



Etude de l'effet Leidenfrost
par Berguet Sébastien,
Soriano Sylvain et
Gamel Benoit

Influence de la pression sur la dynamique d'évaporation d'une goutte de Leidenfrost

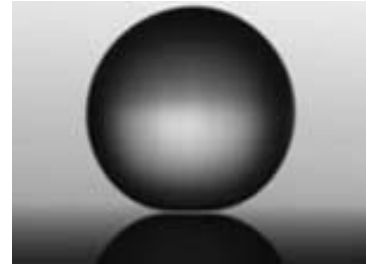
L3 Physique Université Nice Valrose

Sommaire

1 - Introduction	2
2 - Approche Théorique de l'effet Leidenfrost	4
2.1 Approche simplifiée.....	4
2.2 Approche exacte.....	6
3 - Expérience	7
3.1 Montage expérimental	7
3.2 Protocole expérimental	8
4 - Les différents résultats obtenus dans différentes conditions	9
4.1 Evolution du rayon de la goutte en fonction du temps ($R = f(t)$).....	9
4.2 Taux d'évaporation de la goutte.	11
4.2.1 Dépendance de J avec R.....	11
4.2.2 Dépendance de J avec P.....	12
5 - Conclusion	13
6 - Remerciements	13
7 - Bibliographie	14

1 - Introduction

Lorsqu'une goutte est posée sur une plaque dont la température est très élevée par rapport à la température d'ébullition du liquide, on observe un phénomène assez inattendu : au lieu de bouillir violemment et de se vaporiser, la goutte reste étonnamment calme, prend une forme très arrondie et devient ultra-mobile. Ces différentes observations sont la conséquence de la formation d'un film de vapeur entre la goutte et le solide. Ce film a pour conséquence première d'isoler thermiquement la goutte de son support, ce qui explique pourquoi elle ne disparaît pas en une fraction de seconde, elle peut rester ainsi pendant un temps de l'ordre de la minute. Cet effet est appelé caléfaction ou encore effet Leidenfrost.



On appelle souvent la caléfaction le « phénomène de Leidenfrost », du nom du médecin allemand Johann G. Leidenfrost qui y consacra une partie de ses travaux dans le courant du XVIIIème siècle. [1]

Les ingénieurs se sont depuis intéressés à ce phénomène qui isole thermiquement le liquide du solide ce qui ralentit le refroidissement des machines et peut causer des dommages considérables. Cet effet peut se produire notamment dans les centrales nucléaires ou les moteurs de voiture. [2][3]

Après plus de 200 ans, des chercheurs continuent à s'intéresser à ce phénomène. Par exemple en 2006 un groupe de chercheurs Hollandais a montré que si l'on posait des gouttes sur une surface horizontale, chaude et striée comme s'il s'agissait du toit d'une usine, elles se mettaient à avancer toutes seules, propulsées par leur propre vapeur. [4]



Figure 1: Expérience de Heiner Linke

Nous avons effectué notre stage au Laboratoire de Physique de la Matière Condensée au sein de l'équipe Fluides et Matériaux Complexes, cette équipe s'intéresse notamment à la mobilité des gouttes sur des substrats super hydrophobes, à la dynamique de jet et au phénomène de caléfaction. [5][6]

Notre stage a porté en l'étude de l'influence de la pression sur la dynamique d'évaporation d'une goutte de Leidenfrost. Nous présenterons dans un premier temps un résumé de la théorie décrivant ce phénomène. Nous décrirons dans un deuxième temps notre dispositif expérimental. Nous présenterons finalement nos résultats qui seront confrontés à la théorie.

On regardera si l'effet de caléfaction perdure à des pressions inférieures à la pression atmosphérique. Comme on le sait la température d'ébullition de l'eau diminue avec la pression (figure a). Ainsi on devrait pouvoir obtenir une goutte en caléfaction dont la température pourra être contrôlée via la valeur de la pression. Par exemple, à $P=25\text{mBar}$ on aura une caléfaction à température ambiante. A terme, cette étude pourrait avoir des débouchés dans la micro-fluidique afin de contrôler la mobilité des gouttes à température ambiante.

Diagramme d'ébullition de l'eau en fonction de la pression

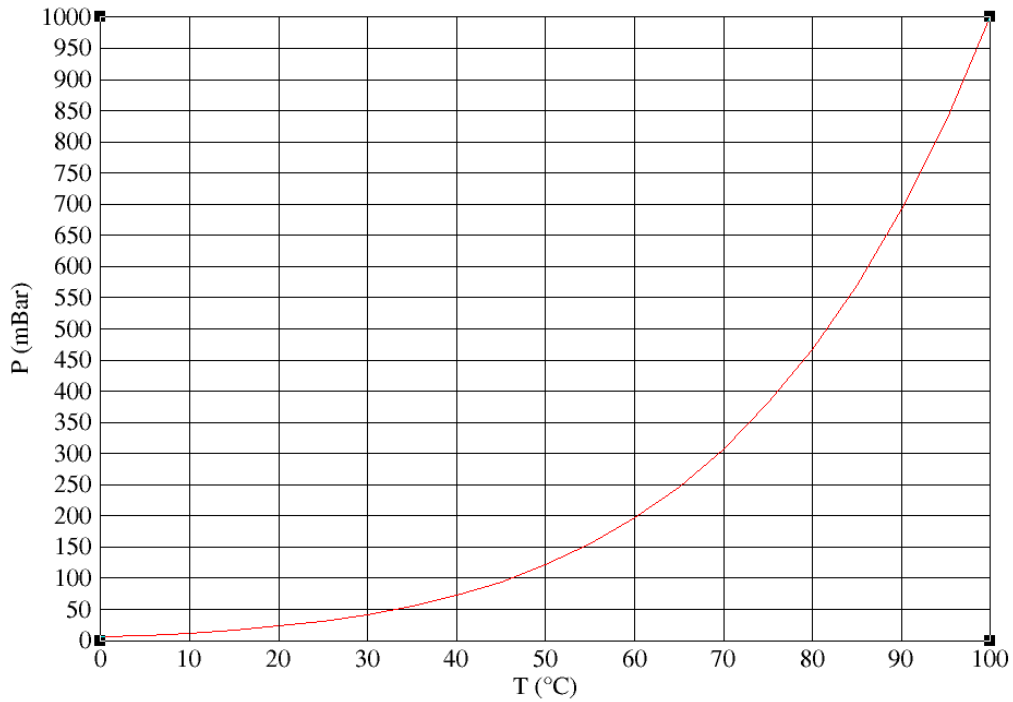


Figure 2 : Diagramme de phase de l'eau. La ligne rouge indique la ligne de coexistence entre l'eau liquide et sa vapeur.

2 - Approche Théorique de l'effet Leidenfrost

2.1 Approche simplifiée

On va décrire dans cette partie la théorie décrivant les caractéristiques d'une goutte de Leidenfrost en faisant une hypothèse sur sa forme. Cette approche simplifiée permet de trouver des relations approchées pour décrire simplement le phénomène. Elle a été introduite en 1999 et est toujours utilisée aujourd'hui. [7]

On se place dans le cas où le rayon de la goutte est inférieur à la longueur capillaire. Cette longueur est définie comme celle où les effets de tension superficielle compensent ceux de la gravité. En égalant l'énergie de surface d'une goutte, $E_s = \gamma * R^2$, à son énergie de pesanteur $E_p = m * g * h$, on trouve :

$$R_c = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho_l g}} \quad (1)$$

Avec γ la tension superficielle, ρ_l la masse volumique du liquide et g l'accélération de la gravité.

On représente sur la figure 1, la goutte de Leidenfrost. On suppose que la goutte est une sphère tronquée de rayon R . La goutte est à la température d'ébullition de son liquide, T_g . Le méplat a une dimension l . On suppose que l'évaporation se fait au niveau du méplat. On note ω la vitesse perpendiculaire d'évaporation et u la vitesse caractéristique de l'écoulement de vapeur.

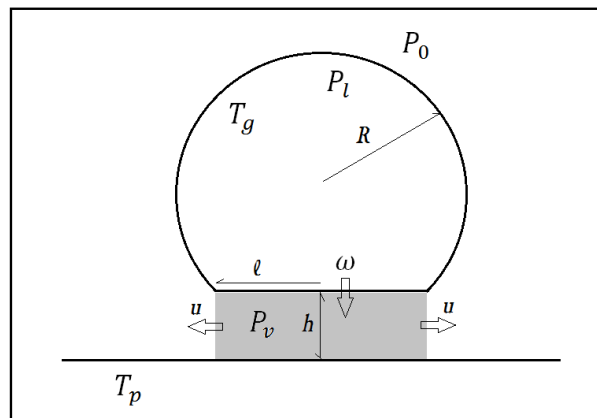


Figure 3 : schéma d'une goutte de Leidenfrost.

Avec T_g la température de la goutte, P_l sa pression, ρ_l sa masse volumique, h l'épaisseur de vapeur, P_v sa pression, ρ_v sa masse volumique, u le champ de vitesse parallèle, ω le champ de vitesse perpendiculaire, l le rayon du méplat, T_p la température de la plaque, P_0 La pression atmosphérique

Calcul de la longueur l :

D'après l'équation de Laplace [8] la pression du liquide est :

$$P_l = P_0 + \frac{\gamma}{R} \quad (2)$$

Dans ce modèle, l'interface entre le film de vapeur et la goutte étant supposé plane, il y a donc égalité entre la pression dans la goutte et la pression dans le film de vapeur.

La pression dans le film de vapeur de la goutte est supporté par la pression du film de vapeur qui s'applique sur la surface l^2 , $m * g = P_v * l^2$.

$$l = \frac{R^2}{R_c} \quad (3)$$

Bilan d'énergie :

On a égalité entre la chaleur apportée par la plaque et la quantité d'énergie perdue par évaporation. En utilisant la Loi de Fourier, on trouve :

$$\frac{\lambda * \Delta T}{h} = \rho_v * \omega * L \quad (4)$$

Avec λ la conductivité thermique, $\Delta T = T_p - T_g$ le gradient de température entre la plaque et la goutte et L la chaleur latente.

Conservation de la masse :

La divergence du champ de vitesse est nulle on a donc :

$$\frac{\omega}{h} = \frac{u}{l} \quad (5)$$

On suppose un écoulement de Poiseuille [8] de la vapeur sous la goutte :

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

Avec η la viscosité de la vapeur sous la goutte et $\Delta P = P_v - P_0 = \frac{\gamma}{R}$ le gradient de pression.

En combinant les équations (1), (3), (4), (5), (6) et l'équation des gaz parfaits on trouve l'expression de h :

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

Dans cette équation on ne fait apparaitre que les dépendances en R, P et ΔT .

On définit le taux d'évaporation massique comme :

$$J = \rho_l * \frac{\partial R^3}{\partial t}$$

Celui-ci est égal à l'évaporation en dessous de la goutte :

$$J = \rho_v * \omega * l^2$$

En combinant avec les précédentes équations on obtient :

$$J \propto P^{\frac{1}{4}} * R^{\frac{11}{4}} * \Delta T^{\frac{3}{4}} \quad (8)$$

2.2 Approche exacte

Un travail récent [7] a établi de manière précise les caractéristiques de la goutte de Leidenfrost en prenant en compte la forme réelle de l'interface goutte-vapeur.

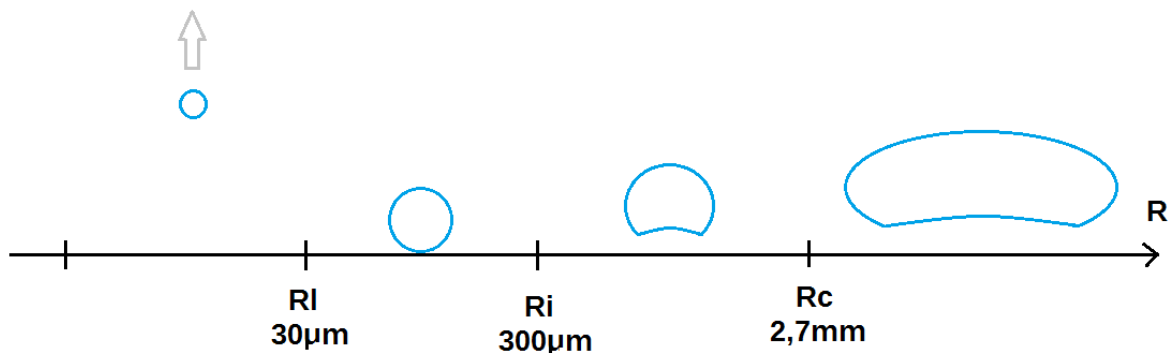


Figure 4 : Evolution de la forme d'une goutte de Leidenfrost en fonction de son rayon

- Lorsque $R > R_c$, la goutte a une forme de flaque de hauteur maximum $2 \cdot R_c$.
- Lorsque $R_i < R < R_c$, la goutte a une forme sphérique tronquée à sa base avec une interface courbée.
- Lorsque $R_i < R < R_i$, la goutte est totalement sphérique.
- Lorsque $R < R_i$, la goutte décolle dû à l'augmentation de la force du film de vapeur qui est plus importante que le poids de la goutte.

Cette théorie détaillée nous donne une nouvelle expression pour le l'évaporation massique de la goutte qui est proportionnelle à :

$$J \propto R^{12/5} * P^{1/5} * \Delta T^{4/5} \quad (9)$$

3 – Expérience

3.1 Montage expérimental

Comme on l'a dit plus haut, dans notre expérience nous utilisons une chambre à vide de manière à créer des gouttes de Leidenfrost à des pressions inférieures à la pression atmosphérique.

Voici le schéma de notre manipulation :

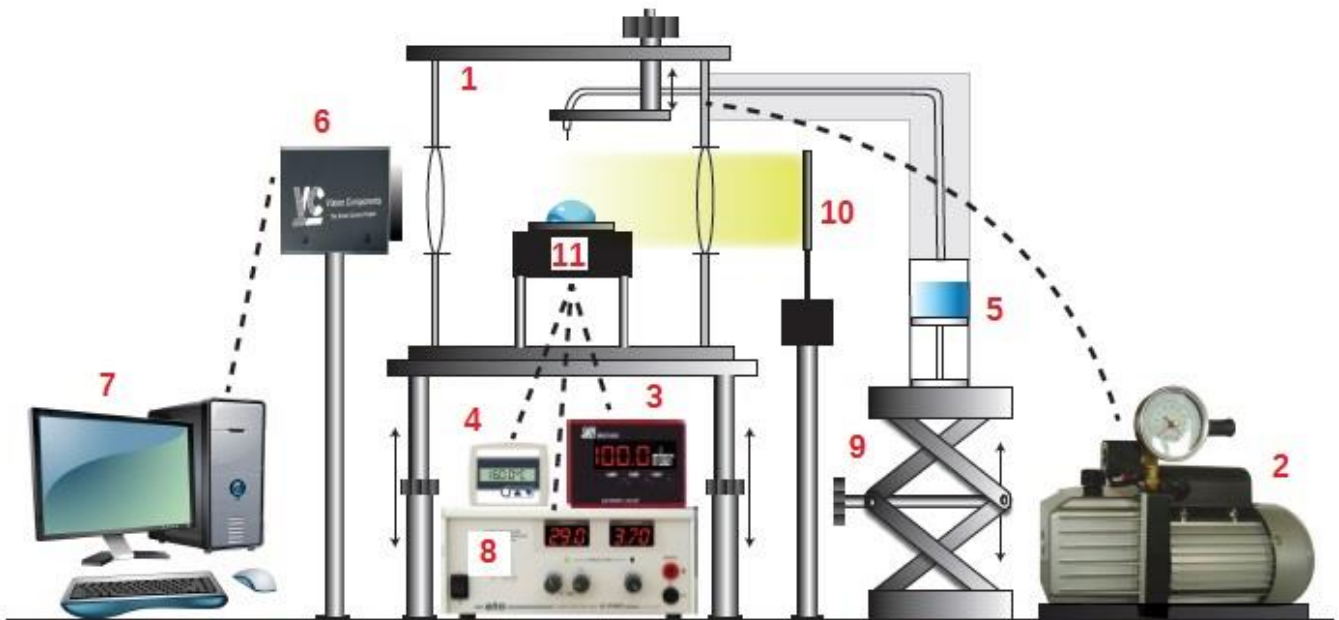


Figure 5 : Schéma montage expérimental.

La chambre à vide (1) est reliée à une pompe à vide primaire (2) qui sert à abaisser la pression dans celle-ci. Le contrôle de la pression se fait grâce à un capteur de pression (3). A l'intérieur de la chambre à vide nous avons une plaque chauffante (11) dont on contrôle la température à l'aide d'une sonde PT100 (4). Elle est alimentée par un générateur de tension et de courant (8). Sur cette plaque est placé le substrat sur lequel est déposée la goutte par l'intermédiaire d'une seringue (5). Cette seringue est disposée sur un élévateur (9) afin de contrôler avec précision le dépôt de liquide. La pression à l'intérieur de celle-ci est la même qu'à l'intérieur de la chambre. Pour observer la goutte nous sommes muni d'une caméra (6) qui transmettra chaque seconde des clichés à un ordinateur (7). Afin de mieux observer l'évolution de la goutte nous avons placé derrière le dispositif un diffuseur de lumière (10).

Photo de notre expérience:



Figure 6 : Photo montage expérimental.

3.2 Protocole expérimental

Avant d'effectuer toutes les manipulations il faut veiller à ce que la cloche à vide (1) soit dépourvue de toute poussière ou autres corps étrangers afin de ne pas fausser les résultats. Après avoir nettoyé l'intérieur de la cloche à vide, on veille à ce que celle-ci soit parfaitement hermétique pour que la pression ne varie pas durant nos expériences.

On commence par fixer une pression voulue (2) en abaissant la pression de la cloche à l'aide de la pompe à vide (3). On fixe la température du capteur (4) afin que la différence entre la température d'ébullition de la goutte et la température de la plaque soit d'environ 120°C. On dépose alors la goutte sur le substrat à l'aide de la seringue (5). Pour notre expérience nous avons utilisé de l'eau ultra distillée et le substrat est un « wafer » de silicium.

Néanmoins, dans de basse pression ($\sim 200\text{mBar}$) la goutte que nous essayons de former est très instable et nous avons donc dû utiliser un capillaire (voir photo1) afin de l'immobiliser pour effectuer de bonnes mesures. Une fois que la goutte a atteint la taille voulue, on retire la seringue afin d'effectuer les prises d'images à l'aide de la caméra (6).



Figure 5 : Photo d'une goutte de Leidenfrost avec capillaire.

4 - Résultats expérimentaux

4.1 Evolution du rayon de la goutte en fonction du temps ($R = f(t)$)

Suite à nos expériences, nous avons obtenu une séquence d'images montrant l'évolution de la taille de la goutte en fonction du temps.

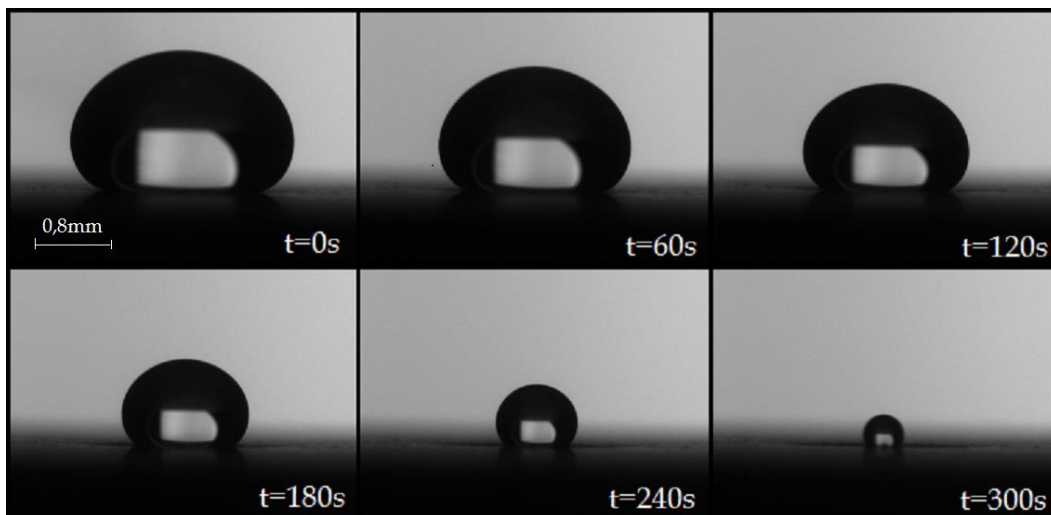


Figure 7 : Evolution de la taille d'une goutte en fonction du temps à 100mBar.

A l'aide d'un logiciel de traitement d'images (ImageJ), nous avons pu traiter les images afin de tracer la courbe de l'évolution du rayon en fonction du temps.

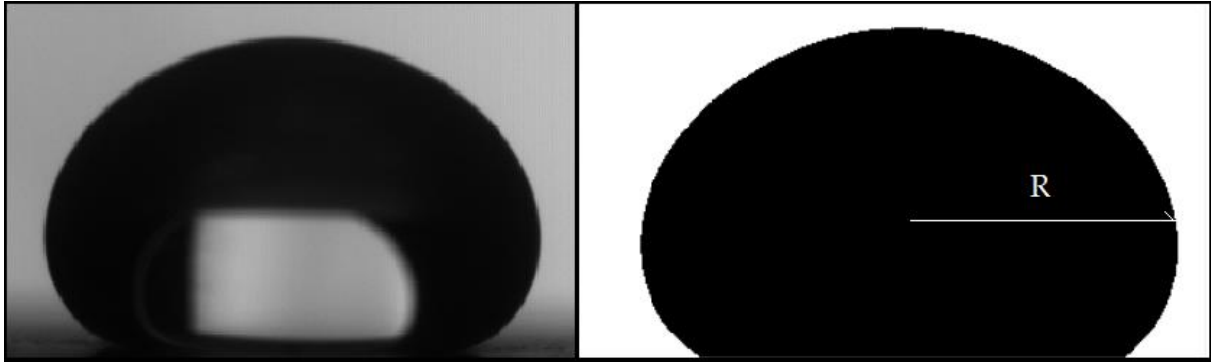


Figure 8 : Exemple de traitement d'image avec ImageJ.

Voici le graphique obtenu en traitant toutes les images lorsque l'on fixe P et ΔT :

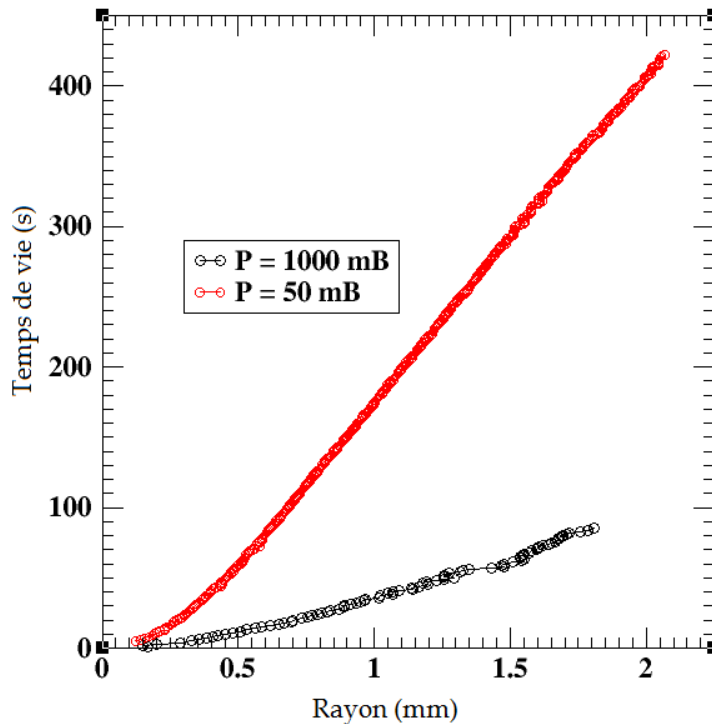


Figure 9 : Représentation du rayon de la goutte en fonction du temps à pression atmosphérique et à 50mBar.

N'ayant pas pu réaliser l'expérience à pression atmosphérique, nous avons utilisé les résultats de l'équipe d'enseignants chercheurs. On constate que le temps de vie d'une goutte à basse pression est considérablement augmenté par rapport à une goutte réalisée à pression atmosphérique.

4.2 Taux d'évaporation de la goutte

Dans une première partie nous allons étudier la dépendance par rapport au rayon de la goutte du taux d'évaporation. Dans une deuxième partie nous essaierons de vérifier la loi théorique prédisant une dépendance en $P^{1/5}$ du taux d'évaporation. Nous avons conçu un programme qui nous permet de calculer ce taux d'évaporation à partir de tous les résultats de $R(t)$ à P et ΔT constant (grâce à une régression linéaire) d'obtenir J en fonction de R .

4.2.1 Dépendance de J avec R

Grace au programme nous obtenons aisément le graphique du taux d'évaporation en fonction du rayon :

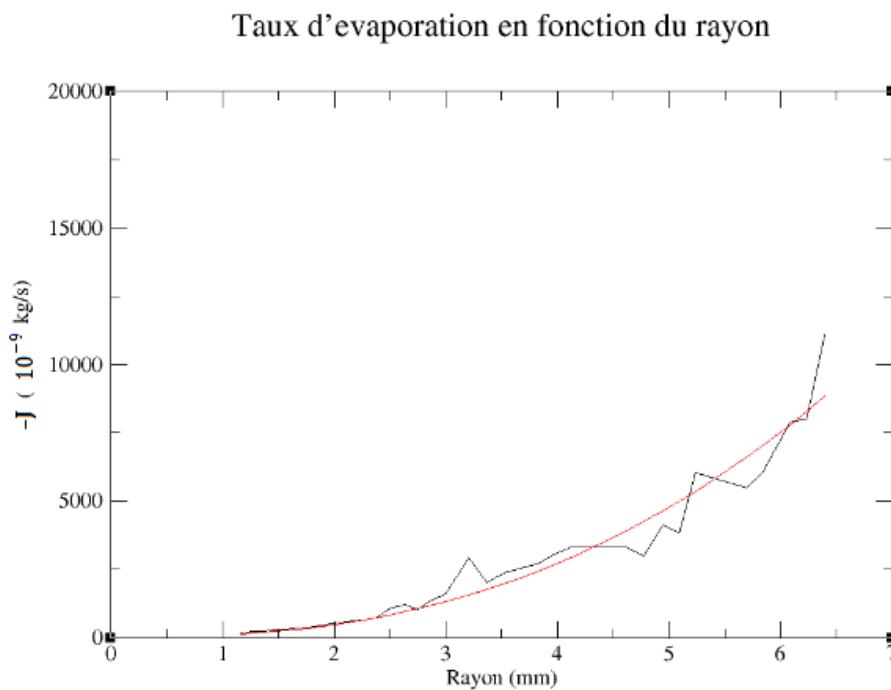


Figure 10 : Taux d'évaporation d'une goutte en fonction du rayon a $P=966\text{mBar}$

(Manipulation 6).

D'après la théorie détaillée, nous devons obtenir une variation du taux d'évaporation en fonction de R :

$$J \propto R^{12/5} = R^{2,4}$$

Nous utilisons le logiciel XmGrace pour obtenir une courbe nous donnant le meilleur accord entre les données expérimentales et une loi de puissance. L'exposant de la loi de puissance est le paramètre libre.

Les résultats expérimentaux nous donnent :

Manipulation	Pression (mBar)	Exposant de R
1	274	2,01
2	102	2,89
3	200	2,13
4	217	2,44
5	262	2,20
6	966	2,51

Nous obtenons donc un exposant de $2,36 (\pm 0,29)$.

Les résultats expérimentaux sont très proches de la valeur théorique vue plus haut qui est de 2,4.

4.2.2 Dépendance de J avec P

Pour montrer cette dépendance de J en fonction de P, nous avons utilisé nos précédentes valeurs de $J=f(R)$ pour différentes pressions. Nous avons fixé R à 2,16mm puis nous avons reporté les valeurs de J pour les différentes pressions dans le graphique de la figure 9 :

Taux d'évaporation en fonction de la pression

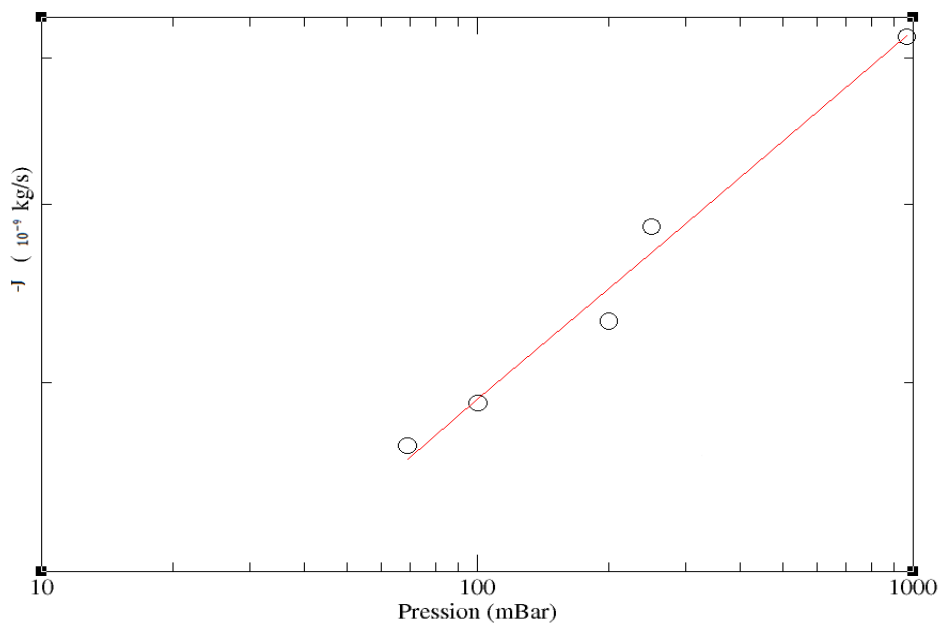


Figure 11 : Taux d'évaporation en fonction de la pression.

Comme précédemment en utilisant le logiciel XmGrace et en effectuant un ajustement de courbes non linéaire, on voit que la courbe de tendance a un exposant sur $P = 0,19$. Ce résultat est en accord avec la valeur théorique qui est de 0,2.

Dû à un manque de temps nous n'avons pas pu effectuer de mesure permettant de trouver l'exposant sur ΔT .

5 – Conclusion

Lors de ce stage, nous avons participé à la réalisation d'expériences sur une étude en cours au laboratoire. Nous avons fait évoluer le montage expérimental notamment en testant la nature du substrat et le dispositif permettant le maintien de la goutte.

Nous avons montré la possibilité d'obtenir une goutte de Leidenfrost à une pression inférieure à la pression atmosphérique et donc à une température qui peut être ramenée à la température ambiante. On a également observé que les gouttes formées à basse pression ont une durée de vie bien plus grande qu'à pression atmosphérique. Enfin, nos expériences sont en bon accord avec la théorie prédisant la dépendance, en le rayon de la goutte et en la pression, du taux d'évaporation.

L'allongement de la durée de vie de la goutte et sa température pouvant être ramenée à la température ambiante sont les principales caractéristiques de l'effet Leidenfrost à basse pression. Ces propriétés permettent d'envisager des applications dans le cadre de la micro-fluidique ou des réactions chimiques et/ou biologiques ont lieu dans une quantité réduite de liquide.

6 – Remerciement

Nous tenons à remercier M. Celestini qui nous a guidé lors de notre stage.

Nous remercions également tout le personnel du LPMC qui nous a aidé lors de notre stage.

7 - Bibliographie

[1] *De aqua communis nonnullis qualitatibus Tractatus*, écrit par Johan Gotllob Leidenfrost en 1956

[2] J. D. Bernardin and I. Mudawar, *J. Heat Transfer*, 1999, 121, 894.

[3] H. van Dam, *Rep. Prog. Phys.*, 1992, 55, 2025.

[4] *Self-propelled Leidenfrost droplets*

H Linke, BJ Alemán, LD Melling, MJ Taormina... - *Physical review ...*, 2006 - APS

[5] *Effect of an electric field on a Leidenfrost droplet*

F Celestini, G Kirstetter - *Soft Matter*, 2012 - pubs.rsc.org

[6] *Take off of small Leidenfrost droplets*

F Celestini, T Frisch, Y Pomeau - *Physical Review Letters*, 2012 - APS

[7] *Leidenfrost drops*

AL Biance, C Clanet, D Quéré - *Physics of Fluids*, 2003 - pof.aip.org

[8] *Hydrodynamique Physique*

E. Guiyon, J-P. Hulin, L. Petit EDP Sciences 2001.