

Rapport TIPE inter ENS
Clarisse Couturier – Candidat 25867

Filière PC - ENS de Cachan, Lyon et Paris - Session 2023
 Page de garde du rapport de TIPE

NOM : COUTURIER	Prénoms : Clarisse Marie Flavie
Classe : PC	Paulina
Lycée : Pasteur	Numéro de candidat 25867
Ville : Neuilly-sur-Seine	

Concours auxquels vous êtes admissible, dans la banque MP Inter-ENS (les indiquer par une croix) :

ENS Cachan	PC - Option Physique	<input checked="" type="checkbox"/>	PC - Option Chimie	<input type="checkbox"/>
ENS Lyon	PC	<input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/>
ENS Paris	PC - Option Physique	<input type="checkbox"/>	PC - Option Chimie	<input type="checkbox"/>

Matière dominante du TIPE (la sélectionner d'une croix inscrite dans la case correspondante) :

Physique	<input checked="" type="checkbox"/>	Chimie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
----------	-------------------------------------	--------	--------------------------	--------------------------

Titre du TIPE : L'effet Leidenfrost

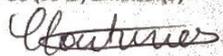
Nombre de pages (à indiquer dans les cases ci-dessous) :

Texte	22	Illustration	25	Bibliographie	4
-------	----	--------------	----	---------------	---

Attention, les illustrations doivent figurer dans le corps du texte et non en fin du document !

Résumé ou descriptif succinct du TIPE (6 lignes, maximum) :

Lorsqu'on pose une goutte sur une plaque très chaude, la gace inférieure de la goutte s'évapore instantanément et engendre un film de vapeur entre la goutte et la plaque. En tant qu'isolant thermique, ce film ralentit le refroidissement des parois des moteurs thermiques. J'ai donc cherché à évaluer les paramètres permettant de réduire cet effet.

A Neuilly-sur-Seine	Signature du professeur responsable de la classe préparatoire dans la discipline*	Cachet de l'établissement*
Le 07/06/2023		LYCÉE PASTEUR 21, Bd d'Inkermann, 21 92523 NEUILLY sur SEINE CEDEX N° 0920142 E - Tél. 01 46 24 15 01
Signature du (de la) candidat(e) 		

* La signature du professeur responsable et le tampon de l'établissement ne sont pas indispensables pour les candidats libres (hors CPGE).

Sujet : Effet Leidenfrost

Sommaire

- I. Introduction
- II. Etude du rayon de la goutte au cours du temps
 - I. Montage expérimental
 - II. Evolution du montage
 - III. Modélisation théorique
 - IV. Analyse des résultats et confrontation au modèle
- III. Influence de paramètres physiques sur le temps de vie de la goutte
 - I. Effet de la température de la plaque
 - II. Effet du volume initial de la goutte
 - III. Effet de la rugosité de la plaque
- IV. Etude du rôle de la tension superficielle via usage de tensioactifs
 - I. Observations et interprétation
 - II. Résultats expérimentaux
 - III. Analogie avec la loi de Young-Dupré pour interface liquide/solide
- V. Conclusion et ouverture
- VI. Annexes
 - I. Autre expérience
 - II. Démonstration de l'épaisseur du film de vapeur
 - III. Monte Carlo pour le calcul d'incertitudes
 - IV. Références

I. Introduction

L'effet Leidenfrost, du nom du médecin allemand l'ayant mis en évidence, consiste en une mise en caléfaction d'une goutte d'un liquide sur une plaque très chaude. A l'œil, on a l'impression que la goutte lévite sur la plaque. En réalité, un fin film de vapeur se crée instantanément lorsque la partie inférieure de la goutte touche la plaque et agit donc en temps qu'isolant thermique pour la goutte qui s'appuie dessus. En effet, la conductivité thermique de l'eau est environ 30 fois plus faible que celle de l'eau liquide. Cependant, ce phénomène dépend de la température de la plaque. Par exemple pour l'eau, ce n'est seulement à partir de 160°C [1] que ce phénomène a lieu. En dessous de cette température, sifflent au contact de la plaque et s'évaporent presque instantanément.

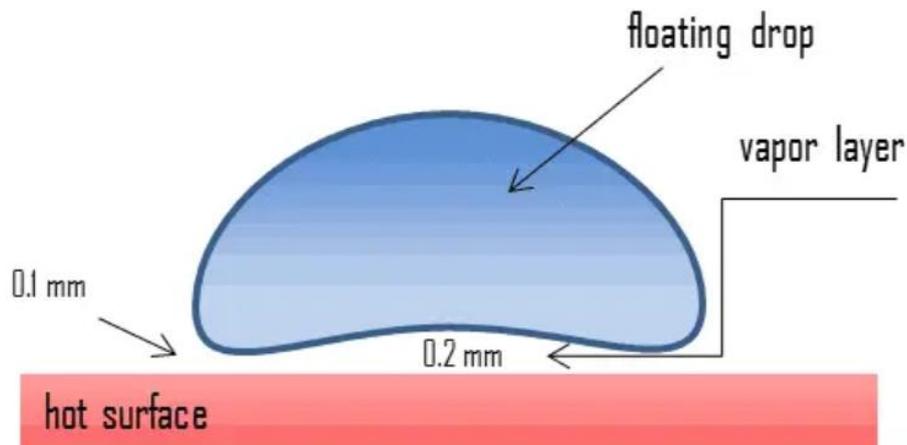


Figure 1 : Schéma illustratif [2]



Figure 2 : Goutte d'eau expérimentale à 220°C

La forme de la goutte décrit une compétition entre la tension superficielle, qui tend à minimiser l'aire de l'interface eau/air de la goutte, et la gravité, qui tend à aplatir la goutte. Ainsi, deux forces antagonistes s'exercent sur la goutte : en s'évaporant, le liquide nourrit le film de vapeur et le fait s'épaissir ; dans le même temps, il appuie sur ce film, qui s'échappe par les côtés et s'amincit. La comparaison du rayon de la goutte à la longueur capillaire du liquide utilisé permet d'évaluer le rapport des forces entre tension superficielle et poids.

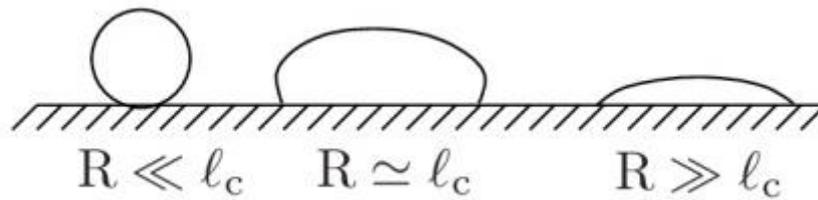


Figure 3 : Forme de la goutte en fonction du rapport de son rayon et de la longueur capillaire

L'objectif de mon TIPE est donc d'étudier ce phénomène afin de conclure comment il est possible de le réduire dans les moteurs thermiques des automobiles ainsi que dans les circuits de refroidissements des centrales nucléaires, alimentant nos villes en énergie. Car la couche de vapeur, isolant le liquide de refroidissement des parois à refroidir, ralentit donc leur refroidissement.

Je me suis donc penchée sur l'influence de la température de la plaque, de la rugosité de celle-ci, des conductivités des liquides utilisées et de la taille des gouttes afin de caractériser ce phénomène. J'ai ensuite étudié l'effet de tensioactifs sur l'effet Leidenfrost tandis que l'autre candidat de mon binôme a caractérisé l'effet d'un champ électrique sur une goutte en caléfaction. Plus précisément, j'ai observé la forme de la goutte selon ces paramètres, mesuré le temps de vie de la goutte et son rayon en fonction du temps. Ensuite, j'ai comparé mes résultats au modèle théorique de la goutte en forme de palet.

II. Etude du rayon de la goutte au cours du temps

II.1 Montage expérimental

- Caméra microscopique
- Micropipette (140 microlitres)
- Plaque chauffante
- Caméra thermique
- Logiciel Mesurim



Figure 4 : Micropipette



Figure 5 : Caméra thermique

Principe de fonctionnement de la caméra thermique :

Détermine température en fonction de longueur d'onde du rayonnement émis pour un corps noir via *la loi de Wien* :

$$\lambda_{max} T = 2,898. 10^{-3}$$

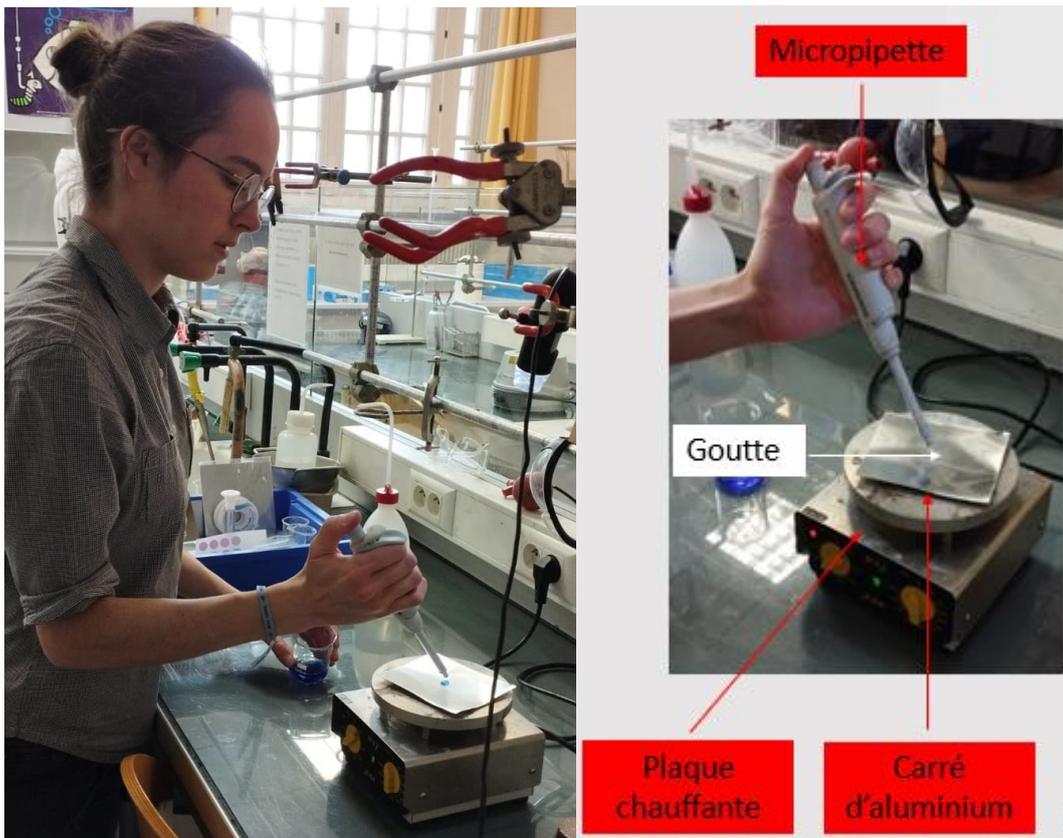


Figure 6 : Montage expérimental de la mesure du temps de vie

Explication de l'expérience :

Pour mesurer le temps de vie de la goutte, j'ai utilisé une micropipette de 20 microlitres afin d'avoir plus de précision sur le volume initial. Puis j'ai posé la goutte sur la plaque chaude et mesuré avec un chronomètre la durée de vie de la goutte jusqu'à sa disparition. J'ai effectué ces mesures en faisant varier les conditions de travail, expliqué en II.

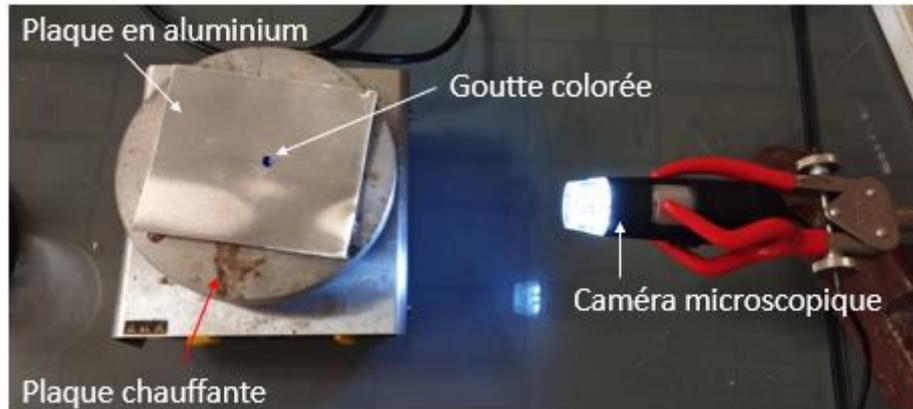


Figure 7 : Montage expérimental de la mesure du rayon de la goutte

Explication de l'expérience :

Avec une caméra microscopique, j'ai filmé la goutte de son dépôt sur la plaque jusqu'à sa disparition totale grâce au logiciel AMCAM. Ensuite, avec des captures d'écran de la goutte à des temps différents, j'ai mesuré le rayon de la goutte à ces instants via le logiciel Mesurim. J'ai pu calculer le nombre de pixels d'une extrémité à l'autre du diamètre de la goutte, avec une incertitude de mesure de 2 pixels de chaque côté, soit 4 pixels en tout. En effet, j'ai coloré ma goutte en bleu afin de pouvoir faire ces mesures avec plus de facilité mais il y a eu des incertitudes liées à la couleur plus ou moins bleu foncée aux extrémités de la photo de la goutte. Puis, en mesurant le nombre de pixels correspondant à 10 cm sur une règle, j'ai pu en déduire la taille réelle de la goutte.



Figure 8 : Traitement d'image sur Mesurim

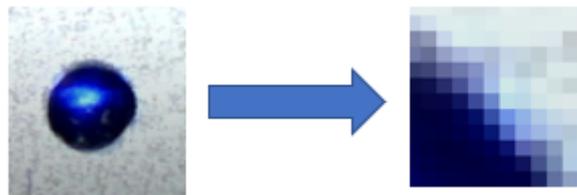


Figure 9 : Zoom sur le logiciel Mesurim

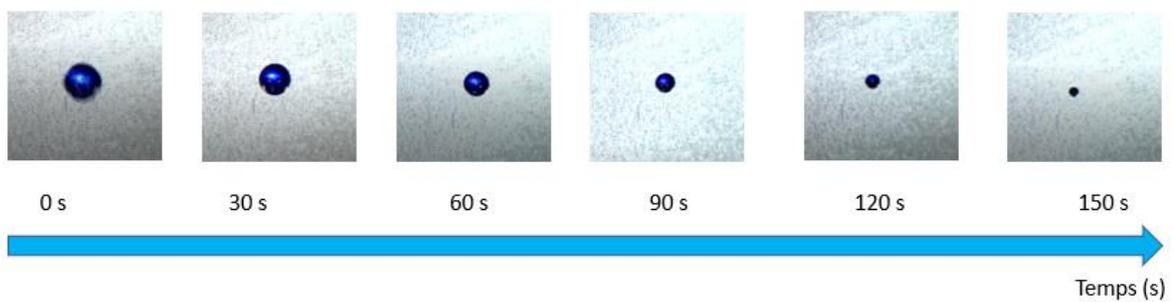


Figure 10 : Evolution du rayon au cours du temps

II.2 Evolution du montage

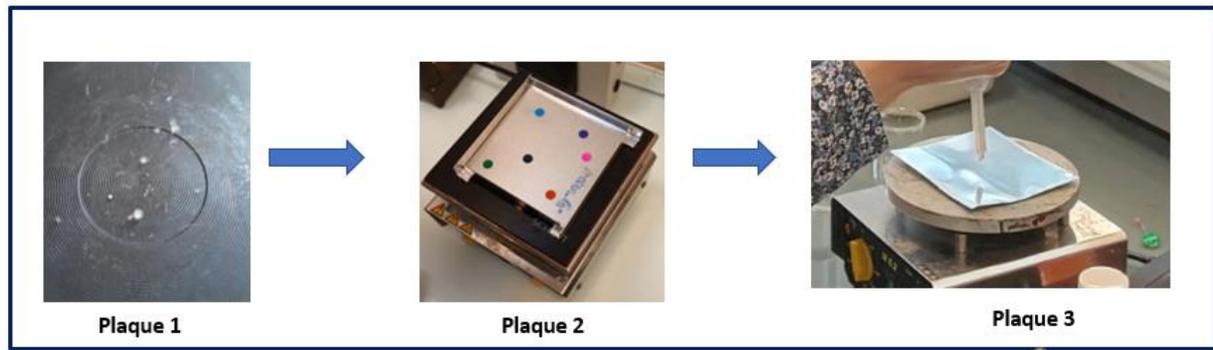


Figure 11 : Photographies des 3 plaques utilisées

J'ai dû modifier à plusieurs reprises la surface chauffée utilisée en raison des inhomogénéités et irrégularités suivantes :

Plaque 1 : température trop variable selon les endroits de la plaque, jusqu'à 20°C d'écart, ce qui fausse les résultats du temps de vie et du rayon en fonction de la température de la plaque.

Plaque 2 : j'ai donc changé de montage et ai remplacé la plaque chauffante 1 par un carré d'aluminium qui j'ai placé sur une plaque chauffante plus homogène en température. J'ai mis des bordures en aluminium autour de la plaque pour que la goutte reste bien sur la plaque. Avec la caméra thermique, j'ai pu vérifier que la température ne variait de pas plus de 5°C d'écart. La température n'était alors plus un problème, à l'incertitude près. Cependant, j'ai observé que lorsque la goutte touchait les bords et en particulier les coins, elle diminuait brusquement en taille. Ceci pourrait s'expliquer par un apport plus élevé de chaleur à la goutte qui est exposée non seulement par sa face inférieure à la plaque mais également via ses faces latérales, en contact avec les bords.

De plus, comme montré sur l'image de la plaque 2, j'ai dû positionner des gommettes autocollantes sur la plaque en aluminium afin de pouvoir correctement évaluer la température de celle-ci car ce matériel n'ayant pas mes propriétés de corps noir visiblement, étaient insensibles à la caméra thermique.

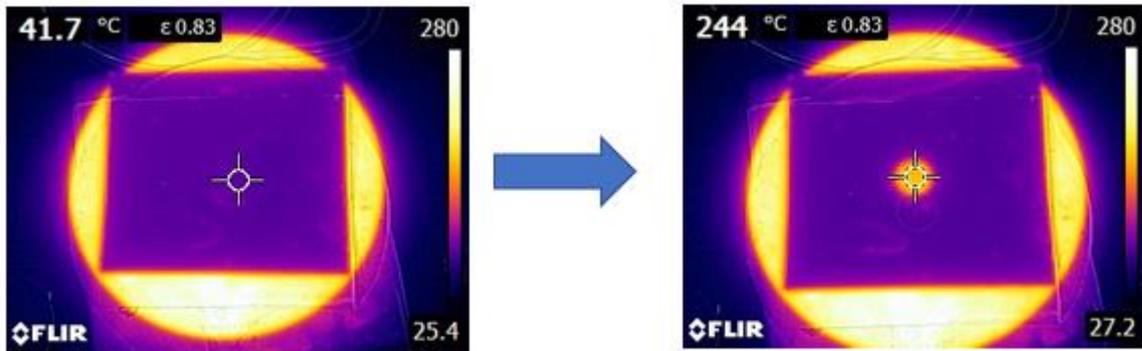


Figure 12 : Température affichée sur la caméra respectivement sans et avec gomme

Plaque 3 : enfin, j'ai décidé de légèrement courber la plaque afin de ne plus avoir les problèmes de bords, ni ceux d'inhomogénéité de température car la goutte se stabilisait au centre du creux de la plaque.

II.3 Modélisation théorique

Le modèle théorique repose sur les hypothèses suivantes :

- Eau dans la goutte est immobile
- Ecoulement homogène, stationnaire, incompressible
- Pas de transfert thermique de la face supérieure de la goutte avec l'extérieur
- e , T plaque et T goutte = homogènes avec e l'épaisseur du film de vapeur
- $e \ll h$ avec h la hauteur de la goutte
- $e \ll R$ avec R le rayon de la goutte
- Ecoulement radial

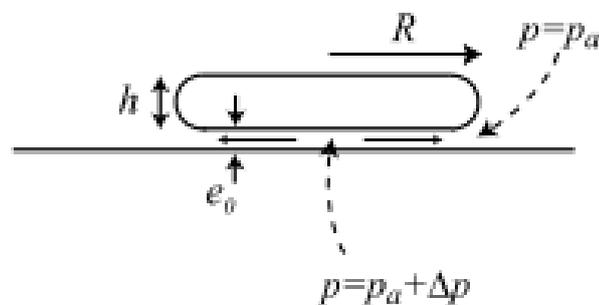


Figure 13 : Modèle théorique de la goutte [3]

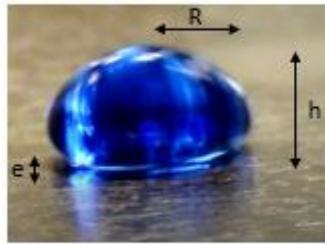


Figure 14 : Goutte expérimentale

Lois physiques utilisées pour établir les expressions de l'épaisseur du film de vapeur :

- Premier principe thermodynamique
- Equation de Navier Stokes
- Bilan de débit volumique
- Loi de statique des fluides

La démonstration complète est présentée en annexe.

$$e = R^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda \eta \Delta T}{\rho_l \rho_v g L l_c} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Épaisseur théorique du film de vapeur

$$\tau = 8R_0^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda \Delta T}{\rho_l L l_c} \right)^{-\frac{3}{4}} \times \left(\frac{g \rho_v}{\eta} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

Temps de vie théorique de la goutte

z

Avec :

η : viscosité (liquide)
 λ : conductivité thermique (vapeur)
 l_c : longueur capillaire

II.4 Analyse des résultats et confrontation au modèle

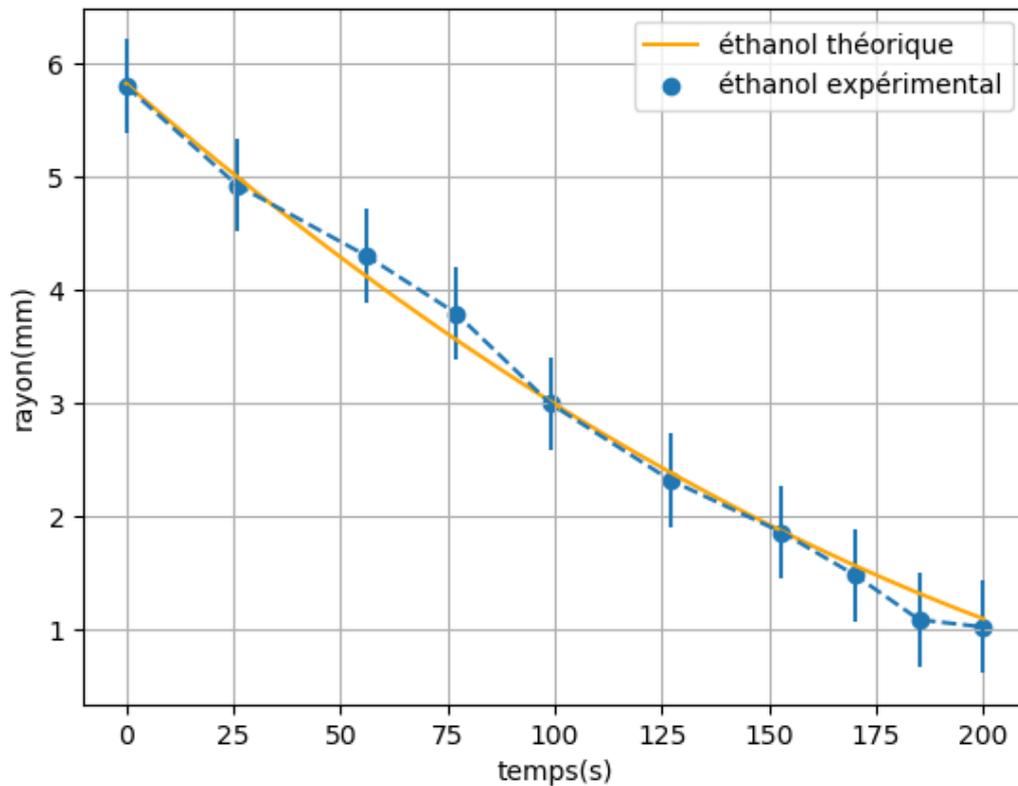


Figure 15 : Résultats expérimentaux du rayon de la goutte dans le temps

Incertitude sur rayon avec simulation Monte-Carlo :

- Incertitude sur le nombre de pixels lus sur Mesurim : 4 pixels
- Incertitude de lecture sur règle : 0,05 cm
- $U(R) = 0,238$ mm

Confrontation avec modèle théorique :

- On trace $\ln(\tau) = f(\ln(\Delta T))$
- On regarde si la pente vaut bien $-3/4$ car :

Temps de vie théorique :

$$\tau = 8R_0^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda \Delta T}{\rho_l L l_c} \right)^{-\frac{3}{4}} \times \left(\frac{g \rho_v}{\eta} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

ln

$$\ln(\tau) = -\frac{3}{4} \ln(\Delta T) + \ln\left(8R_0^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda}{\rho_l L l_c} \right)^{-\frac{3}{4}} \times \left(\frac{g \rho_v}{\eta} \right)^{-\frac{1}{4}}\right)$$

J'obtiens :

Régression linéaire : $y = -0,785 x + 8.09$

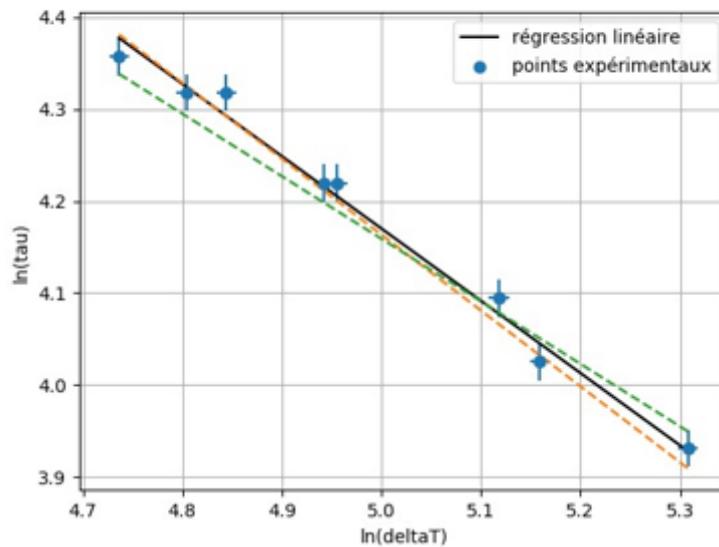


Figure 16 : Résultats expérimentaux passés au logarithme népérien

Calcul d'incertitudes : avec la méthode des pentes en prenant les 2 pentes extrêmes reliant les barres d'incertitudes de premier et du dernier point. Notre régression linéaire expérimentale a une pente comprise entre ces deux pentes donc le modèle est validé.

III. Influence de paramètres physiques sur le temps de vie de la goutte

III.1 Effet de la température de la plaque

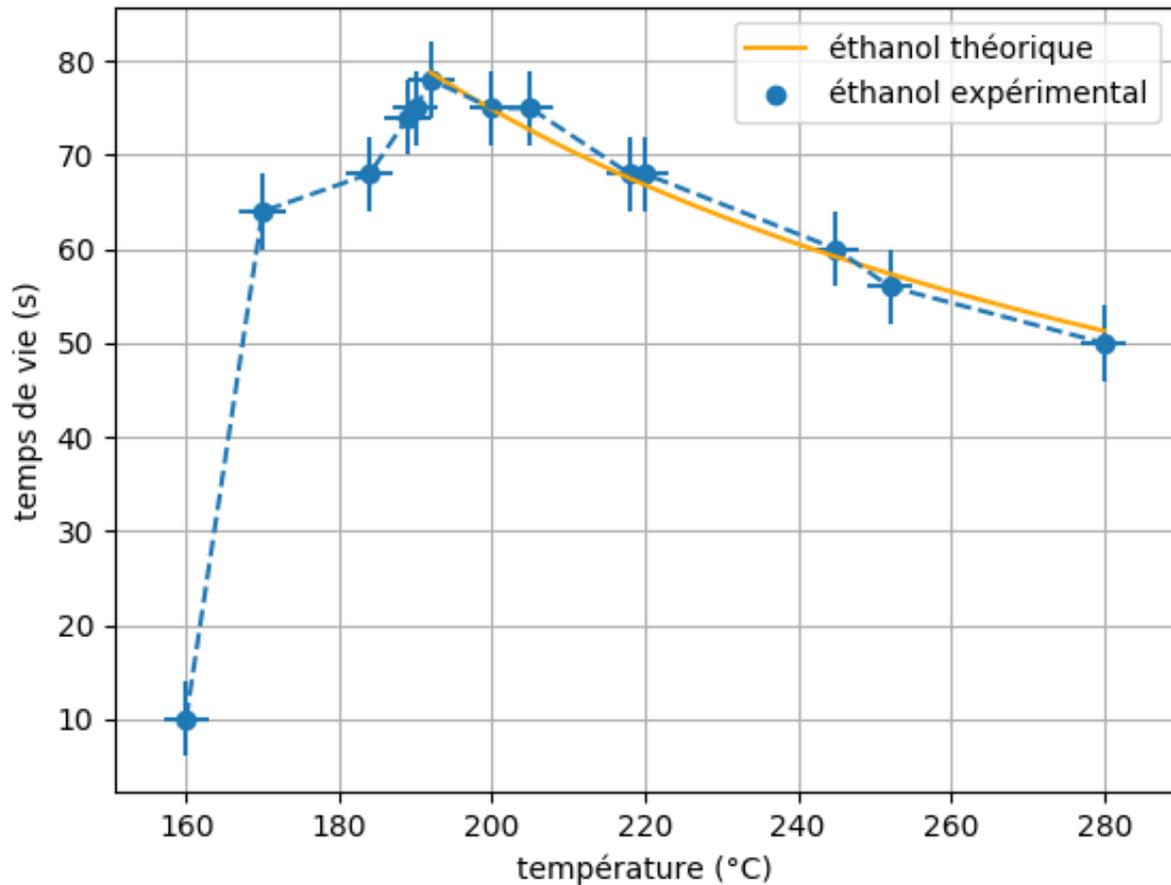


Figure 17 : Résultats du temps de vie de la goutte en fonction de la température de la plaque

Interprétation :

Le modèle théorique applicable qu'à partir de 192°C, correspondant à la température où le temps de vie est maximal. En dessous de cette température, le temps de vie est croissant.

III.2 Effet du volume initial de la goutte

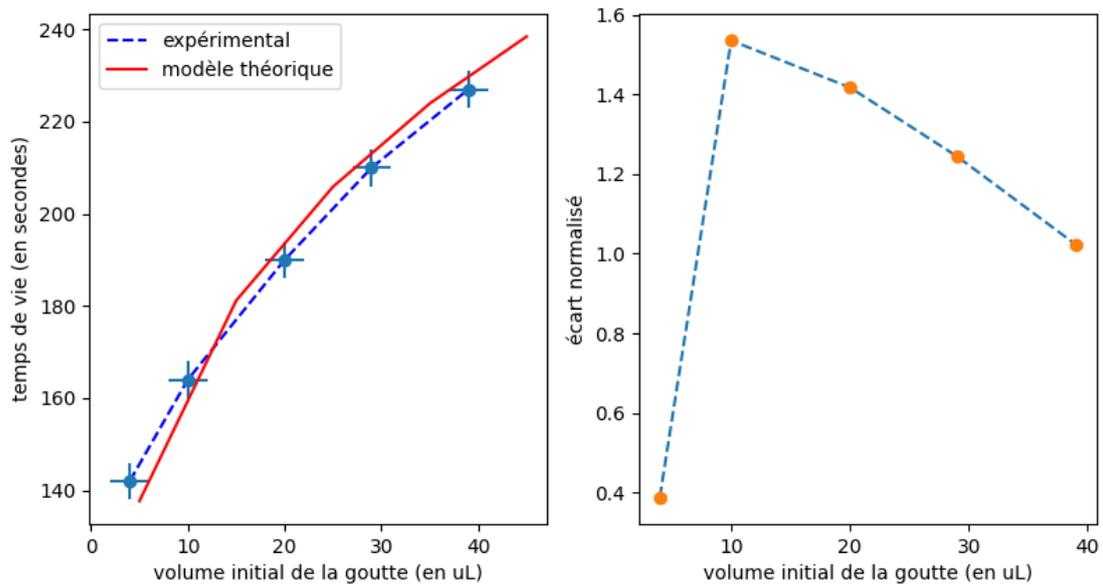


Figure 18 : Résultats du temps de vie de la goutte en fonction du volume initial de la goutte

Température : 200°C +/- 5°C

Surface : aluminium

Interprétation :

Le Z-Score inférieur à 2, on peut donc en conclure que le modèle théorique (trouvé à partir de l'expression du temps de vie en fonction du rayon) est validé. On en conclut, qu'il vaut mieux favoriser la formation de petites gouttelettes dans les moteurs thermiques et circuits de refroidissements pour limiter au plus l'effet Leidenfrost. On pourrait voir quelle sorte d'agitation apporter au circuit pour favoriser la séparation de grosses gouttes en gouttelettes.

De plus pour les gouttes à volume initial plus grand, la compétition entre surface de la goutte en contact avec la plaque et quantité de liquide à évaporer est d'autant plus vorace.

III.3 Effet de la rugosité de la plaque

Observations :

- Augmentation de la température de Leidenfrost (i.e. température à partir de laquelle le phénomène existe)
- Aspérités modifient épaisseur et flux de vapeur
- Ecoulement plus rapide car débit volumique constant (fluide incompressible) et surface transversale réduite par aspérités donc vitesse de l'écoulement augmente
- Ainsi, le temps de vie diminue



Figure 19 : Surface rugueuse en aluminium utilisée

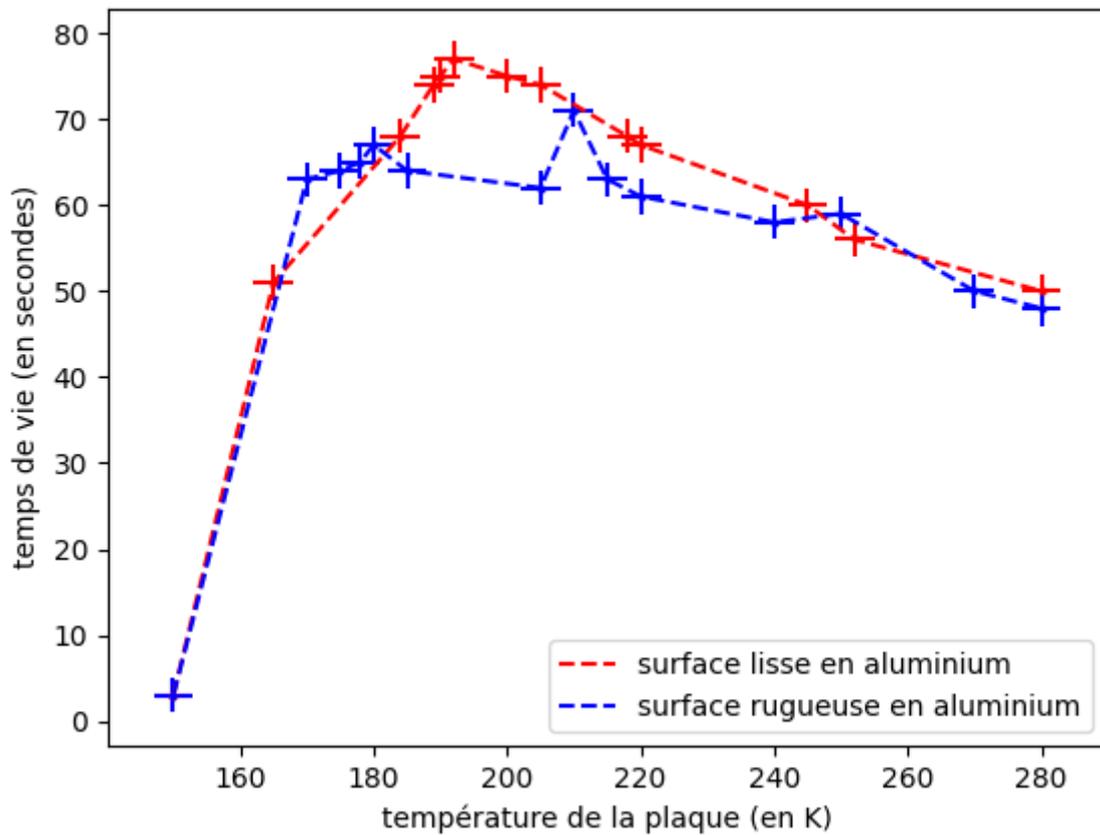


Figure 20 : Résultats du temps de vie de la goutte en fonction de la température de la plaque selon sa rugosité

IV. Etude du rôle de la tension superficielle via usage de tensioactifs



Figure 21 : Mélange 1 = eau savonnée non ionique

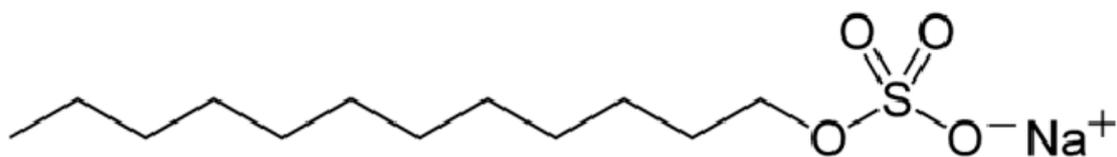


Figure 22 : Mélange 2 = tensioactif anionique SDS

IV.1 Observations et interprétation

Eau distillée



Savon non-ionique



SDS anionique



0s

30secs

60secs

90 secs

Figure 23 : Evolution du rayon dans le temps pour eau sans tensioactifs et eau avec tensioactifs

Interprétation :

$R \ll l_c$	Compétition poids/ tension superficielle
$R \gg l_c$	Gravité domine

Avec l_c la longueur capillaire du liquide (c.f. figure 3)

On constate effectivement que les gouttes avec tensioactifs sont plus plates que les gouttes d'eau sans tensioactifs.

Explication :

Tensioactifs :

- réduisent tension superficielle
- goutte plus aplatie
- plus exposée au transfert thermique de la plaque
- évaporation accélérée

IV.2 Résultats expérimentaux

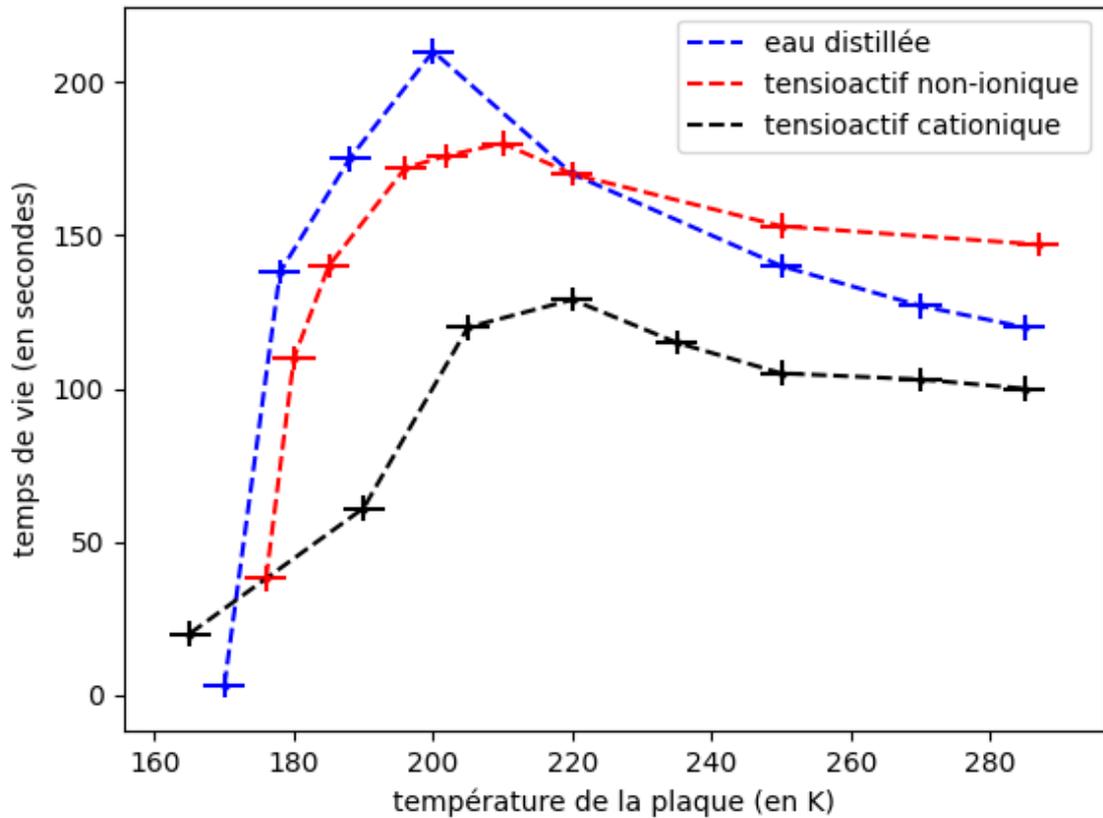
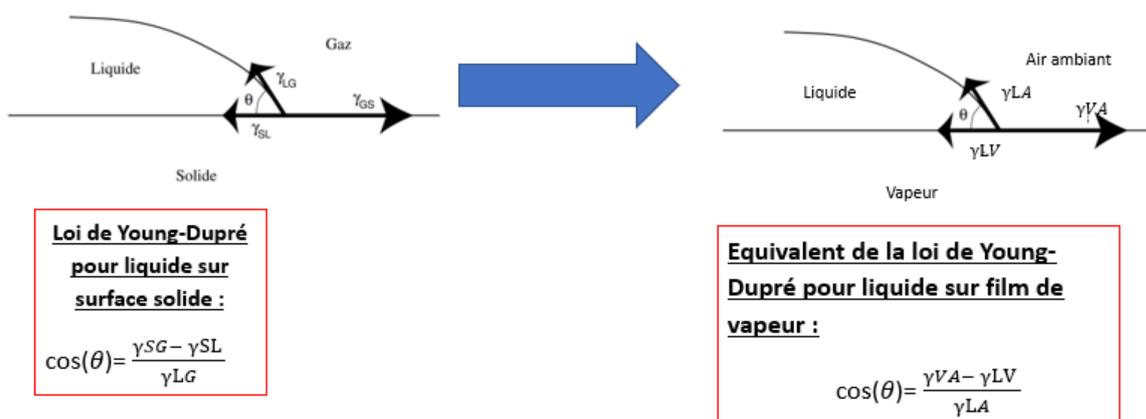


Figure 24 : Résultats du temps de vie de la goutte pour tensioactifs

IV.3 Analogie avec la loi de Young Dupré pour interface liquide/solide



Idée de mesure : mesurer les angles de contact à différents instants pour en déduire une relation entre les différentes tensions superficielles ci-dessus.

Peut-on négliger γ_{VA} et γ_{LA} pour en déduire directement la tension de surface γ_{LV} entre le liquide et le film de vapeur ?

V. Conclusion et ouverture

Paramètre	Défavorise l'effet <u>Leidenfrost</u> ?
Augmentation de température de surface	→ diminution du temps de vie des gouttes
Rugosité de la surface	→ augmente la température de <u>Leidenfrost</u> → diminue temps de vie par rapport à surface lisse
Réduction du volume initial de la goutte	→ diminue temps de vie de la goutte
Usage de tensioactifs	→ diminution de tension superficielle donc expose davantage la goutte à la plaque
Application d'un champ électrique	→ une augmentation de la tension appliquée entre aiguille et plaque diminue le temps de vie de la goutte

Ainsi j'en conclus que pour défavoriser l'effet Leidenfrost dans les moteurs thermiques il faut utiliser des températures soit inférieures à 160°C, sinon augmenter la température au-delà de 250°C car à partir d'environ 200°C, le temps de vie de la goutte diminue avec la température.

Il faut également penser à comment favoriser le scindement de goutte en petites gouttelettes qui s'évaporent plus rapidement ainsi qu'utiliser des surfaces plutôt rugueuses qui diminuent le temps de vie de la goutte en caléfaction.

L'usage de tensioactifs permet d'allonger la goutte en diminuant la tension de surface de la goutte, ce qui réduit son temps de vie considérablement. Ceci peut donc être une autre alternative pour réduire l'effet Leidenfrost.

Ma camarade ayant fait ce TIPE avec moi a conclu qu'en imposant un champ électrique entre la plaque chauffante et une aiguille plongeant dans la goutte, cela diminue le temps de vie de la goutte. Faudrait-il alors réfléchir aux applications concrètes de cette propriété dans les circuits de refroidissement, ce qui ne fut pas mon objet d'étude cependant.

De façon générale ce sujet fait l'objet de nombreuses recherches. Par exemple, des chercheurs du laboratoire PMMH affilié à l'ESPCI ont créé un revêtement texturé, permettant d'éviter l'effet Leidenfrost jusqu'à 1100°C [4]. En jouant sur la super hydrophobie du matériau et grâce à des micro piliers, ils ont mis au point des canaux permettant d'évacuer la vapeur créée sous un maillage isolant, afin d'éviter que la vapeur soulève le liquide. Ainsi, le contact entre liquide et surface solide est maintenue, permettant le refroidissement de cette dernière.

VI. Annexes

VI.1 Autre expérience

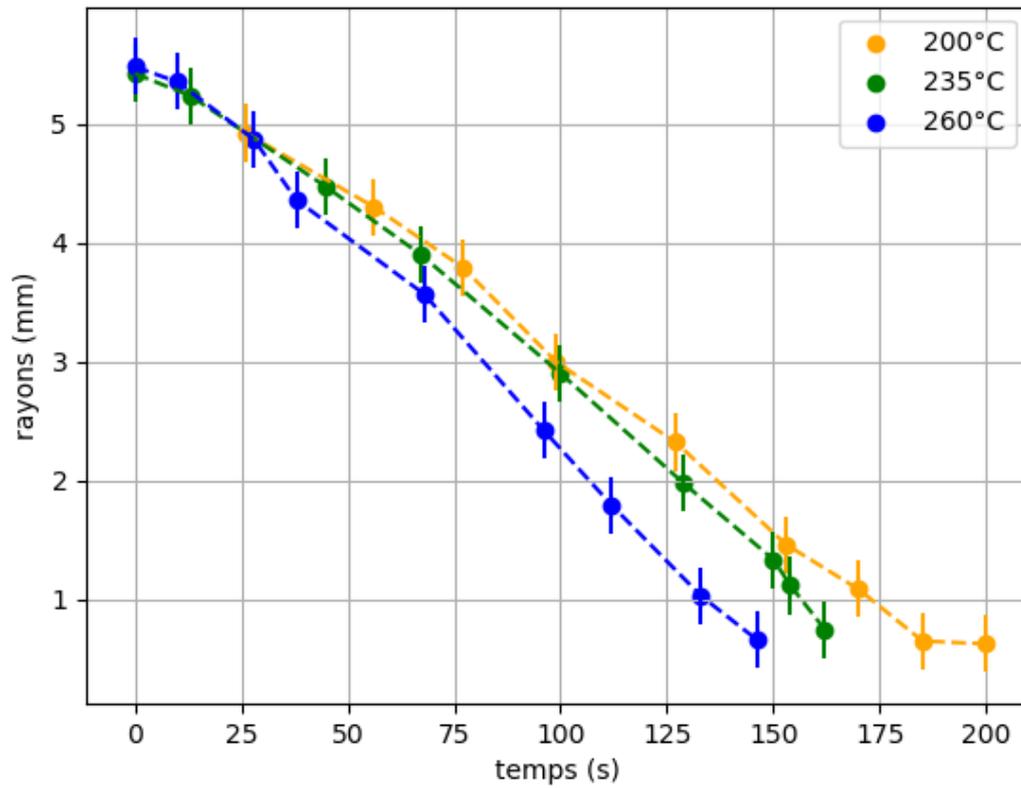


Figure 25 : Résultats expérimentaux du rayon de la goutte dans le temps en fonction de la température de la plaque

VI.2 Démonstration de l'épaisseur du film de vapeur

D'après l'équation de diffusion: $\frac{\rho c \partial T}{\lambda \partial t} - \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$

En régime stationnaire, $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$. Or $T(0) = T_p$ et $T(e) = T_e$ d'où $T(z) = T_p + \frac{T_e - T_p}{e} z$

Le flux de chaleur reçu par la goutte est: $\Phi = j_Q S = j_Q \pi R^2$

D'après Fourier: $j_Q = -\lambda \text{grad}(T) = \frac{\lambda \Delta T}{e}$. Ainsi $\Phi = \frac{\lambda \Delta T}{e} \pi R^2$

La masse d'eau évaporée par unité de temps (avec L la chaleur latente) est

$$\boxed{\frac{dm}{dt} = \frac{\Phi}{L} = \frac{\lambda \Delta T}{eL} \pi R^2}$$

D'autre part, d'après l'équation de Navier Stokes:

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \text{grad}) \cdot \vec{v} \right) = -\text{grad}(P) + \rho \vec{g} + \eta \Delta \vec{v}$$

En négligeant le poids et en régime stationnaire: $\text{grad}(P) = \eta \Delta \vec{v}$

Par invariance par rotation et d'après Curie: $\frac{\partial P}{\partial r} = \eta \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}$

Hypothèse: P ne dépend pas de z . Donc $v_r(z) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial r} z^2 + Bz + C$

D'après le nombre de Reynold, le fluide est visqueux donc: $v_r(z=0) = v_r(z=e) = 0$

$$\Rightarrow C = 0 \text{ et } B = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial r} e$$

$$\text{Ainsi, } \boxed{v_r(z) = \frac{1}{2\eta} \frac{\partial P}{\partial r} z(z - e)}$$

Soit Q le débit volumique de vapeur à une distance r du centre

$$Q = \int_0^e 2\pi r v_r(z) dz = -\frac{\pi r}{6\eta} e^3 \frac{\partial P}{\partial r}$$

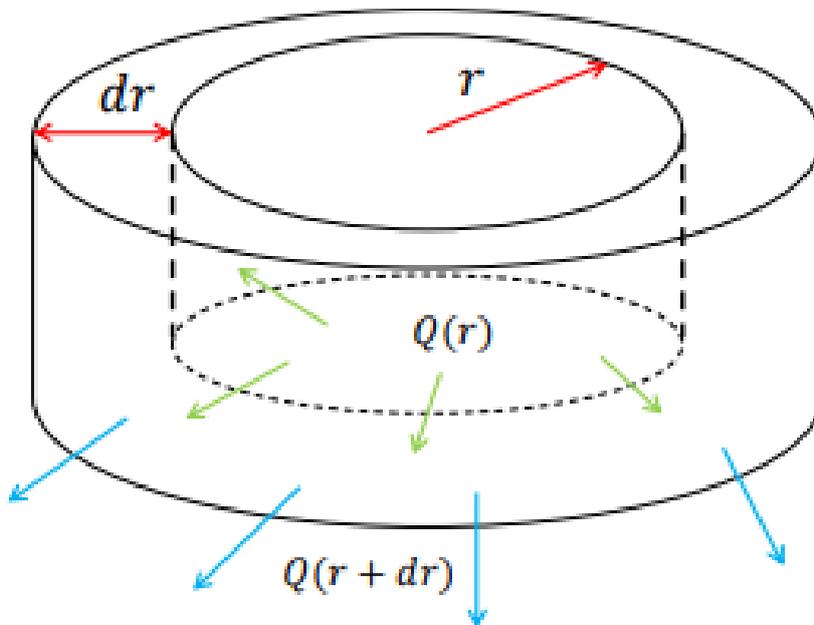
Soit j_v le volume de vapeur produit sous la goutte par unité de surface et de temps

$$j_v \rho_v \pi R^2 dt = dm. \text{ Donc } j_v = \frac{1}{\rho_v \pi R^2} \frac{dm}{dt}$$

$$\text{Bilan entre } r \text{ et } r + dr : \frac{\partial Q}{\partial r} = j_v 2\pi r = \frac{2r}{\rho_v R^2} \frac{dm}{dt}$$

$$\text{On remplace } Q : \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = -\frac{12\eta r}{\rho_v \pi R^2 e^3} \frac{dm}{dt}$$

$$\text{En intégrant: } P(r) = P_{atm} + \frac{3\eta}{\pi \rho_v e^3} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \frac{dm}{dt}$$



$$\begin{aligned} \text{D'après le principe fondamental de la statique des fluides, } P(0) &= P_{atm} + \rho_l g h_e \\ &= P_{atm} + 2\rho_l g l_c \end{aligned}$$

$$\text{En utilisant la relation précédente en } 0 : \frac{3\eta}{\pi \rho_v e^3} \frac{dm}{dt} = 2\rho_l g l_c = \frac{3\eta}{\pi \rho_v e^3} \frac{\lambda \Delta T}{eL} \pi R^2$$

$$e = R^2 \left(\frac{\lambda \eta \Delta T}{\rho_l \rho_v g L l_c} \right)^{\frac{1}{4}}$$

Soit M la masse de la goutte, $M = 2\pi\rho_l l_c R^2$. En dérivant par rapport à t : $\frac{dM}{dt} = 4\pi\rho_l l_c R \frac{dR}{dt}$

La masse d'eau évaporée par unité de temps vaut donc : $\frac{dm}{dt} = -\frac{dM}{dt}$

Avec la première expression de $\frac{dm}{dt}$ et en remplaçant e :

$$-4\pi\rho_l l_c R \frac{dR}{dt} = \frac{\lambda\Delta T}{eL} \pi R^2 \left(\frac{\lambda\eta\Delta T}{\rho_l \rho_v g L l_c} \right)^{-\frac{1}{4}} R^{-\frac{1}{2}}$$

En résolvant l'équation différentielle avec $R(0) = R_0$: $R(t) = R_0 \left(1 - \frac{t}{\tau} \right)^2$

$$\text{Avec } \tau = 8R_0^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\lambda\Delta T}{\rho_l l_c} \right)^{-\frac{3}{2}} \times \left(\frac{g\rho_v}{\eta} \right)^{-\frac{1}{4}}$$

VI.3 Monte Carlo pour calcul d'incertitudes sur temps de vie et rayon

```
import numpy as np
import numpy.random as rd
import matplotlib.pyplot as plt
from math import *

#ethanol sur alu
# Données :
lamda= 25*10**(-3)
n=1.3*10**(-5)
rho_v=0.6
lc=2.55*10**(-3)
rho=958
lvap=2.25*10**(6)
g=9.8

N = 50000
r= 3 #rayon initial à entrer
temp= 220
tdv=150 # en secondes
u_temp=5 #degrés celsius: ou 10C?
u_r1= 0.05# plus l'incertitude de la règle
u_r2=0.41 #incertitude à 4 pixels près

# Simulations :
"""n=len(tdv)"""
temp_sim=temp+rd.uniform(-u_temp,u_temp,N)
r_sim=r+ rd.uniform(-u_r1,u_r1,N)+ rd.uniform(-u_r2,u_r2,N)

tdv_calc=2*(4*rho*lc*lvap/(lamda*(temp_sim-100)))**3/4*(3*n/(rho_v*g*sqrt(np.pi)*0.002))**1/4*r_sim**1/2

# Calcul et incertitude de tdv et rayon:

tdv_moy = np.mean(tdv_calc)
u_tdv = np.std(tdv_calc,ddof = 1)
z_score_tdv=abs(tdv_moy-tdv)/u_tdv

r_moy = np.mean(r_sim) #r_sim=r_calc à t=0
u_r = np.std(r_sim,ddof = 1)
z_score_r=abs(r_moy-r)/u_r

print('tdv vaut en moyenne :', tdv_moy)
print('u(tdv) =',u_tdv)
print('z_score_tdv=',z_score_tdv)
print('u(r) =',u_r)
print('z_score_r=',z_score_r)
```

VI.4 Références

- [1]<https://tel.archives-ouvertes.fr/file/index/docid/48240/filename/tel-00009730.pdf>
- [2] <https://www.thermal-engineering.org/fr/quest-ce-que-leidenfrost-effect-leidenfrost-point-definition/>
- [3][Phys_PC_B.dvi \(cortial.net\)](https://www.cortial.net/Phys_PC_B.dvi)
- [4][ESPCI Paris : Refroidissement : des chercheurs repoussent l'effet Leidenfrost ! \(psl.eu\)](https://www.psl.eu/fr/actualites/2019/09/10/leidenfrost-effect)