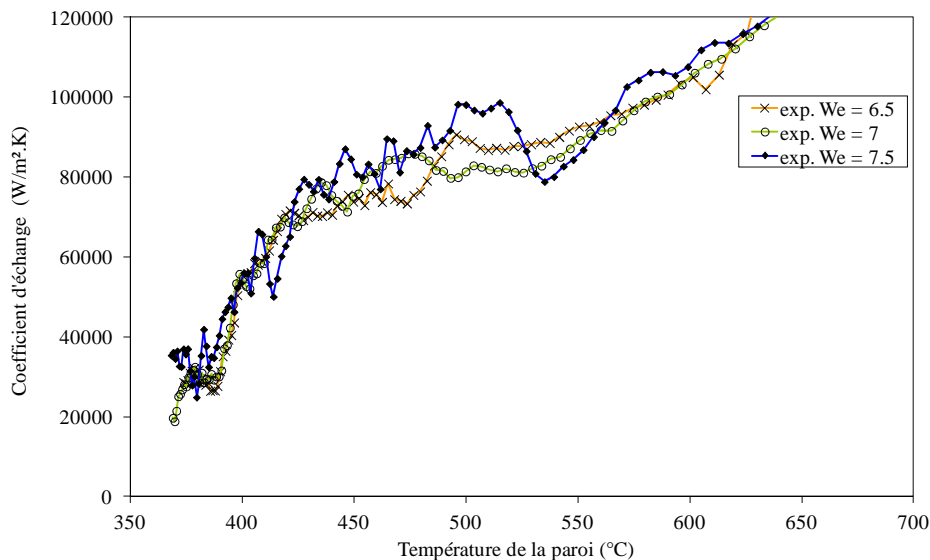


FIG. 5 – Exemple d'évolution du coefficient d'échange pour plusieurs diamètres de goutte
 D_G (μm) = 150 (\times) ; 161 (\circ) ; 172 (\blacklozenge) and $U_n = 1.76 \text{ m.s}^{-1}$

References

- [1] G. Castanet, T. Liénart, F. Lemoine, 2009, Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall, *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, 52, Issues 3-4, 670-679
- [2] Wachters, L. H. J. & Westerling, N. A. J., 1966, The heat transfer from a hot wall to impinging water drops in the spheroidal state, *Chemical Engineering Science* 21, 1047–1056.
- [3] DJE Harvie, 1999, A hydrodynamic and thermodynamic simulation of droplet impacts on hot surface, PhD thesis, University of Sydney (Australia)
- [4] F. Lelong, M. Gradeck, B. Rémy, A. Ouattara, D. Maillet, Inverse Conduction Technique in Hankel domain using infrared thermography: Application to droplet stream quenching a metal disk, IHTC14, Washington, August 2010.
- [5] P. Dunand, G. Castanet, and F. Lemoine, "A two-color Planar LIF technique to visualize the temperature of droplets impinging onto a heated wall," in 15th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbonne, Portugal, 2010, pp. 05-08.
- [6] P. Dunand, M. Gradeck, G. Castanet, F. Lemoine, D. Maillet, Energy balance in case of single or multiple droplets impinging onto a hot slab in the Leidenfrost regime, 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, September 2012, Heidelberg (Germany). ISBN 978-88-903712-1-9
- [7] F. Lelong, 2010, Etude du refroidissement d'une paroi chaude sous l'effet de l'impact d'un train de gouttes mono-dispersées, Thèse de Doctorat Université Henri Poincaré Tran T et al, 2012. Drop impact on superheated surfaces. *Phys. Rev. Lett.* 108:036101
- [8] Tran T et al, 2012. Drop impact on superheated surfaces. *Phys. Rev. Lett.* 108:036101
- [9] A.L. Bianco, C. Clanet, D. Quéré, Leidenfrost drops, *Physics Of Fluids*, Vol. 15, n°6, June 2003
- [10] Y. Guo, K. Mishima. A non equilibrium mechanistic heat transfer model for post-dryout dispersed flow regime, *Exp. Thermal and Fluid Science*, 26 (2002) 861-869.

Remerciements

Ce travail a été financé par l'Agence Nationale de Recherche (ANR) dans le cadre du programme de recherche IDHEAS (n°ANR-NT09 432160).