

Echauffement de gouttes impactant une paroi chauffée

Thomas LIENART, Guillaume CASTANET, Fabrice LEMOINE

LEMETA, Nancy-Université, CNRS

2 Avenue de la Forêt de Haye – BP 160, 54504 Vandœuvre-lès-Nancy

*(auteur correspondant : guillaume.castanet@ensem.inpl-nancy.fr)

Résumé - Cette communication présente une étude expérimentale de l'impact de gouttes d'eau sur une paroi chaude de Nickel. Une caméra rapide est utilisée afin d'observer les régimes d'impact (rebond, éclatement, dépôt) pour un large ensemble de conditions d'impacts (température de paroi, angle d'incidence, vitesse, taille des gouttes...), ce qui permet de préciser les conditions d'existence de ces régimes. L'accent est ensuite mis sur l'échauffement des gouttes lors de l'impact. La température des gouttes avant et après un est mesurée à l'aide de la fluorescence induite par laser à deux couleurs. L'échauffement des gouttes dépend de la vitesse normale mais peu de la température de paroi lorsque le régime d'impact est un rebond.

Nomenclature

C	Concentration en traceur fluorescent	μ	Viscosité dynamique
D	Diamètre des gouttes	ρ	Masse volumique
f	Fréquence d'injection des gouttes	σ	Tension superficielle
Oh	Nombre d'Ohnesorge	<i>Indices et exposants</i>	
T	Température	$éb$	ébullition
V	Vitesse des gouttes	p	Paroi
We	Nombre de Weber	l	Liquide
<i>Symboles grecs</i>		L	Température de Leidenfrost
α	Angle d'incidence	n	Normale à la paroi

1. Introduction

Les phénomènes d'interaction entre gouttes et parois chaudes sont présents dans un grand nombre d'applications industrielles telles que les dispositifs de refroidissement diphasiques. Dans le domaine de la sidérurgie, un refroidissement contrôlé et homogène du métal est nécessaire pour obtenir des alliages présentant des propriétés mécaniques et structurales souhaitées. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques liés aux interactions gouttes-paroi permettrait à terme d'améliorer l'efficacité du refroidissement et son homogénéité. L'étude de ces phénomènes est toutefois complexe du fait du grand nombre de paramètres mis en jeu. Les travaux concernent l'étude de l'impact d'un train de gouttes d'eau sur une plaque de nickel chauffée par effet Joule. Ils visent à caractériser l'effet de la température de paroi et des paramètres aérodynamiques (vitesse, angle d'impact des gouttes) sur l'échauffement des gouttes lors de leur impact. Ces résultats sont nécessaires pour établir un bilan énergétique de l'interaction gouttes-paroi.

2. Dispositif expérimental

La plaque est un parallélépipède de dimension 2x2x10cm constitué de nickel à 99%. Une cartouche ($L = 10$ cm, $\varnothing = 7$ mm) présentant une résistance électrique de 110 Ω assure le chauffage par effet Joule (Figure 1). Un thermocouple inséré dans la plaque est connecté à un régulateur de puissance qui permet de maintenir une température de consigne. La température de paroi a

été mesurée au moyen d'une caméra infrarouge en l'absence de gouttes. Au centre de la plaque, où les impacts ont lieu, la température de paroi est relativement uniforme. Des écarts de température d'environ 10°C sont observés pour une température de paroi égale à 330°C (Figure 2). La paroi est polie de manière à obtenir une surface lisse. Des profils de rugosité mesurés à l'aide d'un palpeur indiquent que la rugosité moyenne R_a est d'environ $0,5\ \mu\text{m}$.

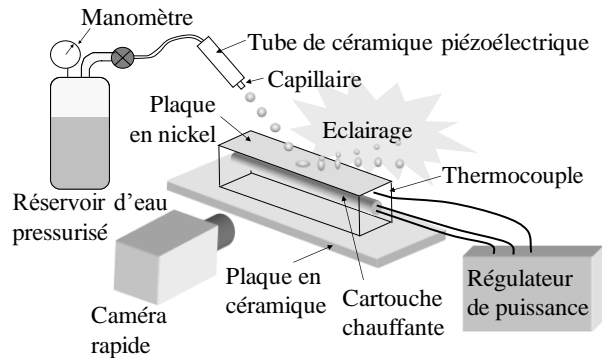


Figure 1 : Schéma du dispositif utilisé pour la visualisation par ombroscopie



Figure 2 : Température de surface obtenue par thermographie infrarouge

L'injecteur de gouttes est constitué d'un capillaire encapsulé à l'intérieur d'une céramique piézoélectrique. Une tension alternative est appliquée à la céramique piézoélectrique qui communique ses vibrations à la paroi du tube capillaire. Lorsque l'injecteur est alimenté par du liquide sous pression, un jet cylindrique s'échappe du capillaire. Pour certaines fréquences d'excitation, ce jet se désintègre en une ligne de gouttes de façon périodique selon l'un des modes de l'instabilité de Rayleigh. Des gouttes dont le diamètre est d'environ $100\ \mu\text{m}$ sont ainsi produites à des fréquences de quelques kHz et à des vitesses de quelques m/s.

3. Dispositif expérimental

3.1. Système de visualisation des gouttes

L'observation de l'impact des gouttes se fait au moyen d'une caméra rapide (Photron ultima APX-RS) équipée d'un capteur CMOS (10 bits). Celle-ci fonctionne à une cadence allant de 3000 images/s en pleine résolution (1024×1024 pixels) à 250000 images/s en résolution réduite. Afin d'obtenir des images contrastées des gouttes, un éclairage des goutte par l'arrière (ombroscopie) est mis en place (Figure 1). Les images sont ensuite analysées pour déterminer l'angle d'incidence α des gouttes ainsi que leur écartement L . La vitesse V des gouttes est alors donnée par $V=L \cdot f$, où f est la fréquence d'injection. Le traitement des images peut également servir à estimer la taille des gouttes. Cependant, pour une meilleure précision, le diamètre des gouttes est en générale déterminé à partir du débit volumique de liquide injecté.

3.2. Mesure de la température des gouttes

La température des gouttes est mesurée par la fluorescence induite par laser à deux couleurs [1]. Cette technique consiste à ensemencer le liquide par une faible concentration (quelques ppm) d'un traceur fluorescent sensible à la température, la rhodamine B, dont la fluorescence peut être facilement induite par la raie verte ($\lambda=514.5\ \text{nm}$) du laser à argon ionisé. Le spectre de fluorescence de la rhodamine B s'étend sur une large bande et sa dépendance en température varie fortement en fonction de la longueur d'onde. Le signal de fluorescence est détecté simultanément sur deux bandes spectrales et le rapport des intensités sur chacune des bandes est calculé. Ceci permet d'éliminer toute dépendance au volume

intercepté par les faisceaux laser, à l'intensité d'excitation ainsi qu'à la concentration du traceur fluorescent. En outre, la sensibilité en température sur chaque bande spectrale est largement différente. Le rapport R_f des intensités de fluorescence I_{f1} et I_{f2} mesurées sur chacune des bandes spectrales est donné par :

$$R_f = \frac{I_{f1}}{I_{f2}} = K e^{\frac{a_1 - a_2}{T^2} + \frac{b_1 - b_2}{T}} \quad (1)$$

L'utilisation d'un point de référence pour lequel la température est connue, à savoir le point d'injection permet d'éliminer la constante K , caractéristique des paramètres optiques et spectroscopiques du système. Les coefficients $(a_1 - a_2)$ et $(b_1 - b_2)$ sont déterminés préalablement dans une cuve où la température est contrôlée.

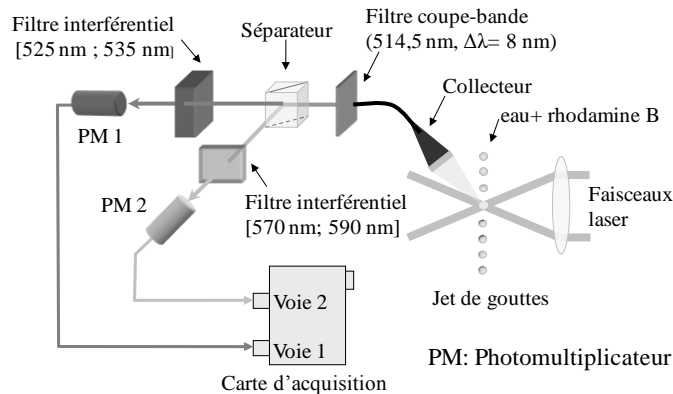


Figure 3 : Dispositif de mesure de la température par fluorescence induite par laser à deux couleurs

Le volume de mesure est formé par l'intersection de deux faisceaux issus de la même source au moyen d'un dispositif d'anémométrie laser Doppler (Figure 3). Ce volume correspond à un ellipsoïde de révolution ($150 \times 150 \times 1500 \mu\text{m}^3$). Le signal de fluorescence est collecté sous un angle de 90° et analysé par un dispositif optique. Celui-ci comprend un ensemble de séparateurs de faisceaux et de filtres optiques permettant d'éliminer la diffusion de Mie par les gouttes et de diviser le signal de fluorescence en deux bandes spectrales prédéterminées. Les signaux optiques correspondants à chacune des bandes spectrales sont détectés et convertis en tension par deux photomultiplicateurs munis d'amplificateurs trans-impédance. Le signal de fluorescence est moyenné sur l'ensemble du temps de transit de la goutte dans le volume de mesure, ce qui permet de déterminer une température moyenne. L'incertitude de mesure est estimée à environ $\pm 1^\circ\text{C}$

4. Résultats expérimentaux

4.1. Cartographie des régimes d'impacts

De nombreuses expériences ont été réalisées pour tester l'influence des conditions d'injections (température de paroi, taille et vitesse des gouttes, angle d'incidence) sur le régime d'impact. Ces expériences ont consistées à observer à l'aide de la caméra rapide, si le régime d'impact était un rebond, un éclatement ou le dépôt d'un film liquide (figure 4). Lorsque la température de paroi est plus faible que la température de Leidenfrost statique, les images montrent que la goutte se dépose et forme un film liquide sur la paroi (Figure 4.a). Lorsque la température de la paroi dépasse la température de Leidenfrost, les deux régimes observés sont le rebond et l'éclatement (figures 4.b et c). Pour des vitesses normales suffisamment faibles, le régime de rebond prédomine. Une combinaison des nombres de Weber et d'Ohnesorge a été introduite afin de décrire l'interaction goutte/paroi. Le paramètre K est défini par l'expression suivante :

$$K = We Oh^{-0.4} \quad (2)$$

avec $We = \frac{\rho_l D V_n^2}{\sigma}$ et $Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l D \sigma}}$. K a déjà été utilisé pour décrire la transition entre les

différents régimes d'impact [2, 3]. Les propriétés physiques intervenant dans ce paramètre sont évaluées à la température d'injection des gouttes soit environ 20°C. Une température sans dimension est également utilisée pour décrire l'influence de la température de paroi. Son expression est basée sur les travaux d'Amiel [4] :

$$T^* = \frac{T_p - T_{eb}}{T_L - T_{eb}} \quad (3)$$

Dans cette expression, T_{eb} est la température d'ébullition de l'eau. La température de Leidenfrost T_L est fixée à 220°C. Cette température est telle que le flux de chaleur transféré à la paroi soit minimal. T_L est légèrement modifiée par la vitesse normale des gouttes [5]. En effet, si la goutte a une grande énergie cinétique, la force d'inertie exercée par la goutte sur le film de vapeur peut devenir suffisamment grande que la goutte parvienne traverser le film de vapeur et à toucher la paroi. L'effusivité thermique $\varepsilon = \sqrt{\lambda \rho C_p}$ de la paroi et du liquide modifie le comportement des gouttes à l'impact [6]. Dans l'équation (3), la température de paroi est donc remplacée par la température de contact [6] lorsque les régimes d'impacts sont le dépôt et l'éclatement.

$$T_p = \frac{\varepsilon_p T_{th} + \varepsilon_l T_l}{\varepsilon_p + \varepsilon_l} \quad (4)$$

Dans cette expression, T_{th} désigne la température mesurée par thermocouple à l'intérieur de la plaque de Nickel.

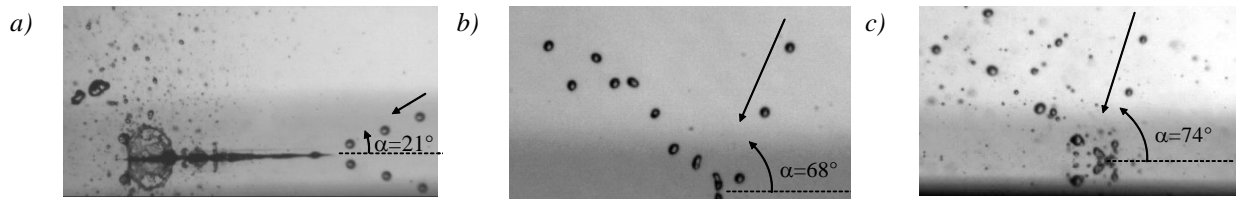


Figure 4 : Exemple d'interactions goutte-paroi observées (a : film liquide bouillonnant $T_p=120^\circ\text{C}$, $D=150 \mu\text{m}$, $V=5.2 \text{ m/s}$, $\alpha=21^\circ$, $f=10 \text{ kHz}$, b : rebond $T_p=330^\circ\text{C}$, $D=104 \mu\text{m}$, $V=6 \text{ m/s}$, $\alpha=68^\circ$, $f=10 \text{ kHz}$, c : éclatement $T_p=250^\circ\text{C}$, $D=115 \mu\text{m}$, $V=7.2 \text{ m/s}$, $\alpha=74^\circ$, $f=10 \text{ kHz}$)

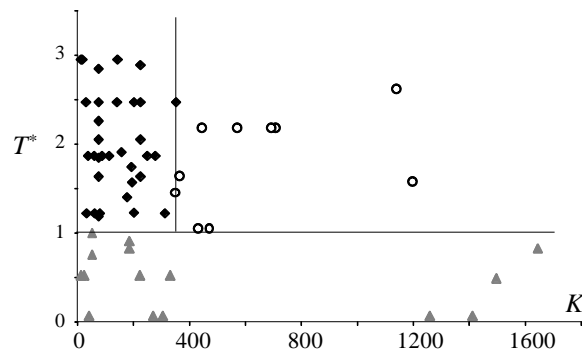


Figure 5 : Cartographie des différents régimes d'impact dans un diagramme T^*-K (cercle : éclatement, triangle : dépôt, losange : rebond)

La figure 5 montre la répartition des différents régimes d'impact dans un diagramme T^*-K . $T^*=1$ délimite le régime de dépôt des autres régimes. Bien qu'une transition existe entre le dépôt et l'éclatement pour une paroi froide, aucun éclatement n'a été observé pour $T^*<1$. Ceci est sans doute lié au fait que le paramètre K n'excède pas 1700 dans cette étude. La transition

entre les régimes d'éclatement et de rebond ne dépend que de la valeur de K . Une valeur critique de K égale à environ 400 peut être proposée pour décrire cette transition.

4.2. Etude de l'échauffement des gouttes

Durant cette étude, les gouttes sont injectées à 10 kHz avec un diamètre d'environ $110 \mu\text{m}$ et une vitesse de 9.1 m/s. Afin de tester la fiabilité de la mesure de la température, le premier cas étudié a été celui d'un film liquide bouillonnant. La température de paroi est fixée à 160°C . Un film liquide long d'environ 1 cm se maintient de manière stable grâce à un équilibre entre l'évaporation et l'apport d'eau par les gouttes incidentes. La figure 6 montre la distribution de la température dans une section du film passant par l'axe du jet. Comme attendu, les températures mesurées sont assez proches de la température d'ébullition de l'eau, mais un gradient de température peut être observé. Bien que l'ébullition prenne naissance au niveau de la paroi, la température mesurée à cet endroit est plus faible que la température d'ébullition. En fait, l'ébullition est un phénomène localisé et intermittent, tandis que les températures mesurées correspondent à des moyennes entre du liquide incident plutôt froid et du liquide bouillonnant sur un volume de mesure ($150 \times 150 \times 1500 \mu\text{m}^3$) et sur un temps de quelques secondes.

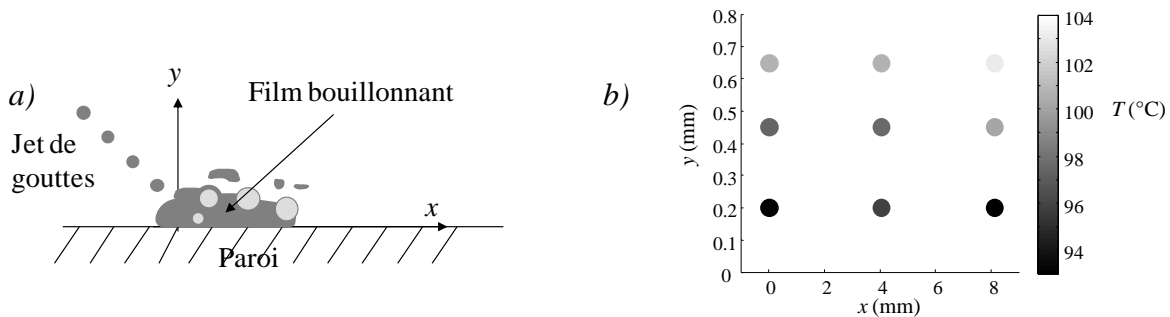


Figure 6: Température dans un film bouillonnant ($T_p=160^\circ\text{C}$, $D=106.6 \mu\text{m}$, $V=9.1 \text{ m/s}$, $f=10 \text{ kHz}$) (a : orientation du repère, b : points de mesure), $x=0$ est le point d'impact des gouttes

L'accent a ensuite été mis sur la caractérisation de l'échauffement des gouttes dans le cas de rebond ou d'éclatement. La température des gouttes a été mesurée juste avant et juste après l'impact. Dans ces deux cas, le volume de mesure a été placé en hauteur à 0.5 mm de la paroi. Lorsqu'un éclatement se produit, seule une partie des gouttes secondaires pénètrent toutefois à l'intérieur du volume de mesure. Une première série de mesure a été effectuée afin de mettre en évidence l'influence de l'angle d'incidence. La température de paroi a été maintenue à 400°C . Pour des angles d'incidence inférieurs à 47° , le régime d'un impact est le rebond. La figure 7 montre l'accroissement de la température des gouttes au moment de l'impact en fonction de l'angle d'incidence. L'échauffement des gouttes est d'autant plus élevé que l'angle d'incidence est grand. Aucune discontinuité ne peut être mise en évidence entre les régimes de rebond et d'éclatement. Cependant, l'échauffement évolue peu lorsque l'angle d'incidence correspond à un éclatement. Plusieurs explications peuvent être avancées pour expliquer ces résultats. Il est établi que le rayon d'étalement des gouttes au niveau de la paroi augmente avec le nombre de Weber normal [7] et avec lui la surface des échanges thermiques. Une augmentation de la vitesse normale des gouttes peut également réduire l'épaisseur de la couche de vapeur séparant la goutte de la paroi qui se comporte comme un isolant thermique.

L'influence de la température de la paroi a également été étudiée dans le cas de deux jets de gouttes venant impacter la paroi sous un angle de 17° et 33° . La température de paroi varie de 250°C à 450°C . Les résultats présentés sur la figure 8 concernent donc uniquement le régime de rebond. La figure 8 montre l'évolution de l'échauffement ΔT des gouttes en fonction de la température de paroi. Elle met en évidence que l'accroissement de la

température des gouttes est indépendant de la température de paroi. Ce résultat s'explique par le fait que la température de paroi aurait peu d'effet sur l'étalement des gouttes. D'autre part, bien que le film de vapeur séparant la paroi et la goutte soit susceptible de s'épaissir avec la température de paroi, l'effet d'un tel épaississement sur le flux de chaleur transféré à la goutte est sans doute modéré. Il est en effet établi que le flux de chaleur augmente très lentement avec la température de paroi lorsque le domaine d'ébullition est l'ébullition en film.

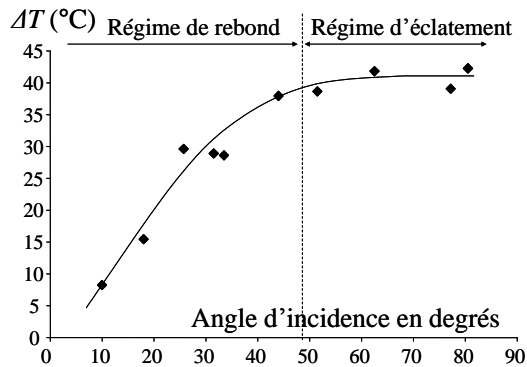


Figure 7: Influence de l'angle d'incidence sur l'échauffement des gouttes ($V=9,1$ m/s, $T_{inj}=22^{\circ}\text{C}$, $D=106$ μm , $f=10$ kHz, $T_p=400^{\circ}\text{C}$)

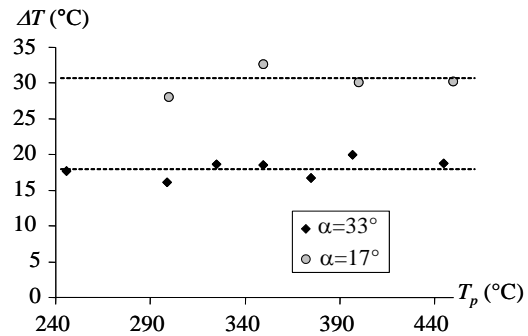


Figure 8: Influence de la température de paroi sur l'échauffement des gouttes ($V=9,1$ m/s, $T_{inj}=27^{\circ}\text{C}$, $D=106$ μm , $f=10$ kHz)

5. Conclusions

La fluorescence induite par laser à deux couleurs a permis de caractériser finement l'échauffement de gouttes en interaction avec une paroi chaude. L'augmentation de la température des gouttes au moment d'un impact peut atteindre près de 40°C dans le cas d'un éclatement contre un dizaine de degrés dans le cas d'un rebond parfait, cet écart de température étant fortement lié à l'angle d'impact. Aucun effet de la température de paroi sur l'échauffement des gouttes n'a pu être mis en évidence dans le cas du rebond. Ces travaux indiquent que la chaleur sensible transférée aux gouttes est loin d'être négligeable et mérite sans doute d'être prise en compte dans le bilan énergétique de l'interaction gouttes-paroi. Des travaux supplémentaires devraient permettre d'arriver à une modélisation de l'échauffement en fonction du régime d'impact des gouttes.

Références

- [1] P. Lavieille, F. Lemoine, G. Lavergne, M. Lebouché, Evaporating and combusting droplet temperature measurements using 2 colors laser-induced fluorescence, *Exp. in Fluids* 31 (2001) 45-55.
- [2] N. García Rosa, P. Villedieu, J. Dewitte, G. Lavergne, A new droplet-wall interaction model, *Proceedings of the ICLASS*, Aug. 27 – Sept. 1, 2006, Kyoto, Japan.
- [3] G. E. Cossali, A. Coghe, M. Marengo, The impact of a single drop on a wetted solid surface, *Experiments in Fluids* 22 (1997) 463-472.
- [4] C. Amiel, Application de techniques optiques à l'étude du comportement dynamique et thermique de gouttes en interaction avec une paroi chauffée, Ph.D. thesis, École Nationale Supérieure de l'Aéronautique et de l'Espace, 2002.
- [5] S.C. Yao, & K.Y. Cai, The dynamics and Leidenfrost temperature of drops impacting on a hot surface a small angles, *Exp. Thermal and Fluid Sciences*, vol. 1, pp. 363-371, 1988.
- [6] G.E. Cossali, M. Marengo, M. Santini, S. Fest, Effect of wall effusivity on thermally induced secondary atomisation of single drop impacting onto a tilted surface, *ICLASS 2006*, Aug.27-Sept.1, 2006, Kyoto, Japan.
- [7] A. Karl, A. Frohn, Experimental investigation of interaction processes between droplets and hot walls, *Physics of fluids*, vol. 12, No. 4, pp785-796, 2000.