

Rapport de Projet Tuteuré
Année 2013-2014

**« Oscillations des gouttes de
Leidenfrost »**



Projet réalisé par : Olivier Durif
Charles Logeais
Enzo Roche

Encadré par : Franck Celestini

Au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée (LPMC)

Sommaire

Introduction.....	3
Modélisation des gouttes de Leidenfrost.....	5
Expérience.....	7
Montage expérimental.....	7
Protocole expérimental.....	8
Observations expérimentales.....	9
Résultats expérimentaux.....	11
Interprétation des résultats.....	13
Conclusion, perspective.....	14
Bibliographie.....	15

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement M. Franck Celestini pour nous avoir accompagné tout au long de notre stage. Ses conseils avisés et son attention ont toujours été très appréciables. Et nous lui souhaitons un prompt rétablissement.

Nous remercions également M. Geoffroy Kirstetter, M. Christophe Raufaste et M. Thomas Frisch pour leur bienveillance et leur disponibilité.

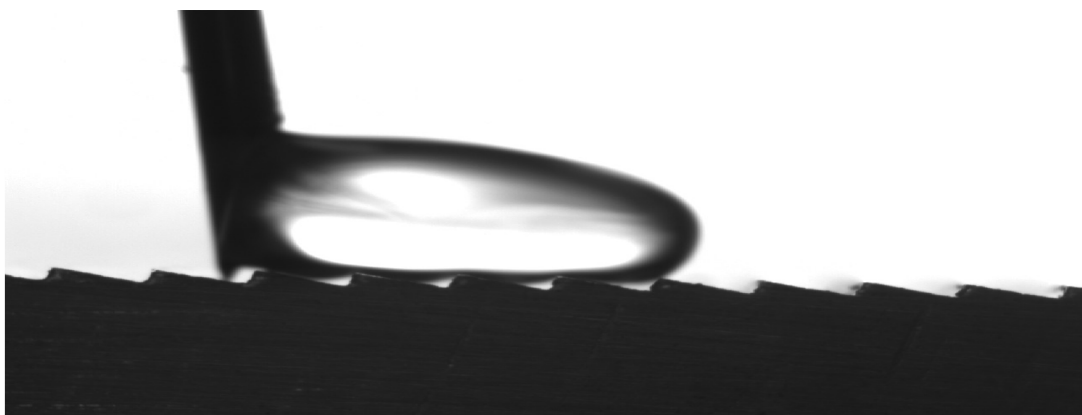
I. Introduction

Dans le cadre de notre troisième année de physique à l'Université de Nice Sophia-Antipolis, nous avons effectué notre stage au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée au sein de l'équipe « Fluide et Matériaux Complexes »[1], qui s'intéresse notamment à la mobilité des gouttes sur des substrats super hydrophobes, à la dynamique de jet et au phénomène de caléfaction[2][3][4].

Le phénomène de caléfaction a lieu lorsqu'une goutte de liquide est déposée sur une plaque portée à très haute température, largement supérieure à la température d'ébullition du liquide. Nous pourrions alors nous attendre à plusieurs phénomènes, par exemple une évaporation instantanée, ou encore une rentrée en ébullition violente suivie d'une explosion de la goutte. Or aucune de ces deux suppositions n'ont lieu. La goutte reste calme, prend une forme très arrondie et acquiert une très grande mobilité. Le secret de ce phénomène est la formation d'un film de vapeur qui vient se loger entre la goutte et la plaque chauffante. Ce coussin de gaz permet d'isoler thermiquement la bulle d'eau et lui confère sa mobilité extrême. Il permet d'expliquer également la raison pour laquelle la goutte d'eau ne disparaît pas instantanément et peut rester ainsi pendant un temps de l'ordre de la minute.

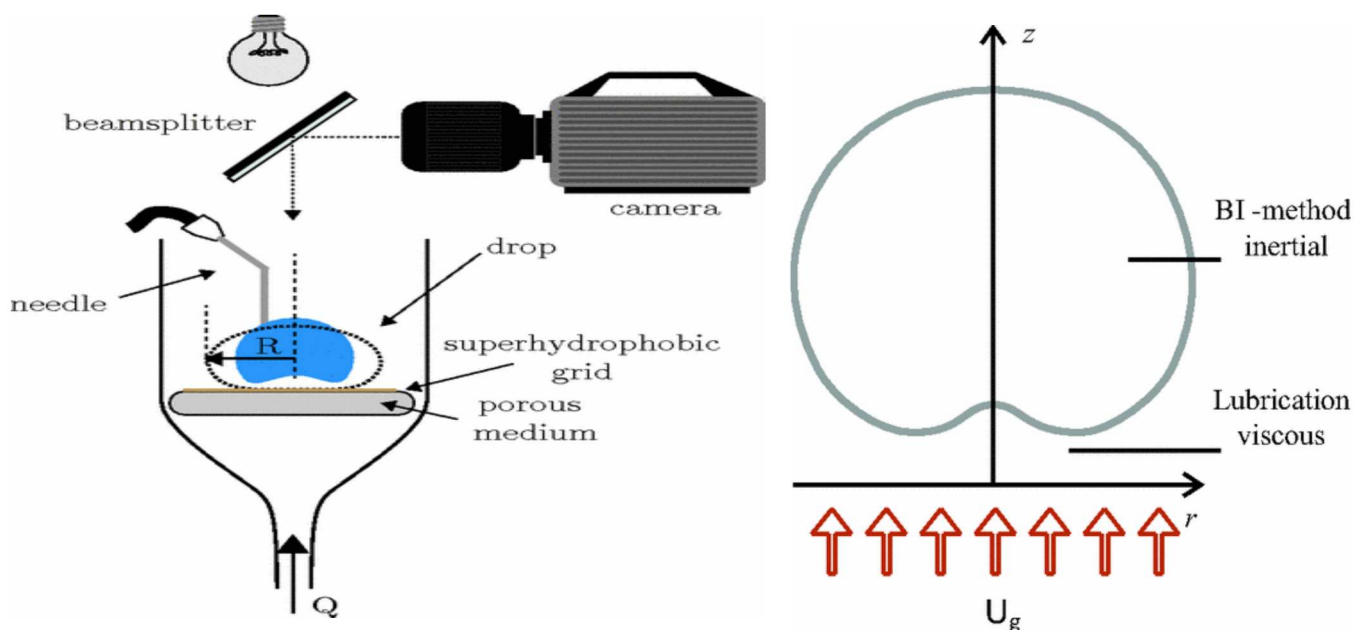
En 1756 un médecin allemand, Johann Gottlod Leidenfrost, fut le premier à s'intéresser à cette particularité [5]. La caléfaction que l'on appelle également « phénomène de Leidenfrost » apparut au grand jour. Par la suite ce scientifique y consacra une partie de ses travaux dans le courant du XVIIIème siècle.

Plus récemment, en 2006 un groupe de chercheurs néerlandais remet au goût du jour la découverte de Johann G Leidenfrost. Ils démontrent que lorsque nous apposons une goutte d'eau sur une surface horizontale, chaude, striée comme un toit d'usine, elles se mettent à avancer toutes seules, propulsées par leur propre vapeur [6].



Actuellement, des ingénieurs s'intéressent à cette spécificité, mais dans l'optique de pouvoir diminuer son effet voire l'annuler. Parce qu'elle isole thermiquement le liquide de son support, elle pose énormément de problèmes, notamment dans le refroidissement des machines. Les centrales nucléaires et le domaine de la métallurgie sont particulièrement affectés.

Le but de notre projet fut motivé par l'apparition d'un article scientifique en 2013 « oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow » [7]. Philippe Brunet et cinq autres chercheurs font un intéressant travail de recherche qui nous servira dans le cadre de notre étude. Ils découvrirent qu'en mettant une goutte d'eau sur un matériel poreux laissant passer l'air, la goutte se mettait à osciller à partir d'un seuil critique de flux d'air et prendre ce que nous appellerons par la suite des modes d'oscillations.



Expérience « oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow » de P. Brunet

Nous nous sommes intéressés pendant toute la durée de notre semestre à l'étude des gouttes de Leidenfrost portées à très haute température. Nous avons observé que pour une température comprise entre 350°C et 600°C la goutte se mettait à osciller puis redevenait stable pour un rayon seuil.

Puis, nous nous sommes posés la question de savoir si il y avait un lien entre ce rayon seuil et la température et s'il nous était possible de retrouver des résultats similaires à ceux de l'article « oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow ».

Par une approche théorique simplifiée nous expliquerons dans un premier temps la nature du phénomène de caléfaction. Ensuite concernant l'expérience nous décrirons le montage que nous avons utilisé, le protocole permettant d'effectuer nos mesures et nos diverses observations. Puis nous présenterons les mesures obtenues, et enfin nous résumerons notre travail en comparant nos résultats à ceux de l'article réalisé par Philippe Brunet en 2013.

II. Modélisation des gouttes de Leidenfrost

Le modèle théorique décrivant une goutte de Leidenfrost est bien connu. Nous allons voir quelques équations de l'effet Leidenfrost. Néanmoins, à ce jour, certains phénomènes restent encore incompris et font l'objet de nombreux travaux de recherche [8]. C'est notamment le cas des modes d'oscillations sur lesquelles nous avons travaillé dans le cadre de notre projet.

Nous nous intéressons aux gouttes de taille inférieure à la longueur capillaire R_c car elles sont idéalement de forme sphérique.

Tout d'abord, nous déterminerons la valeur de R_c .

La goutte est soumise à son propre poids d'où une énergie potentielle :

$$E_p = m \cdot g \cdot z = \rho_l \cdot g \cdot R^4$$

et son énergie de surface, due à la tension superficielle est $E_s = \gamma \cdot R^2$.

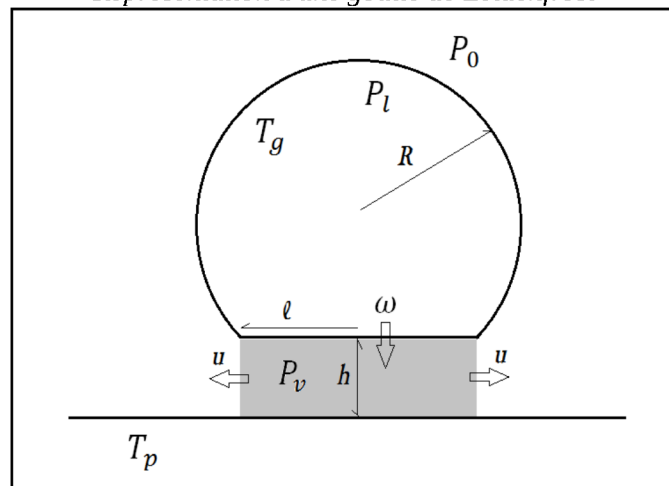
Dans le cas limite où $R = R_c$: $E_p = E_s$

Nous obtenons :

$$R_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_l \cdot g}}$$

Dans le cas de l'eau distillée à 100°C : $R_c = 2,7$ mm.

Représentation d'une goutte de Leidenfrost



P_0 : pression atmosphérique

T_g : température de la goutte

R : rayon de la goutte

w : champ de vitesse perpendiculaire

ρ_l : masse volumique de l'eau liquide

h : hauteur entre la goutte et la plaque

λ : conductivité thermique de la vapeur d'eau

P_l : pressions à l'intérieur de la goutte

T_p : température de la plaque chauffante

l : rayon du méplat

u : champ de vitesse parallèle

ρ_v : masse volumique de la vapeur d'eau

η : viscosité de la vapeur d'eau

L : chaleur latente de l'évaporation de l'eau

Plusieurs caractéristiques de la goutte sont importantes. Voici les principales équations utilisées dans la réalisation de notre projet.

- Pour calculer la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur, la loi de Laplace [9] nous dit que:

$$P_l = P_0 + \frac{2\gamma}{R} \rightarrow \Delta P = \frac{2\gamma}{R} \quad (1)$$

- Au niveau du méplat, le rayon de courbure est infinie, donc :

$$P_v = P_l \quad (2)$$

- Le théorème fondamental de la dynamique avec les principales forces exercées sur la goutte :

- Le poids de la goutte : $\vec{P} = -m \cdot g$
- La force de surpression dû au flux de vapeur [10] : $\vec{F} = \Delta P \cdot \pi \cdot l^2 = \frac{2\gamma}{R} \cdot \pi \cdot l^2$

$$m \cdot g = \Delta P \cdot \pi \cdot l^2 \rightarrow l \propto \frac{R^2}{R_c} \quad (3)$$

- L'expression du bilan d'énergie à l'interface liquide-vapeur :

La goutte reçoit l'énergie sous forme de chaleur de la plaque chauffante qui va engendrer son évaporation. Le transfert de chaleur se réalise principalement au niveau du méplat. On peut exprimer le bilan d'énergie à l'interface sur le méplat couplée à la loi de Fourier [11] :

$$\frac{\lambda \cdot \Delta T}{h} = \rho_v \cdot w \cdot L \rightarrow w = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\rho_v \cdot L \cdot h} \quad (4)$$

- Avec la relation de conservation de la masse, en supposant que la vapeur d'eau est incompressible, nous obtenons :

$$w \cdot l^2 = u \cdot l \cdot h \rightarrow \frac{w}{h} = \frac{u}{l} \quad (5)$$

- L'écoulement de Poiseuille [12][14] de la vapeur d'eau sous la goutte :

$$u = \frac{\Delta P \cdot h^2}{\eta \cdot l} \quad (6)$$

- L'épaisseur du flux de vapeur h, en combinant les équations (3), (4), (5), (6) :

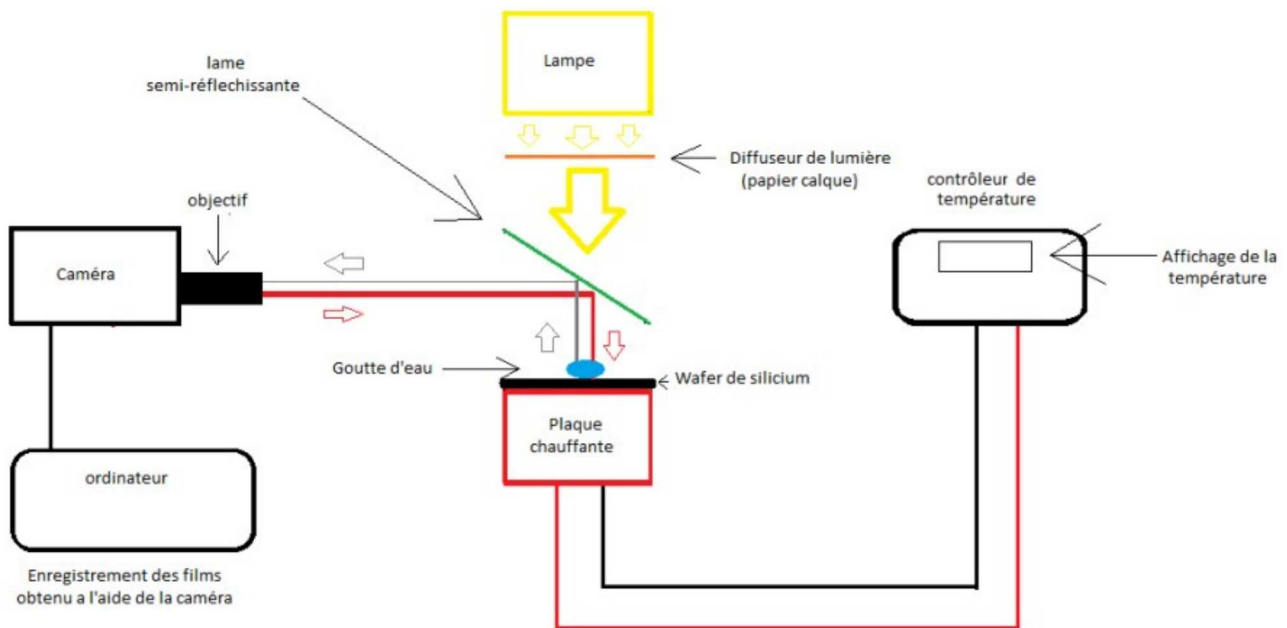
$$h^4 = \frac{\lambda \cdot \Delta T \cdot \eta \cdot R^5}{\rho \cdot L \cdot \gamma \cdot R_c^2}$$

$$h \propto R^{\frac{5}{4}} \cdot \Delta T^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

III. Expérience

I. Montage expérimental

La réalisation de gouttes de Leidenfrost nécessite un petit dispositif. Nous réalisons le montage schématisé ci-dessous, tout au long de nos expériences pour faire nos mesures.



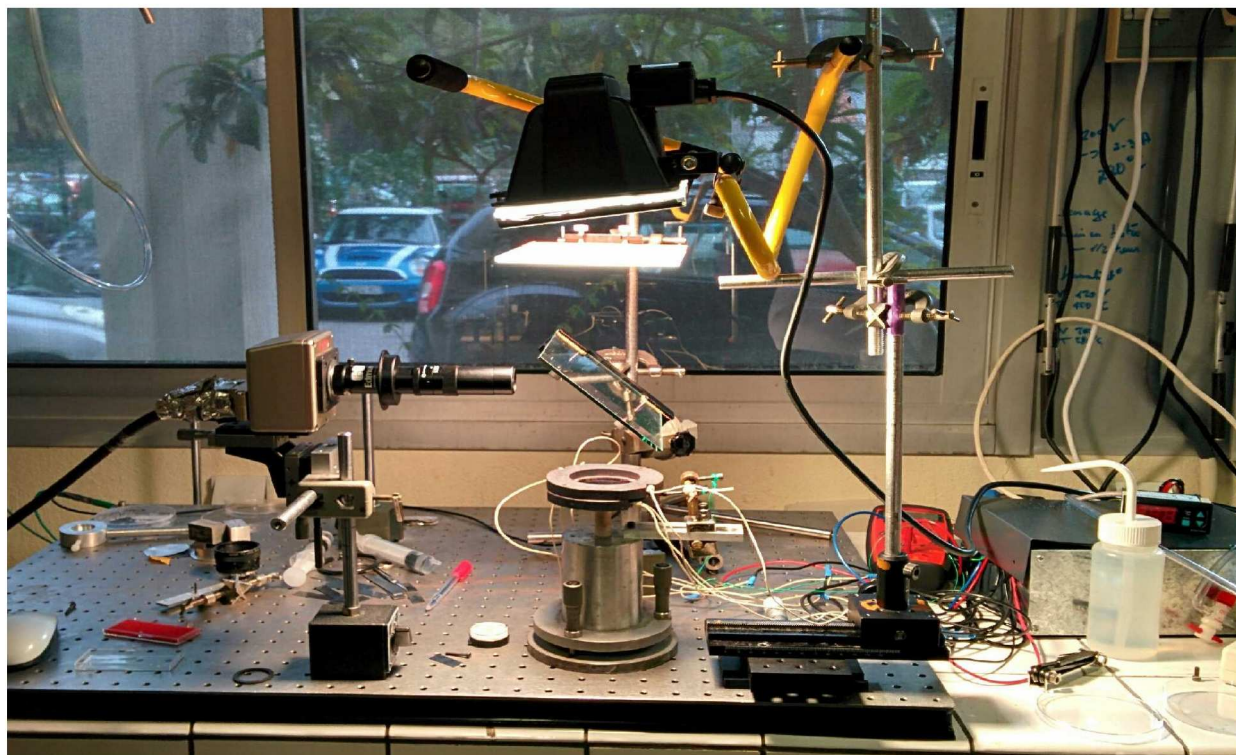
Le dispositif requiert le matériel suivant :

- ✕ Une lampe suffisamment puissante et un diffuseur pour éviter la concentration de la lumière en un point. Une simple feuille de calque suffit à la diffusion de la lumière.
- ✕ Une caméra reliée à un ordinateur pour l'acquisition des images. En fonction des expériences, nous utiliserons une caméra lente d'une cadence de 24 images par seconde ou une caméra rapide, jusqu'à 2000 images par seconde.
- ✕ Une lame semi-réfléchissante en verre pour refléter 25 % de la lumière dans l'objectif de la caméra.
- ✕ Une plaque chauffante de cuivre jusqu'à 600°C. L'horizontalité de la plaque est ajustée parfaitement grâce à ses vis. Elle est reliée à la terre dans un souci de sécurité pour empêcher les accumulations de charges électriques.
- ✕ Une plaque de silicium assemblée sur la plaque chauffante à la température de celle-ci grâce à la bonne conductivité thermique du silicium. L'utilisation d'un wafer de silicium permet de renvoyer la lumière pour filmer la goutte. C'est aussi une surface lisse, idéale pour la réalisation de gouttes de Leidenfrost.
- ✕ Un contrôleur de température qui permet de réguler la température. Le régulateur coupe l'alimentation de la plaque chauffante lorsqu'elle dépasse le seuil fixé et la relance en-dessous du seuil. Cela permet de maintenir une température quasi-constante avec une variation de 3 à 5°C.

II. Protocole expérimental

Pour des gouttes de Leidenfrost, plusieurs mesures peuvent être intéressantes : durée de vie de la goutte, taux d'évaporation, hauteur de la goutte par rapport à la plaque, etc...

Dans le cadre de notre projet, nous nous intéresserons plus particulièrement à la taille minimale des gouttes pour qu'elles oscillent en fonction de la température.

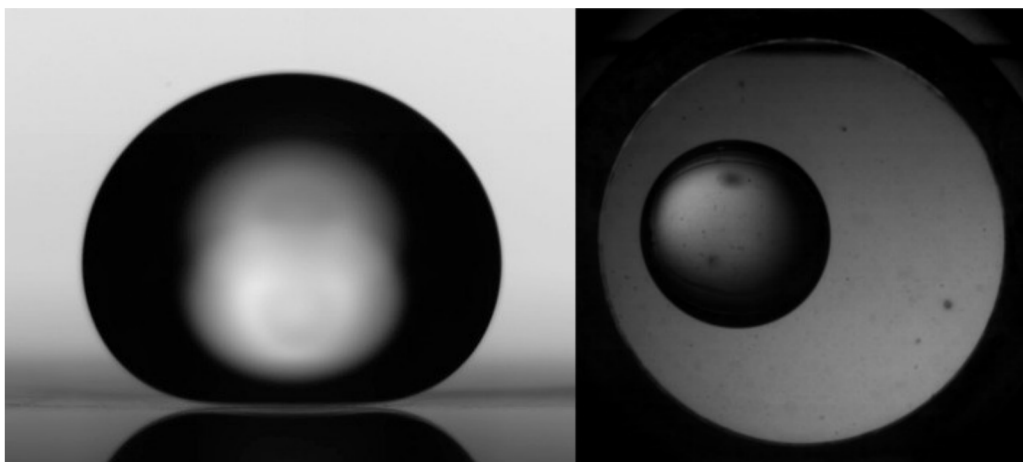


- ✓ Avant d'effectuer toutes les manipulations, la plaque de silicium doit être nettoyée et dépourvue de toutes poussières. Nous devons aussi vérifier que la plaque chauffante est bien reliée à la terre.
- ✓ Une fois le dispositif en place, nous pouvons allumer la lumière et la caméra et ajuster la distance focale de l'objectif ainsi que le diaphragme pour obtenir une image nette sur la plaque.
- ✓ Puis nous devons réaliser une première image avec une mire graduée afin de connaître l'échelle des images.
- ✓ Ensuite, la température de la plaque chauffante est réglée avec le contrôleur de température, le wafer de silicium monte progressivement à température.
- ✓ Enfin, une goutte d'eau distillée de taille moyenne (environ 2cm) est déposée sur la plaque de silicium à l'aide d'une seringue.
- ✓ L'acquisition des images de la caméra se fait avec les logiciels Photron FastCam Viewer et Pixelink Capture OEM.
- ✓ Le traitement des données de la goutte de Leidenfrost se fait avec le logiciel ImageJ.

Des mesures sont réalisées des dizaines de fois pour des températures comprises entre 350°C et 600°C. Lors de son évaporation progressive, la goutte d'eau passe par des phases d'oscillation. Nous mesurons la taille de la goutte à la limite entre oscillation et stabilité.

III. Observations expérimentales

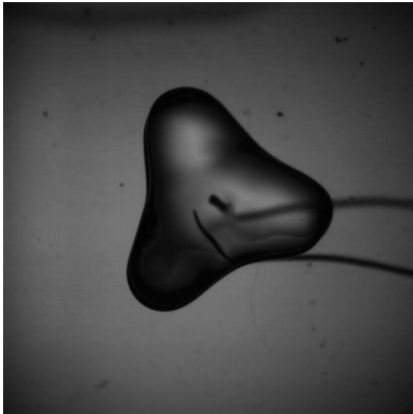
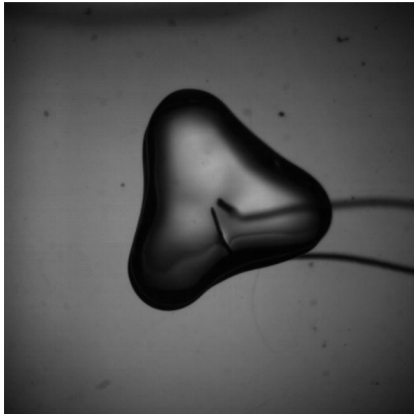
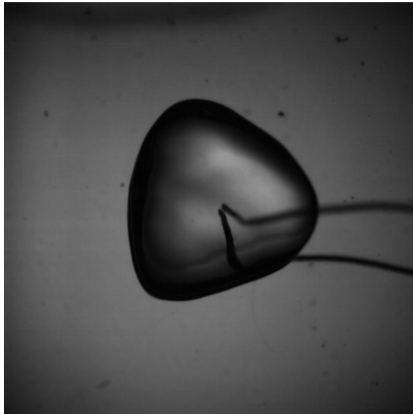
Les gouttes de Leidenfrost apparaissent pour une température d'environ 160°C . Elle peuvent avoir une taille jusqu'à 1,8 cm, au delà, des cheminées se forment. L'étude des cheminées n'est pas abordée dans ce rapport, mais elle le sera sur le site. Comme elles sont sur un flux de vapeur, les gouttes sont extrêmement mobiles.

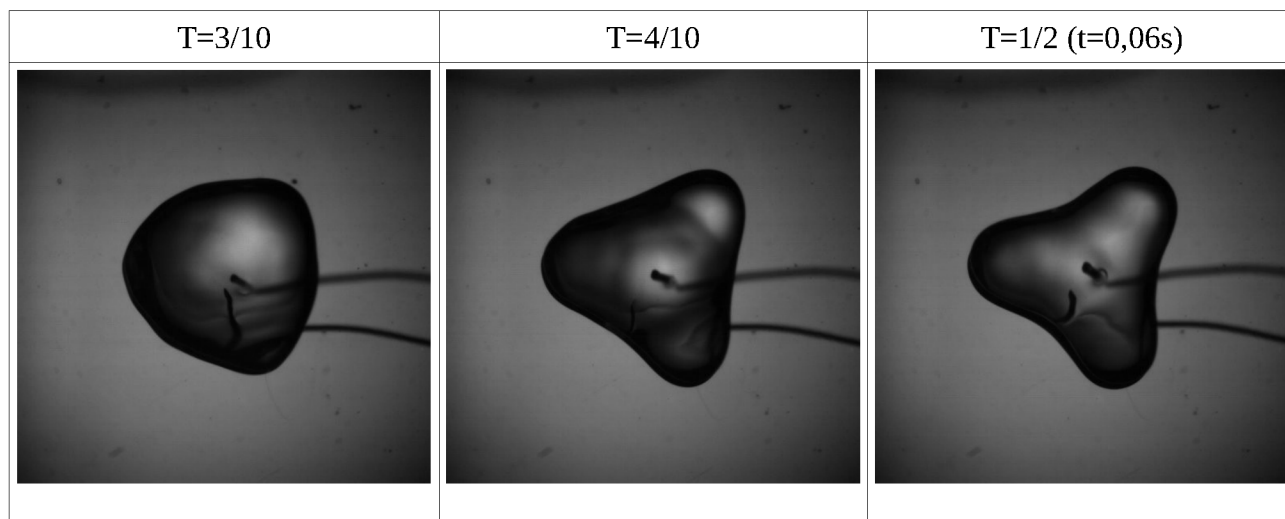


Goutte de Leidenfrost

À plus haute température (à partir de 350°C environ) et au delà d'un rayon minimale (de 5mm environ) les gouttes se mettent à osciller très rapidement. Avec une caméra rapide de 1000 images par seconde, nous pouvons les filmer au ralenti et mesurer la fréquence.

Évolution d'une goutte d'eau à 550°C pour une oscillation de mode 3 sur 1/2 période :

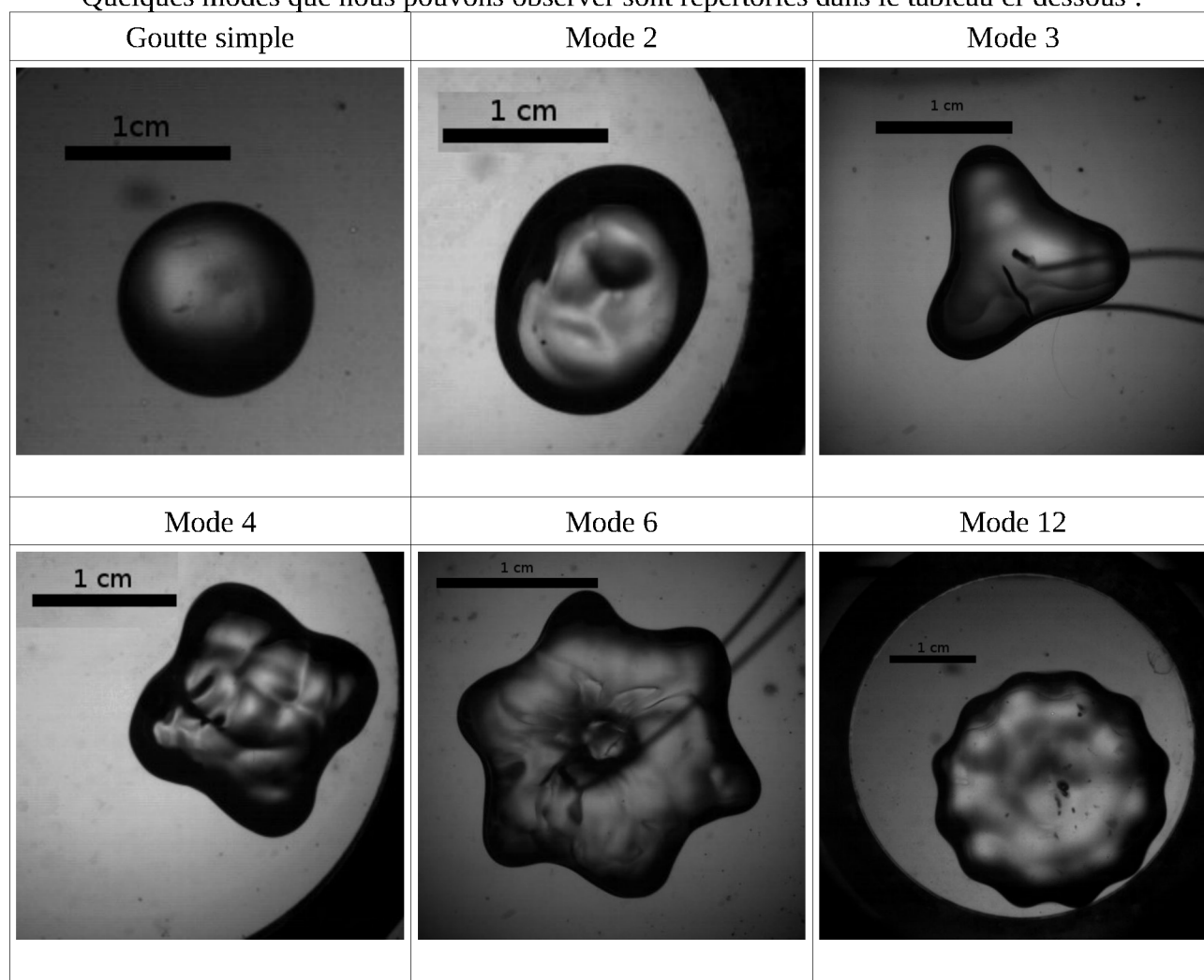
$T=0$ ($t=0\text{s}$)	$T=1/10$	$T=2/10$
		



La fréquence de la goutte varie proportionnellement au rayon à la puissance $-3/2$ [13].

De plus, en fonction du rayon de la goutte et de manière qui semble aléatoire nous pouvons constater plusieurs sortes d'oscillations. Nous appelons « mode » la caractéristique d'oscillation.

Quelques modes que nous pouvons observer sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :



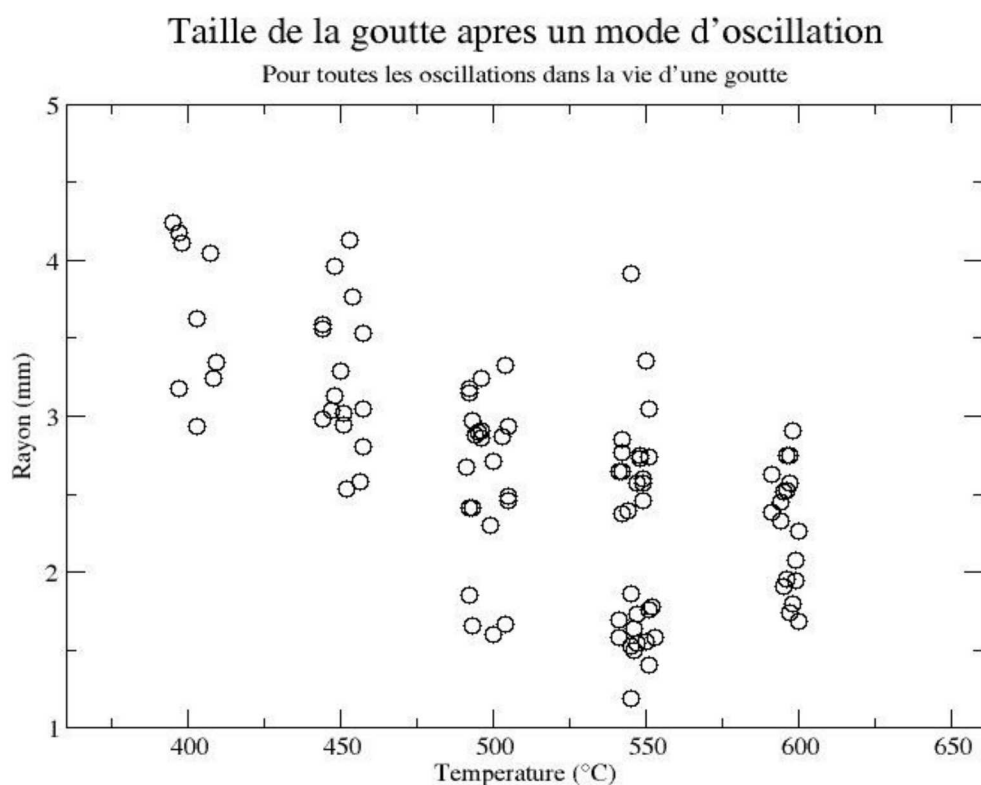
Les modes se distinguent par des figures d'oscillations différentes en fonction de leurs nombres de branches. Nous n'avons jamais observé de mode supérieur à 12. Les modes qui reviennent les plus fréquemment sont les modes avec un petit nombre de branches. Lorsque la goutte est petite, le mode possède moins de branche.

Pendant l'évaporation d'une goutte, nous pouvons parfois observer plusieurs modes d'oscillations. En effet, quelquefois, les gouttes se mettent à osciller, puis arrêtent après une courte période (de l'ordre de la seconde) puis reprennent un mode. Entre deux modes successifs, la goutte peut sembler parfois très stable. Nous avons également observé que la goutte prenait généralement un mode 2 avant d'acquies une stabilité définitive.

IV. Résultats expérimentaux

Dans un premier temps : Nous avons effectué un grand nombre de mesures du rayon pour lesquelles la goutte devenait stable. Ainsi pour 5 températures comprises entre 400°C et 600°C, nous avons traité une dizaine de mesures.

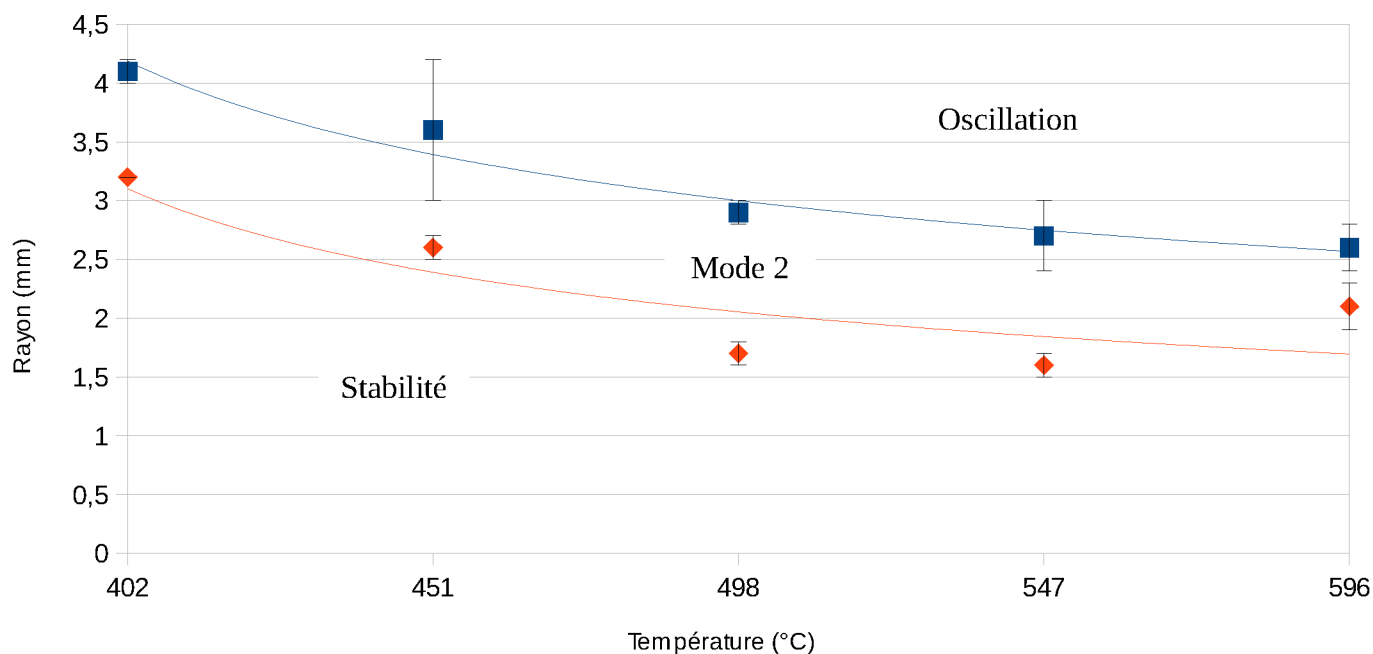
Ces mesures sont reportées dans le graphe ci dessous :



En s'appuyant sur ces mesures, nous séparons les deux phases de stabilité. Nous calculons la moyenne des rayons de la goutte respectifs. Ainsi, nous obtenons alors deux courbes distinctes de la taille du rayon après un mode dans le graphe ci dessous.

Taille d'une goutte d'eau après un mode

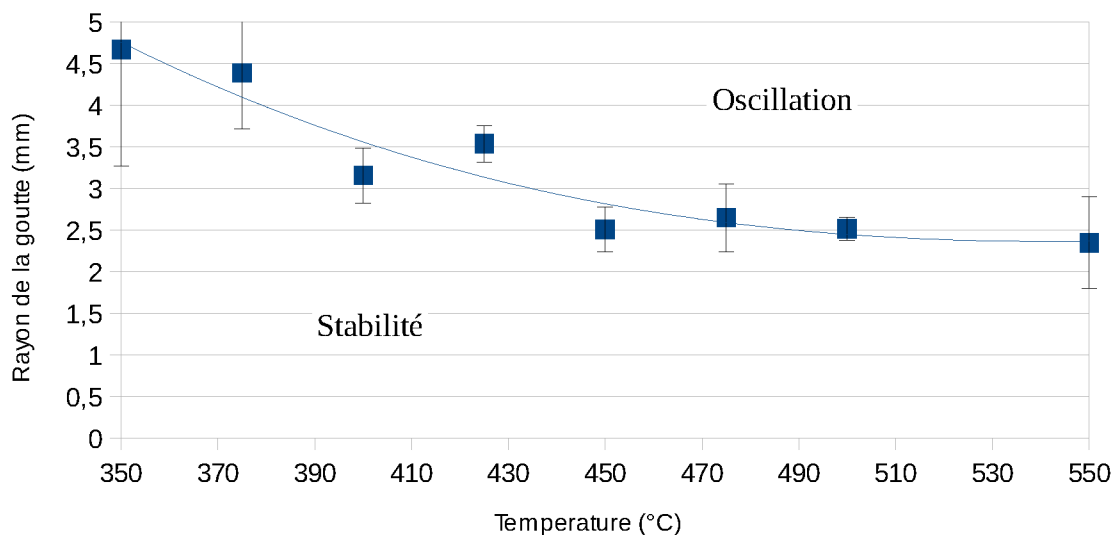
Pour une goutte qui prend au moins 2 fois un mode



Dans un second temps : Nous nous intéressons plus particulièrement au rayon de la goutte d'eau juste après sa dernière oscillation.

Ainsi, nous réalisons une série de mesures pour des gouttes comprises entre 350°C et 550°C. Dix mesures sont réalisées pour chaque température et la moyenne est reportée dans la graphique ci-dessous :

Limite de stabilité d'une goutte d'eau en fonction de la température



V. Interprétation des résultats

Dans cette partie, nous nous intéresserons plus particulièrement à la dernière limite de stabilité de la goutte de Leidenfrost en fonction de la température et du rayon de la goutte. Nous comparerons nos résultats à ceux de l'article « oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow ».

À partir des mesures du graphique précédent, nous pouvons exprimer le rayon de la goutte en fonction de la vitesse de la vapeur w . En effet, nous avons vu dans la partie théorique (équation 4)

que w est liée à la température par la formule : $w = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{\rho_v \cdot L \cdot h}$.

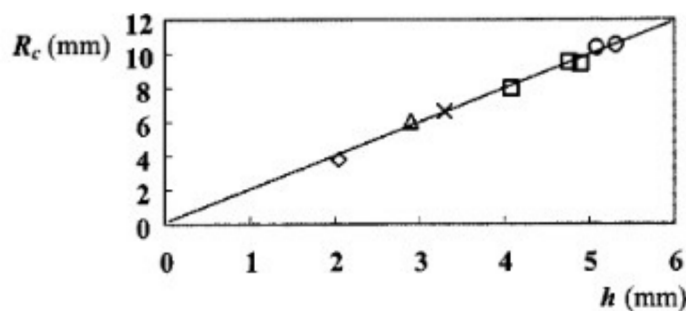
$$\lambda = 0,032 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$\rho_v = 0,81 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$L = 2250 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\Delta T = T^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$$

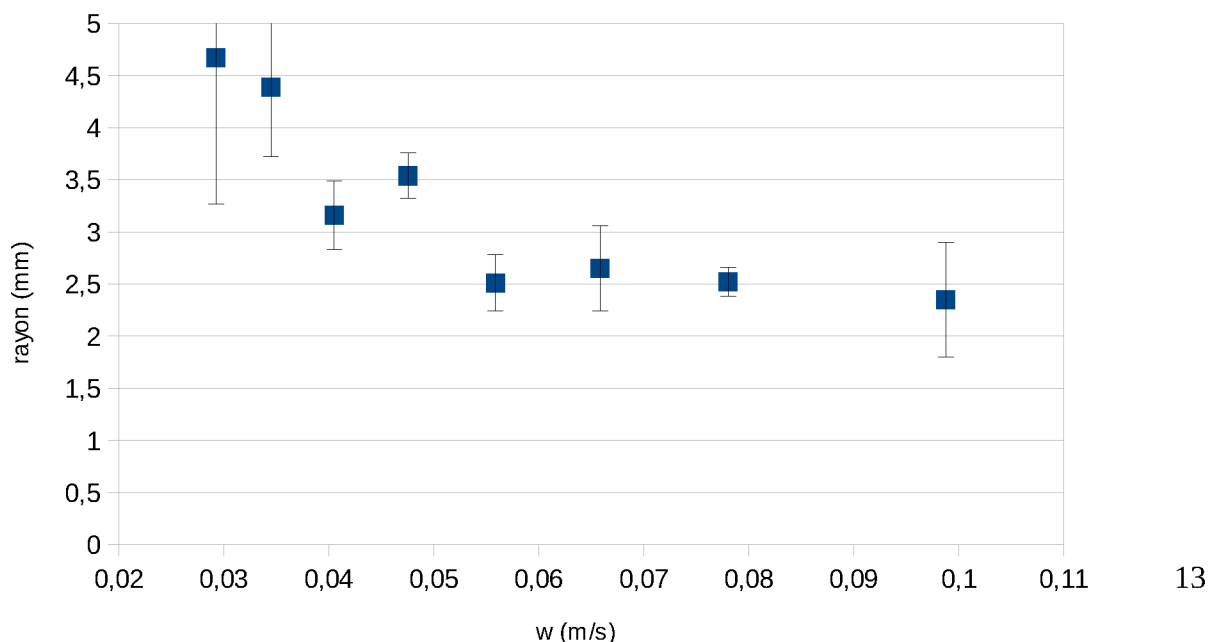
L'épaisseur h du flux de vapeur dépend du rayon de la goutte. Il est donné par le graphique ci-dessous :

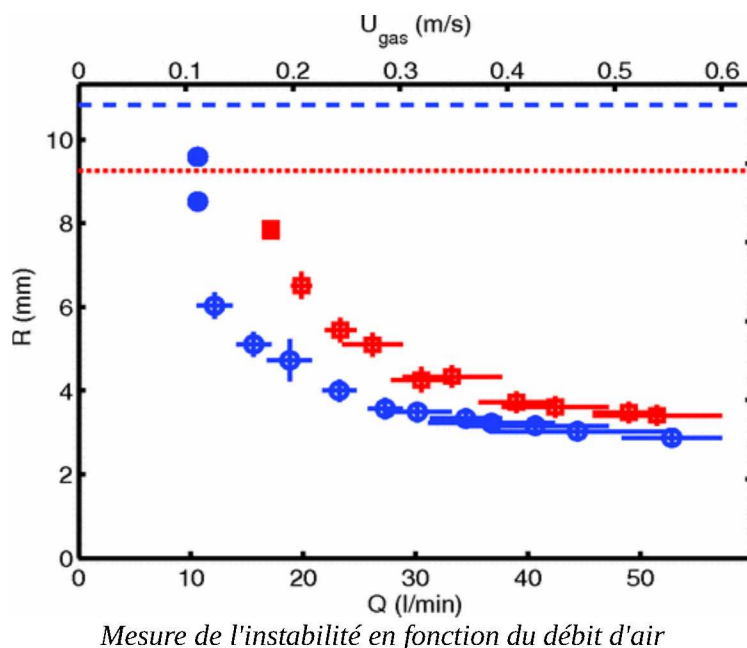


Mesures expérimentales d'après l'article Leidenfrost drops de Biance et Clanet [14]

Ainsi nous obtenons le rayon en fonction de la vitesse du flux de vapeur :

Limite de stabilité d'une goutte d'eau en fonction de la vitesse d'évaporation





Le graphique ci-dessous montre la limite de stabilité pour la taille d'une goutte en lévitation sur un flux d'air obtenu dans l'article « oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow » [7]. L'axe du haut donne la vitesse du gaz. Celui-ci est estimé en divisant le flux total par la surface du matériel poreux.

L'allure du graphique est comparable à celle que nous avons obtenue. Le même phénomène apparaît pour des rayons similaires. Cependant, la vitesse du flux dans les travaux de l'article de recherche est plus importante que celle que nous obtenons d'un facteur 10. Cette différence peut s'expliquer par de nombreux paramètres comme la température de la goutte d'eau qui implique notamment une longueur capillaire de l'eau différente, la forme du dispositif expérimentale, les incertitudes sur les mesures, etc. Avec ces deux expériences différentes, nous retrouvons tout de même une similitude dans le phénomène.

IV. Conclusion, perspective

Lors de ce stage, nous avons étudié expérimentalement un comportement atypique des gouttes de Leidenfrost. À haute température, les gouttes d'eau prennent des modes d'oscillations, sans perturbation extérieure. En effet, il apparaît que les gouttes de Leidenfrost oscillent d'une manière caractéristique en fonction de la température et du rayon de la goutte. Plus le rayon de la goutte est grand, plus la goutte peut prendre un mode avec un grand nombre de branches. Au dessous d'un rayon limite, la goutte reste stable.

Nous avons eu la chance de pouvoir rapprocher ces observations de travaux en cours. Comme dans l'article de Wilco Bouwhuis, Koen G. Winkels, Ivo R. Peters, Philippe Brunet, Devaraj van der Meer et Jacco H. Snoeijernous [7], nous avons mis en évidence qu'un seuil critique de vapeur

doit être atteint afin de faire rentrer la goutte en oscillation.

Un intérêt fort de ce stage a été de mieux nous permettre de comprendre le monde de la recherche.

Dans un prochain projet, il nous semblerait intéressant d'essayer de tracer le diagramme de phase de goutte d'eau à haute température afin de mettre en évidence la taille critique de la goutte de Leidenfrost pour les différents modes d'oscillations.

Enfin, une autre partie de l'étude a été réalisée sur les gouttes d'eau au delà d'un rayon de 9mm environs, puisqu'elles présentent une autre caractéristique atypique.

V. Bibliographie

1. Site de l'équipe fluide complexe du LPMC de Nice : <http://lpmc.unice.fr/spip.php?rubrique82>
2. G. Kirstetter, C. Raufaste, et F. Celestini. *Jet impact on a soap film* (2012)
3. X. Noblin. Plantes, gouttes, jets, grains: Quelques problèmes aux interfaces liquides ou élastiques. (2011)
4. X. Noblin, R Kofman et F. Celestini. *Ratchetlike motion of a shaken drop* (2009)
5. J. Leidenfrost. *Da Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* . (1756)
6. G. Lagubeau, M. Le Merrer, C Clanet et D. Quéré. *Leidenfrost on a racket* (2011)
7. Wilco Bouwhuis, Koen G. Winkels, Ivo R. Peters, Philippe Brunet, Devaraj van der Meer, and Jacco H. Snoeijer. *Oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow* (2013)
8. F. Celestini et G. Kirstetter. *Effect of an electric field on a Leidenfrost droplet* (2012)
9. D. Quéré. *Loi du mouillage et de l'imprégnation* (2003)
10. R. Denis. Modélisation et simulation de l'effet Leidenfrost dans les micro-gouttes.
11. Wikipedia, conduction thermique
12. G. Dupeux. Propulsion et friction d'objets non mouillants (2013)
13. F. Celestini, T. Frisch, A. Cohen, C. Raufaste, L. Duchemin, Y. Pomeau. Two dimensional Leidenfrost Droplets in a Hele Shaw Cell (2013)
14. A. L. Biance, C. Clanet, D. Quéré, *Leidenfrost drops* (2003)