



HAL
open science

Mesure PLIF résolues dans le temps du champ de température à l'intérieur d'une goutte au cours de l'impact sur une paroi chaude

Romain Collignon, William Chaze, Ophélie Caballina, Guillaume Castanet,
Fabrice Lemoine

► To cite this version:

Romain Collignon, William Chaze, Ophélie Caballina, Guillaume Castanet, Fabrice Lemoine. Mesure PLIF résolues dans le temps du champ de température à l'intérieur d'une goutte au cours de l'impact sur une paroi chaude. 16ème Congrès Francophone de Techniques Laser pour la mécanique des fluides, CNRS, CentraleSupélec, Université Paris Saclay, IRSN, Sep 2018, Dourdan, France. hal-02097668

HAL Id: hal-02097668

<https://hal.science/hal-02097668>

Submitted on 12 Apr 2019

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.

Mesure PLIF résolues dans le temps du champ de température à l'intérieur d'une goutte au cours de l'impact sur une paroi chaude

Romain COLLIGNON^{1,2}, William CHAZE^{1,2}, Ophélie CABALLINA^{1,2}, Guillaume CASTANET^{1,2}, Fabrice LEMOINE^{1,2}

¹Université de Lorraine, LEMTA, UMR 7563, F-54500 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

²CNRS, LEMTA, UMR 7563, F-54500 Vandœuvre-Lès-Nancy, France

Email auteur correspondant : ophelie.caballina@univ-lorraine.fr

L'impact de gouttes sur des parois chaudes est rencontré dans de nombreux procédés, notamment le refroidissement par spray de surfaces solides à haute température. L'amélioration de ces procédés est souvent fastidieuse, en raison de la difficulté qu'il y a à modéliser, même pour une seule goutte, les phénomènes associés à un impact (en lien avec la thermique, l'hydrodynamique, l'ébullition). Dans les sprays, se rajoutent en plus des effets d'interaction entre les gouttes voisines. C'est pourquoi cette étude s'intéresse au cas d'une goutte isolée. Les transferts de chaleurs sont étudiés expérimentalement à l'aide d'une technique d'imagerie de fluorescence induite par laser qui permet de déterminer la température des gouttes. Les gouttesensemencées par deux colorants fluorescents ayant des spectres d'émission décalés en longueur d'onde, ce qui permet de détecter séparément le signal de fluorescence qui leur est associé au moyen de deux caméras équipées de filtres chromatiques. Le champ de température du liquide est déterminé avec une bonne précision en effectuant le rapport des images obtenues par chaque caméra. Un des avantages décisifs de cette méthode est que ce rapport n'est pas perturbé par la déformation de la goutte au cours de l'impact. Les expériences sont effectuées dans le régime d'ébullition en film dans lequel une fine couche de vapeur se développe rapidement pendant l'impact à l'interface entre la goutte et la paroi solide. Ce film de vapeur empêche le contact direct entre le liquide et la surface solide, ce qui réduit considérablement les transferts de chaleurs. Les résultats montrent comment le champ de température évolue au sein de la goutte quand celle-ci impacte la paroi à différentes vitesses. Deux liquides, l'eau et l'éthanol, sont également considérés dans cette étude afin de mettre en évidence, l'effet des propriétés du liquide.

1 Introduction

Le refroidissement à l'aide de liquides est largement utilisé dans les applications nécessitant une forte dissipation de chaleur. Des techniques de refroidissement comme l'impact de jet peuvent dissiper une grande quantité de chaleur, mais ne fournissent généralement pas de refroidissement uniforme. En comparaison, les techniques de refroidissement par spray gagnent en intérêt car elles sont caractérisées par une forte dissipation de chaleur, l'uniformité du flux et une faible quantité de fluide. L'utilisation de sprays est très efficace en comparaison des autres techniques de refroidissement. Principalement car la vapeur peut s'échapper facilement même lorsque la température de la paroi est bien au dessus de la température de Leidenfrost. Cependant, même si cette technique de refroidissement est utilisée depuis des décennies, son intégration reste un processus lourd et complexe à cause d'une connaissance encore incomplète de l'écoulement et du transfert de chaleur. En particulier, les investigations scientifiques de gouttes individuelles sont encore nécessaires afin de comprendre la physique derrière les interactions entre une paroi chaude et des gouttes.

L'étude de l'impact de gouttes sur des surfaces solides a reçu une forte attention au cours des dernières décennies. Lorsqu'une goutte impacte une paroi chaude, différents comportements sont possibles : la goutte peut s'étaler sur la paroi solide et s'y accrocher par les forces de

mouillage. Elle peut éclater et engendrer de nombreuses petites gouttes secondaires ou simplement rebondir. Des études expérimentales ont été menées afin de déterminer les paramètres influençant le comportement d'une goutte à l'impact. Certains de ces paramètres sont liés à la géométrie et à la dynamique des gouttes, certains se réfèrent aux propriétés physiques du liquide ou de la surface [1]. Concernant les transferts de chaleur, presque toutes les études se sont focalisées sur l'extraction de chaleur dans le solide. Récemment, Jung et al. [2] ont utilisé la thermographie infrarouge pour caractériser l'évolution temporelle du flux de chaleur à la paroi durant l'impact de gouttes d'eau millimétriques. Les contributions de l'évaporation du liquide et de l'échauffement de la goutte ne sont pas évident à évaluer dans ces travaux. L'échauffement de la goutte peut être caractérisé en thermométrie par fluorescence induite par laser à deux couleurs (2cLIF) qui est une des rares techniques disponibles pour mesurer la températures de gouttes [3].

L'intérêt de la technique pour l'étude de l'impact de gouttes a été initialement démontré sur des jets de gouttes mono-disperses impactant à l'oblique sur une paroi chauffée [4]. Dunand et al. [5] utilisèrent un plan laser et deux caméras afin de visualiser la température des gouttes à l'impact. Cependant, l'utilisation d'un laser continu limitait fortement les mesures. L'intensité lumineuse dans le plan laser n'était pas suffisante pour réduire suffisamment le temps d'exposition des caméras et obtenir des images instantanées de l'impact des gouttes. Plus récemment, un certain nombre d'améliorations ont été apportées à la technique 2cLIF par Chaze et al. [6] pour obtenir des images instantanées de température à l'aide d'un laser pulsé nanoseconde.

La présente étude s'appuie sur ces précédents travaux pour le développement de diagnostics adaptés à la caractérisation des transferts de masse et de chaleur à l'impact d'une goutte sur une paroi chauffée. L'étude se concentre sur le régime d'ébullition en film, dans lequel un fin film de vapeur, à l'interface entre la goutte et la paroi, empêche le liquide de mouiller la surface solide. Finalement, les résultats expérimentaux nous aideront à comprendre le couplage entre la déformation de la goutte à l'impact et les transferts de masse et de chaleur. Pour ce faire, différentes vitesses d'impact pour l'eau et l'éthanol sont étudiées dans ce travail.

2 Métrologie et montage expérimental

2.1 Mesure de température par fluorescence induite par laser à deux couleurs

L'évolution temporelle de la température de la goutte est caractérisée par la technique de fluorescence induite par laser à deux couleurs, qui est une des rares techniques non intrusive capable de mesurer la température dans les liquides. Pour certains colorants organiques comme la fluorescéine, le signal de fluorescence induit par excitation laser est dépendant de la température. Pour que la mesure soit fiable, la variation de signal doit venir exclusivement du changement de température. Cependant, de nombreux facteurs influent l'intensité du signal LIF en plus de la température. Par exemple, la dispersion de la lumière à la traversée de l'interface liquide/gaz déformée, peut perturber l'intensité du signal. Le rapport R des signaux mesurés par des détecteurs opérant dans deux bandes spectrales différentes rend possible l'élimination de la plupart des perturbations. Pour que le rapport de fluorescence R soit sensible à la température, une première solution consiste à mélanger deux colorants qui répondent différemment à la température [7]. Une autre solution est d'utiliser un colorant dont le spectre d'émission est déformé par la température [3]. Jusque récemment, les techniques 2cLIF étaient principalement utilisées pour effectuer des mesures ponctuelles avec un laser continu. Plusieurs travaux ont montré qu'il était possible d'utiliser un plan laser afin de mesurer des champs de température. Cependant, un problème se pose avec l'utilisation d'un laser pulsé. Lorsque l'excitation est intense (typiquement quelques $\text{MW}\cdot\text{cm}^{-2}$), un phénomène

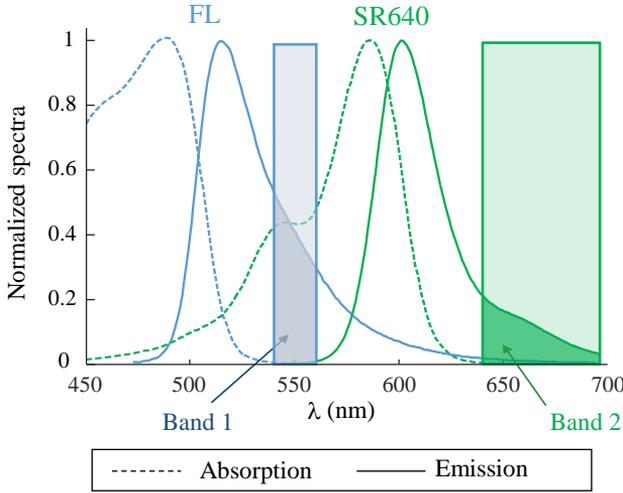


Figure 1: Les deux bandes de détection sélectionnées pour l'application de la technique 2cLIF utilisant le couple de colorants FL/SR640 dans l'eau de saturation affecte le signal de fluorescence dont l'intensité F_λ à la longueur d'onde λ est donnée par :

$$F_\lambda = \eta \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon_0 \phi_\lambda \frac{I_0}{1 + I_0/I_{sat}} C V \quad (1)$$

où I_0 est l'intensité incidente laser. Les paramètres ϵ_0 , ϕ_λ et I_{sat} correspondent respectivement au coefficient d'absorption du colorant à la longueur d'onde du laser, au rendement quantique et à l'intensité de saturation de la fluorescence. C est la concentration molaire du colorant, η est le coefficient de transmission de la fluorescence au détecteur et Ω est l'angle solide de collection.

Les paramètres ϵ_0 , ϕ_λ et I_{sat} dépendent du temps. Alors que ϕ_λ diminue avec la température du fait de la désactivation collisionnelle, l'intensité de saturation I_{sat} suit une tendance inverse [6]. Ce qui conduit à une perte de sensibilité à la température des colorants à forte intensité laser. Ici, la fluorescéine dissodium (FL) est utilisée car sa sensibilité à la température provient exclusivement de ϵ_0 et donc maintient une forte sensibilité y compris dans le domaine d'excitation saturée [6]. La FL est mélangée à la sulforhodamine 640 (SR640) dont l'émission fluorescente ne varie pas avec la température. La figure 1 montre les bandes de détection choisies pour des mesures de température dans l'eau. Étant donné la séparation spectrale entre les deux colorants sur la figure 1, le rapport R des signaux détectés dans chaque bande est à peu près égal à :

$$R = R_0 \frac{\epsilon_{0,FL}(T)}{\epsilon_{0,FL}(T_0)} \quad (2)$$

où R_0 est un rapport de référence mesuré à une température connue T_0 .

2.2 Montage expérimental

Le montage expérimental est présenté en Figure 2. Les gouttes sont générées grâce à un système de pousse-seringue. La goutte se détache de l'aiguille sous l'effet de son poids, ce qui conduit à une taille parfaitement reproductible. Une aiguille de diamètre $400 \mu\text{m}$ est utilisée pour produire des gouttes d'eau de diamètre 2.5 mm et des gouttes d'éthanol d' 1.9 mm de diamètre. La goutte tombe ensuite sur une fenêtre de saphir ($1''$ de diamètre et 5 mm d'épaisseur) insérée dans un support en acier chauffé par des cartouches chauffantes ($4 \times 250 \text{ W}$). Grâce à la

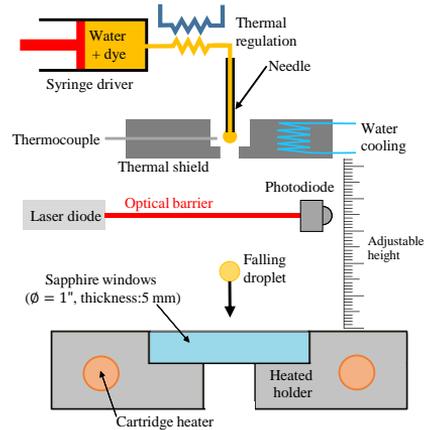


Figure 2: Le montage expérimental

conductivité thermique du saphir (qui est assez élevée), la température de la surface solide est uniforme et égale à celle du support en acier. Un bouclier thermique est nécessaire pour empêcher le liquide de chauffer à l'intérieur de l'aiguille. Le bouclier est placé autour de la pointe de l'aiguille afin de maintenir la température du liquide pendant la formation de la goutte. En déplaçant l'aiguille, il est possible de modifier la hauteur de chute, et donc la vitesse d'impact de la goutte. Enfin, une ouverture dans la plaque d'acier permet d'utiliser la fenêtre de saphir pour visualiser ou éclairer la goutte par le dessous.

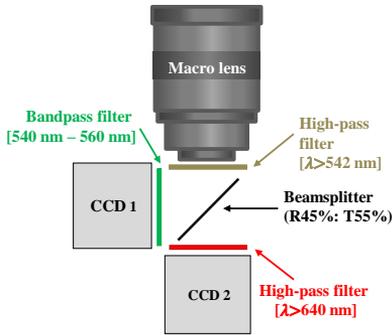


Figure 3: Disposition du système de détection optique

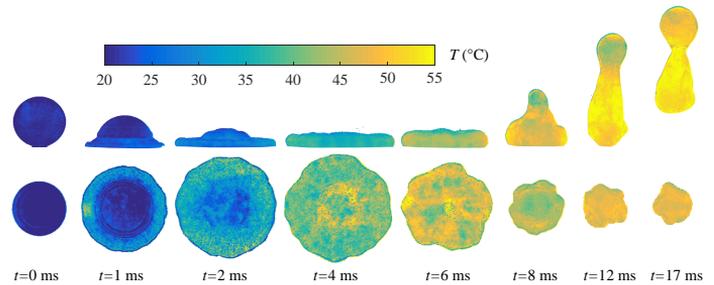


Figure 4: Vues de côté et de dessous du champ de température dans une goutte d'eau impactant à $We = 30.6$

Un faisceau laser provenant d'un laser Nd:YAG pulsée à 532nm (Quantel Brillant B, $E = 450\text{mJ}$, durée du pulse $dt = 5\text{ns}$) est utilisé pour exciter la fluorescence. Le diamètre du faisceau (environ 6 mm) permet d'illuminer tout le volume de la goutte pendant sa déformation. Les expériences sont effectuées à haute puissance laser (typiquement $I_0 > 100 \text{ MW/cm}^2$) si bien que la fluorescence est saturée. Du fait de cette saturation, l'émission de fluorescence est distribuée uniformément dans la goutte. La fréquence de répétition du laser pulsé (10Hz) est bien trop faible pour résoudre temporellement l'impact d'une goutte. Une barrière optique faite d'une diode laser et d'une photodiode est placée sur la trajectoire de la goutte à quelques millimètres de la paroi de saphir. Ceci permet de déclencher le tir du laser au passage de la goutte. Un système électronique décale temporellement le pulse laser par petits incréments pour explorer, goutte après goutte, la totalité de l'impact. Deux caméras CCD (Allied Vision Tech Prosilica GT3300 B/C GigE Camera 3296 x 2472, 12 bit, $5.5\mu\text{m}$), chacune équipée d'un filtre interférentiel détectant la fluorescence dans les bandes spectrales choisies (Fig.3). Le système optique inclue aussi un objectif (SIGMA APO MACRO 150 mm F2.8 EX DG OS HSM et son téléconvertisseur $\times 2$) et une lame séparatrice placée en face des caméras. Deux configurations du système optique sont utilisées pour visualiser l'impact d'une goutte. Un miroir incliné à 45° , placé sous la fenêtre de saphir peut être utilisé pour observer la goutte par dessous avec les caméras, tandis que le laser illumine la goutte de côté. Le même miroir peut aussi servir à éclairer la goutte par dessous, alors que les caméras prennent des images de côté. Le rapport des images des deux caméras est ensuite utilisé pour calculer la température des gouttes.

2.3 Traitement des images et mesures quantitatives

Pour obtenir une mesure quantitative de température, un traitement spécifique des images est nécessaire. Les étapes de ce traitement, déjà décrites dans [5], incluent une correction des aberrations géométriques et chromatiques, un repositionnement de la paire d'images car les caméras peuvent ne pas avoir le même champ de vision, et une conversion du rapport de fluorescence en température grâce à une calibration et à une prise de référence.

Correspondance des pixels entre les caméras

Un décalage de quelques pixels entre les images des deux caméras peut persister même après un positionnement méticuleux de la lame séparatrice. Un repositionnement numérique des images est donc nécessaire avant de calculer le rapport des deux images. Pour ce faire, une calibration spatiale des coordonnées des images est effectuée par la procédure décrite dans [8]. Une transformation par un polynôme du 3^{ème} ordre est créé pour obtenir une superposition parfaite entre les coordonnées des pixels des images des deux caméras. La fonction polynomiale est déterminée à l'aide d'une grille régulière de points circulaire (diametre : 50µm, espacement : 125µm) positionnée en face du système de détection. Le motif de la grille permet d'obtenir au moins 1500 points de contrôle dans les images pour déterminer les coefficients de la transformation. Ce grand nombre de points de contrôle assure un positionnement précis sur tout le champs de vision. L'erreur résiduelle du positionnement des pixels est estimée de l'ordre de 10µm dans le pire cas.

Calibration de la température

Le rapport de fluorescence R calculé en divisant les images des caméras est converti en température à partir d'une courbe de calibration. La calibration est effectuée dans une cuve de verre dans laquelle la solution fluorescente est chauffée progressivement de 20°C à 80°C. Des images sont enregistrées dans les deux bandes de détection et le rapport de fluorescence est déterminé. Pour une solution de $C_{SR640} = 0.7 \cdot 10^{-6}M$ et $C_{FL} = 2 \cdot 10^{-4}M$ dans l'eau, la sensibilité à la température du rapport de fluorescence R est évalué à 2.7%/°C, ce qui veut dire que $R/R_0 \approx \exp\{-0.027(T - T_0)\}$.

Mesure de référence

Une prise de référence est nécessaire pour convertir le rapport de fluorescence en température. En notant f la courbe de calibration et R la valeur mesurée du rapport de fluorescence, la température est donnée par :

$$T = f^{-1} \left(\frac{R}{R_0} f(T_0) \right), \quad (3)$$

où R_0 et T_0 sont respectivement le rapport de fluorescence et la température de référence. R_0 est déterminé à partir des images dans laquelle la goutte a juste impacté le saphir et T_0 est la température de régulation du liquide dans l'injecteur et dans le bouclier thermique (Fig.2).

3 Résultats et discussion

Les expériences ont consisté à varier la hauteur de chute de la goutte et donc la vitesse d'impact V . Des vues de côté et de dessous de l'impact ont été prises dans chaque condition d'impact. La comparaison de gouttes d'eau et d'éthanol met en valeur le rôle des propriétés physiques du liquide. Le nombre de Weber $We = \rho V^2 d / \gamma$, qui compare les énergies cinématique et de surface, varie de 10 à 140 pour des gouttes d'eau et de 30 à 140 pour l'éthanol.

3.1 Gouttes d'eau

Pour des gouttes d'eau, la température de paroi est fixée à 600 °C, tandis que la température de la goutte est maintenue à 20°C. Les Figures 4 et 5 montrent des images instantanées de température prises à différents instants durant l'impact. Pour interpréter ces images, il faut garder à l'esprit que le système d'imagerie ne permet pas d'obtenir des sections optique dans la goutte. Les images correspondent à une moyenne de la température dans l'épaisseur de la goutte car la profondeur de champ de la caméra est de plusieurs millimètres. En fonction

du nombre de Weber, différentes phases sont observées : l'étalement et le recul/rebond ou la fragmentation/éclatement.

La phase d'étalement dure environ 3-4ms. Pour des très faibles nombres de Weber (typiquement ≤ 20 , Fig.4), la chauffe est plutôt faible durant la phase d'étalement et il est difficile de repérer un région où la chauffe est plus intense. Pour des valeurs plus élevées du nombre de Weber (Fig.5), les vues de dessous montrent une bande où la température est plus élevée au bord de la goutte à $t=1$ et 2ms. A ces instants, la lamelle éjectée est bien plus fine que la région centrale, ce qui permet d'observer une chauffe du liquide dans les vues de dessous. Pour une vitesse d'impact suffisamment grande, la lamelle prend une forme gaussienne entourée d'un bourlet annulaire, qui grandit à cause de la décélération du liquide induite par les forces capillaires qui s'opposent à l'étalement [9]. Dans la Figure 5, la température du liquide atteint presque 80°C dans la région d'épaisseur minimum. Ensuite, dans le bord, le liquide provenant de la lamelle se mélange rapidement avec le liquide plus froid s'étant accumulé.

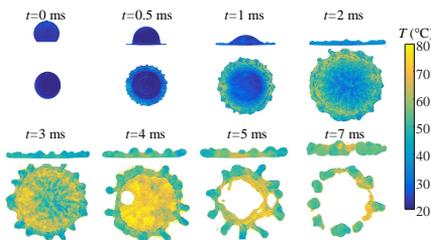


Figure 5: Vues de côté et de dessous du champ de température dans une goutte d'eau impactant à $We = 92$

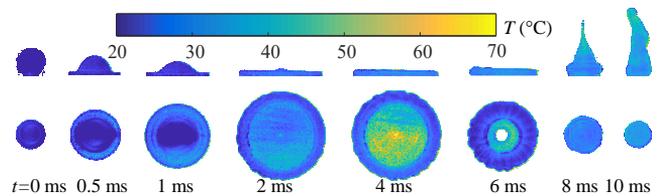


Figure 6: Vues de côté et de dessous du champ de température dans une goutte d'éthanol impactant à $We = 92$

3.2 Gouttes d'éthanol

Pour des gouttes d'éthanol, la température de paroi est de 600°C et la température initiale de la goutte est maintenue à 20°C . A cause d'un point d'évaporation plus bas et d'une plus faible tension de surface, les résultats obtenus montrent des différences par rapport à ceux obtenus avec l'eau, mais aussi des similitudes. La Figure 6 montre des images instantanées de la température prises à différents instants de l'impact pour un nombre de Weber de 92. Au cours de l'étalement, la lamelle prend une forme gaussienne entourée par un bourlet annulaire. Comme pour l'eau, les vues de dessous montrent une bande de température plus élevée autour du bord de la goutte à $t = 0.5$ et 1 ms à cause de l'épaisseur plus fine de la goutte sur les bords. A la fin de l'étalement, autour de $t = 4$ ms, la température est plus élevée au centre de la goutte. La distribution de température est opposée à celle du cas de l'eau à $We=30$ (Fig.4), où la goutte rebondit également. Dans les deux cas, pendant le recul du bord, le liquide chaud provenant du bord se mélange avec la liquide froid du centre, mais l'orientation spatiale du mélange est inversée.

3.3 Échauffement final de la goutte : effet de la vitesse d'impact

La Figure 7 montre l'échauffement final des gouttes pour chaque vitesse d'impact testée (élévation de température de la goutte au sortir de l'impact). Les valeurs sont calculées à partir de la moyenne des températures des images de côté et de dessous.

Pour l'eau, dans une première étape, l'échauffement augmente avec le nombre de We jusqu'à atteindre un plateau. Ce plateau correspond à l'apparition du régime d'éclatement. A faible vitesse d'impact, la période de chauffe couvre les phases d'étalement et de recul comme vu en Fig.4. Pour $We \geq 92$, au contraire, la majorité de l'échauffement prend place pendant la

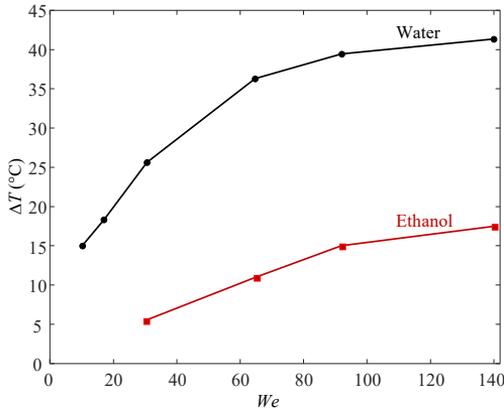


Figure 7: Évolution de l'échauffement moyen spatial avec le nombre de Weber pour l'eau et l'éthanol

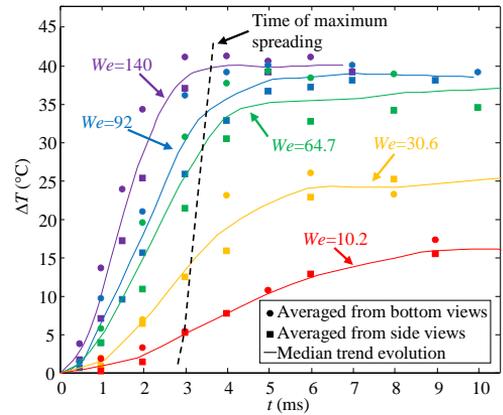


Figure 8: Évolution temporelle de la moyenne spatiale de l'échauffement de gouttes d'eau pour différents We

phase d'étalement (Fig.5). Avec l'augmentation du nombre de Weber la surface d'étalement augmente, ce qui améliore les transferts de chaleur pendant la phase d'étalement. Toutefois, le liquide s'accumule plus vite dans le bourlet au bord où le taux transfert de chaleur avec la paroi semble faible.

Pour l'éthanol, la tendance est similaire mais deux différences majeures peuvent être observées. Comme la goutte n'éclate pas pour un nombre de Weber de 140, aucun plateau d'échauffement n'est observé. Dans le cas de l'eau, le liquide prisonnier dans le bourlet ne chauffe pas significativement. Dans le centre de la lamelle, la chauffe est aussi limitée car le liquide s'approche de la température d'ébullition (78°C pour l'éthanol). Il est aussi observé que la température finale des gouttes d'éthanol est plus faible que celles de l'eau. Ceci est dû au point d'évaporation plus bas de l'éthanol. De plus, la couche de vapeur sous la goutte est certainement plus épaisse que pour l'eau, c'est pourquoi les gouttes d'éthanol sont plus isolées de la paroi chaude.

4 Conclusion

L'échauffement d'une goutte impactant sur une paroi solide dans le régime d'ébullition en film a été quantifié précisément à l'aide d'une technique optique non intrusive : la fluorescence induite par laser à deux couleurs. Cette étude montre les capacités de cette technique pour obtenir des images instantanées du champ de température dans des écoulements liquides dispersés. Le couple de traceurs fluoresceine dissodium/suflorhodamine 640 peut être recommandé à forte intensité laser dans le régime de fluorescence saturée. Les mesures montrent un fort effet du nombre de Weber sur les transferts de chaleur. Lorsque le nombre de Weber augmente, la surface d'échange augmente ce qui induit une augmentation de l'échauffement du liquide. Cependant, alors que le nombre de Weber augmente, l'influence de la vitesse d'impact est de moins en moins marquée. Il y a presque une saturation de la chaleur extraite de la surface solide dans le régime d'éclatement. Cette tendance a été observée pour des gouttes d'eau. Pour l'éthanol, l'éclatement n'est pas observé même à des nombres de Weber de 140, un plateau semble être atteint pour des We plus élevés que pour l'eau. L'échauffement final des gouttes d'éthanol est plus faible que pour des gouttes d'eau.

5 Remerciements

Les auteurs remercient le support financier de la région Lorraine à travers le projet CPER ENERBATIN.

References

- [1] Gangtao Liang and Issam Mudawar. Review of drop impact on heated walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106:103 – 126, 2017.
- [2] J. Jung, S. Jeong, and H. Kim. Investigation of single-droplet/wall collision heat transfer characteristics using infrared thermometry. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 92:774 – 783, 2016.
- [3] Fabrice Lemoine and Guillaume Castanet. Temperature and chemical composition of droplets by optical measurement techniques: a state-of-the-art review. *Experiments in Fluids*, 54(7), 2013.
- [4] G. Castanet, T. Lienart, and F. Lemoine. Dynamics and temperature of droplets impacting onto a heated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(3-4):670–679, 2009.
- [5] P. Dunand, G. Castanet, and F. Lemoine. A two-color planar lif technique to map the temperature of droplets impinging onto a heated wall. *Experiments in Fluids*, 52(4):843–856, 2012.
- [6] William Chaze, Ophélie Caballina, Guillaume Castanet, and Fabrice Lemoine. The saturation of the fluorescence and its consequences for laser-induced fluorescence thermometry in liquid flows. *Experiments in Fluids*, 57(4):58, 2016.
- [7] Jeffrey A. Sutton, Brian T. Fisher, and James W. Fleming. A laser-induced fluorescence measurement for aqueous fluid flows with improved temperature sensitivity. *Experiments in Fluids*, 45(5):869–881, 2008.
- [8] J Sakakibara and RJ Adrian. Whole field measurement of temperature in water using two-color laser induced fluorescence. *Experiments in Fluids*, 26(1-2):7–15, 1999.
- [9] G. Castanet, O. Caballina, and F. Lemoine. Drop spreading at the impact in the leidenfrost boiling. *Physics of Fluids*, 27(6):063302, 2015.