



Fondation pour la culture scientifique et technique

Sciences à l'École



Oscillations d'une goutte d'eau

Benjamin Roman, Gabriel Moreau et Benjamin Suzzoni

encadrés par Eric Mathieu



OLYMPIADES DE PHYSIQUE FRANCE



CLEMSON UNIVERSITY



Résumé

En piégeant une goutte d'eau en caléfaction dans le creux d'une plaque chauffante, on peut observer l'apparition spontanée de formes oscillantes d'étoiles. Cherchant à comprendre le mécanisme de ce phénomène, nous avons alors réalisé une série d'expériences permettant l'observation et l'étude de gouttes étoilées selon cinq procédés différents : caléfaction, vibrations forcées par un substrat vibrant de surface hydrophobe, vibrations forcées par air pulsé, flux d'air constant et enfin lévitation acoustique ultrasonore.

De nombreuses observations, des mesures de rayons et de fréquences et la comparaison des résultats selon les procédés nous ont permis de conclure à un bon accord avec la modélisation des oscillations d'une goutte libre ou posée et avec les études trouvées dans diverses publications.

L'ensemble de notre travail nous a permis de mieux comprendre ce phénomène, notamment le caractère hydrodynamique et non thermique des oscillations de gouttes caléfiées.

Sommaire

Résumé	2
Sommaire	3
Introduction	4
1. Etude des gouttes en caléfaction	5
1.1 Phénomène de caléfaction	5
1.2 Observation de gouttes étoilées	5
1.3 Formation d'une étoile	6
2. Vibrations forcées par un substrat vibrant	6
2.1 Surfaces hydrophobes	6
2.2 Dispositif	7
2.3 Observations	7
3. Vibrations forcées par air pulsé	8
3.1 Obtention d'un flux d'air homogène	8
3.2 Dispositif	8
3.3 Observations	8
4. Flux d'air constant	8
4.1 Dispositif	8
4.2 Observations	9
5. Lévitiation acoustique ultrasonore	
5.1. Principe	9
5.2. Réalisation	9
5.3. Dispositif	9
5.4. Observations	9
6. Modélisation	10
7. Mesures	11
7.1. Mesure des fréquences	11
7.2. Mesure des rayons	11
7.3. Calcul des indices	11
8. Graphes et interprétation	12
8.1. Crêpes caléfiées	12
8.2. Substrat vibrant	12
8.3. Air pulsé	12
8.4. Air constant	13
8.5. Lévitiation acoustique	13
9. Conclusion	14
10. Remerciements	14
11. Bibliographie	14

Introduction

Tout commence l'an dernier lors d'une séance du club de physique que nous avons créé avec quelques passionnés. Nous étudions la caléfaction et oublions de l'eau dans le creux d'une plaque chauffante. Surprise ! L'eau prend une forme d'étoile à dix branches ! Nous découvrons les gouttes étoilées en caléfaction, phénomène très captivant que nous étudions depuis ce jour là.

Notre projet prend vite de l'ampleur. Nous commençons avec des expériences "low-cost" et montons petit à petit en puissance. Notre but premier est d'élucider le mécanisme à l'origine des oscillations. Ceci nous conduit à lire de nombreuses publications et à contacter des chercheurs en mécanique des fluides. Nous découvrons d'autres procédés qui produisent ces gouttes étoilées, notamment la lévitation acoustique.

Depuis, nous avons mis en œuvre ces procédés ce qui nous a permis, grâce à de nombreuses observations et mesures, de mieux comprendre le phénomène.

Notre travail nous a permis d'obtenir une première place aux Olympiades de Physique et de participer au concours Intel-ISEF en mai 2016.

1. Etude des gouttes en caléfaction

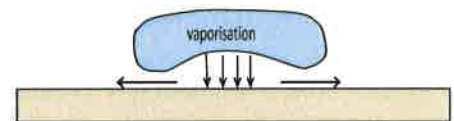
1.1. Phénomène de caléfaction

Des gouttes d'eau qui entrent en contact avec une plaque métallique assez chaude ne s'évaporent pas immédiatement, mais se mettent en forme de sphère, semblent rouler sur la plaque comme des billes et rebondissent si on les lâche d'une certaine hauteur : c'est la caléfaction, ou effet Leidenfrost.



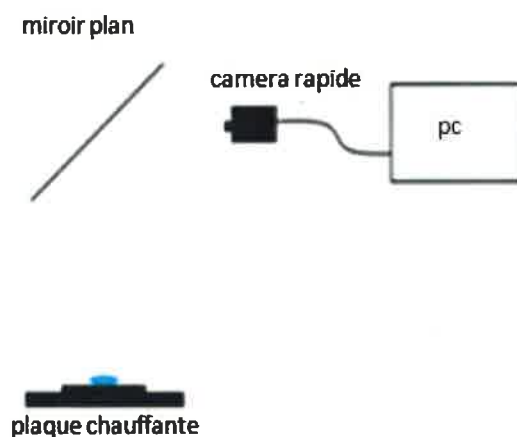
Les petites gouttes caléfiées sont plutôt sphériques. A partir d'une certaine taille, elles prennent l'aspect de « crêpes aplaties ».

Le phénomène de caléfaction s'explique par la création d'un film de vapeur qui soulève la goutte ou la crêpe et l'isole thermiquement de la plaque.



1.2. Observation de gouttes étoilées

1.2.1. Dispositif



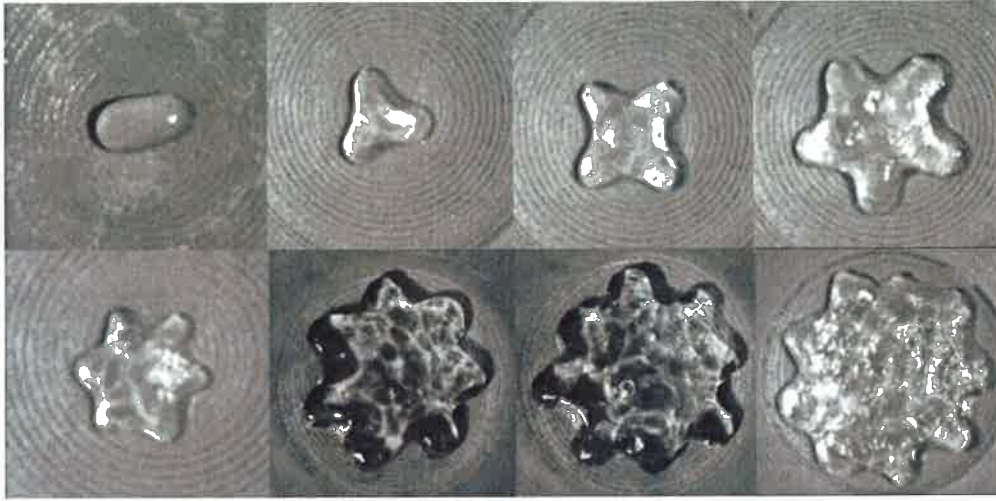
1.2.2. Observations

On dépose 1,5 mL d'eau distillée sur la partie concave d'une plaque chauffante au maximum de sa puissance : une forme d'étoile à plusieurs branches apparaît.

- Au cours du temps, le nombre de branches diminue avec le volume de la goutte.
- Certains modes sont plus rares que d'autres, comme le mode 7 ou le 3.
- Les étoiles ne se forment que lorsque la goutte est piégée. On les observe facilement dans un creux, plus difficilement sur une plaque horizontale en maintenant la goutte par un petit fil de cuivre et jamais quand la goutte peut bouger librement.
- Les étoiles se forment spontanément sans pouvoir en contrôler les paramètres (nombres de branches, conditions d'apparition...). L'état de la surface joue un rôle important : selon les plaques utilisées nous obtenons certains modes et pas d'autres.

Nous avons finalement réussi à observer 8 modes, du mode 2 au mode 9.

(3)



1.3. Formation d'une étoile

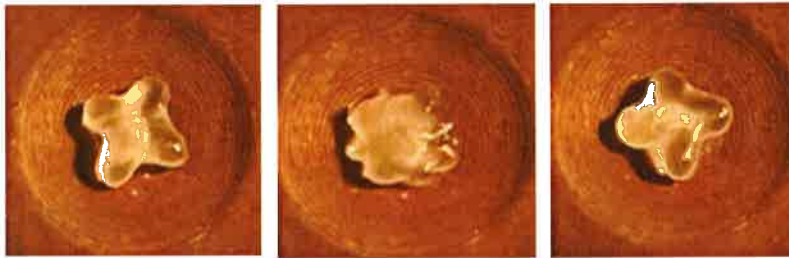
Une crêpe en caléfaction n'adhère pas à son substrat. De ce fait, elle bouge énormément et on peut observer des instabilités qui se développent dans ou au bord de la crêpe.

Un type d'instabilité conduit à la formation d'une étoile à plusieurs branches.

Quand on dépose dans un creux un volume d'eau inférieur à 2 mL, des formes étoilées apparaissent spontanément.

Ces formes sont oscillantes, les branches rentrant et se reformant au niveau des creux.

(4)



Ici, grâce à une caméra rapide ou au stroboscope nous observons bien 4 branches mais à l'œil nu nous observons 8 branches à cause de la persistance rétinienne.

Typiquement, les fréquences mesurées sont comprises entre 3 Hz et 30 Hz selon les rayons et les modes.

2. Vibrations forcées par substrat vibrant

2.1. Surfaces hydrophobes

Pour obtenir le même phénomène en oscillations forcées, il est indispensable que la goutte n'adhère pas à son substrat. Nous avons donc expérimenté plusieurs surfaces plus ou moins hydrophobes :

(5)



Patin pour meuble en PTFE



Ruban de Téflon



Wax et poudre de lycopode



Tissu imperméabilisé



Cire de bougie



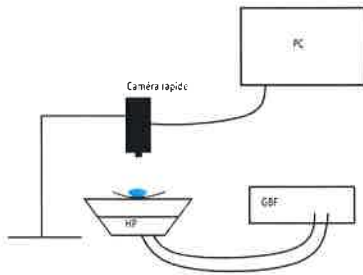
Glaco mirror coat

Nous avons choisi un spray super hydrophobe à base de nanoparticules, le Glaco Mirror Coat.

2.2. Dispositif expérimental

- Verre de montre traité au Glaco
- Ordinateur

(6)



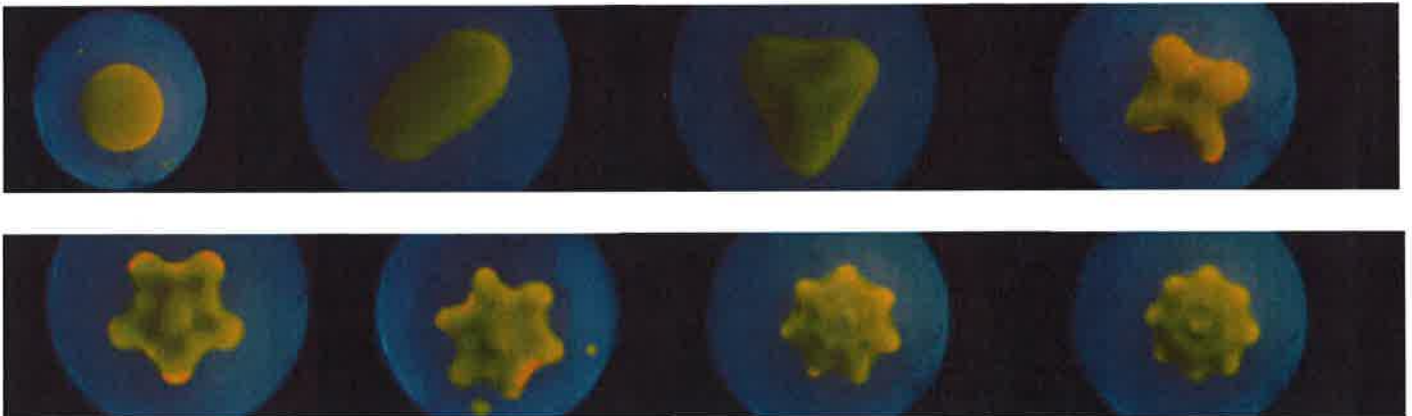
Nous déposons une goutte d'un volume de 0,5 mL sur le verre de montre. En réglant la fréquence du GBF, nous réussissons à retrouver les différents modes de vibration observés précédemment en caléfaction. Nous réitérons l'opération pour 4 autres volumes.

2.3. Observations

(7)



(8)



3. Vibrations forcées par air pulsé

(9)

3.1. Obtention d'un flux d'air homogène

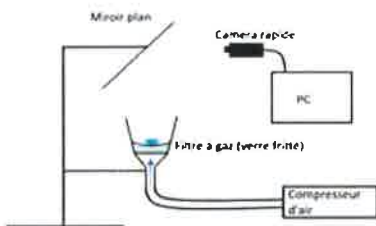
Pour faire vibrer une goutte dans un flux d'air, il est nécessaire qu'il soit homogène. Nous nous procurons donc un filtre à verre poreux et parvenons à notre but après avoir creusé la surface à l'aide d'une fraiseuse pour obtenir un creux comparable à celui de notre plaque chauffante et traité la surface au Glaco.



3.2. Dispositif

(10)

- Compresseur et rhéostat
- Caméra rapide (~200 images par seconde)
- Filtre à gaz (verre fritté) traité au Glaco
- Ordinateur



Notre but initial est de créer un flux d'air constant. Nous déposons une goutte, envoyons de l'air à l'aide d'un compresseur branché sur une alimentation de puissance variable, et retrouvons alors certains modes vus précédemment en caléfaction. Mais nous constatons qu'aux faibles fréquences, le bruit du moteur correspond parfaitement aux vibrations de la goutte.

La vérification à l'aide d'un pressiomètre montre que l'écoulement d'air n'est pas constant mais pulsé. Nous n'obtenons que les modes 2, 3, 4 et 5, car une fréquence plus grande du compresseur donne une pression d'air trop importante, qui provoque une éjection pour les petites gouttes et l'apparition de cheminées pour des gouttes plus grosses.

3.3. Observations

(11)



4. Flux d'air constant

4.1. Dispositif

L'idée nous vient alors d'utiliser la distribution d'air comprimé des salles de sciences de l'ingénieur. Après de nombreux déboires, nous obtenons cinq modes de vibrations.

De plus nous pouvons reproduire l'expérience simplement en soufflant dans le tube, des modes apparaissent également.



5. Lévitacion acoustique ultrasonore

5.1. Principe

Un transducteur émet une onde ultrasonore d'une trentaine de kHz

(1).

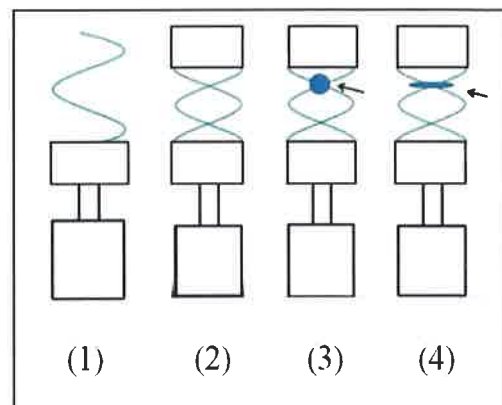
Cette onde est réfléchiée par une surface plane ou concave. En ajustant la hauteur à un nombre entier de demi-longueurs d'onde, un régime d'ondes stationnaires s'établit (2).

Les nœuds de vibrations sont des zones de basse pression, où il est possible de piéger de petits objets, en particulier une goutte d'eau (3).

En augmentant l'amplitude de l'onde, on écrase la goutte (4).

En modulant l'amplitude ou la fréquence, on peut alors faire osciller la goutte.

(13)



5.2. Réalisation

Nous avons dans un premier temps réussi à faire léviter des bouts de polystyrène puis une goutte d'eau, mais notre alimentation « maison » est insuffisante : la goutte est souvent instable et le phénomène peu reproductible.

Nous contactons alors Cédric Payan, chercheur au CNRS, Laboratoire de Mécanique et Acoustique, qui vient voir nos expériences au lycée, puis nous invite à visiter son laboratoire à Marseille. Il nous prête un ampli de puissance HF et nous parvenons enfin à observer les modes 2, 3 et 4.

(14)



5.3. Dispositif

(15)



5.4. Observations

(16)



6. Modélisation

Une goutte liquide est un oscillateur, caractérisé par sa pulsation propre: $\omega_c^2 = \frac{\gamma}{\rho R^3}$ [1]

Avec γ la tension superficielle du liquide, ρ sa masse volumique et R le rayon de la goutte.

- Pour des gouttes sphériques « libres », si n est le mode observé (n correspondant au nombre de branches), elle s'écrit :

$$\omega_n^2 = n(n-1)(n+2) \frac{\gamma}{\rho R^3} \quad [2]$$

- Dans le cas des crêpes libres, si on suppose que la goutte a une forme de cylindre de rayon R :

$$\omega_n^2 = n(n-1)(n+1) \frac{\gamma}{\rho R^3} \quad [3]$$

- Et dans le cas d'une sphère posée sur un plan [4] :

$$\omega_n^2 = \frac{n(n-1)(n+2)}{1 + \sqrt{(2n+1)/4\pi}} \frac{\gamma}{\rho R^3} \quad [4]$$

- En posant $i = \frac{\omega_n^2}{\omega_c^2}$, i étant l'« indice du mode n », il vient :

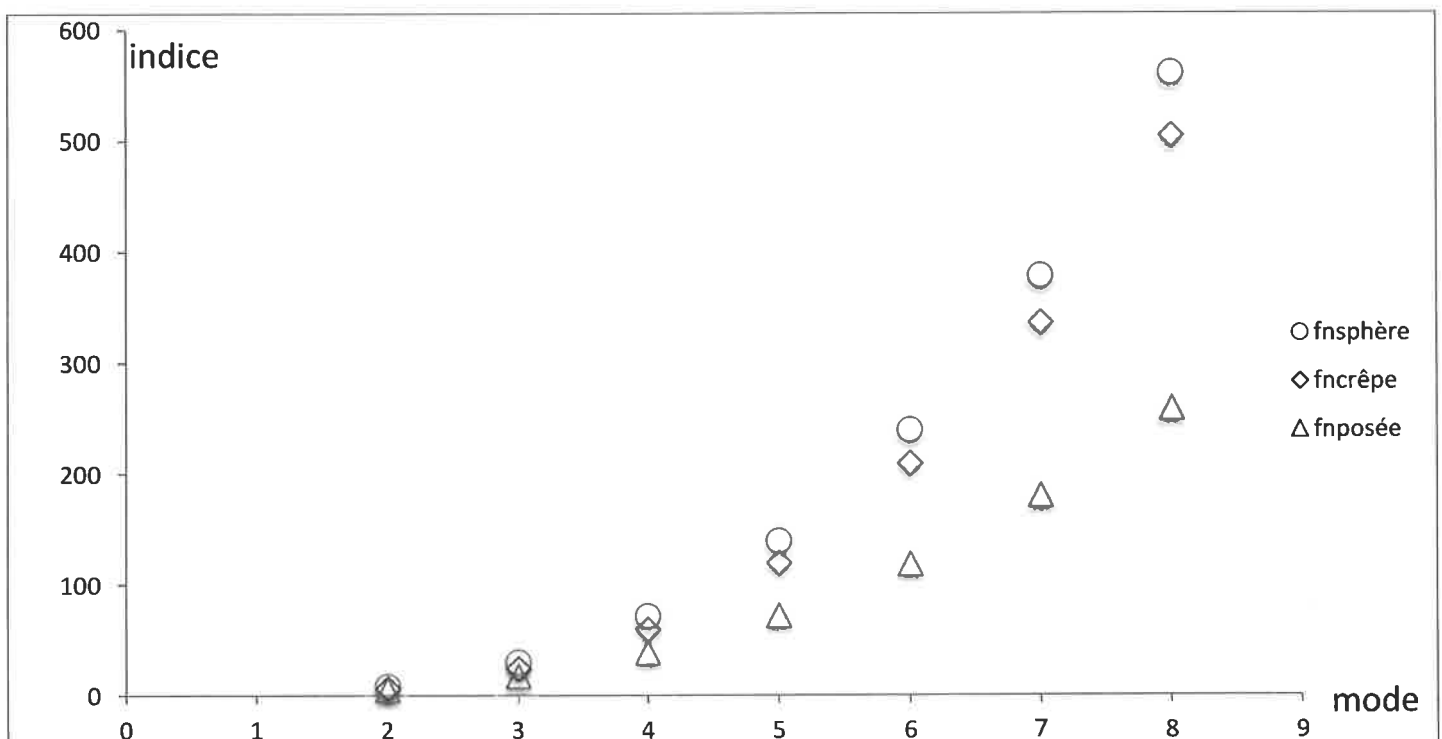
$$i_s = n(n-1)(n+2) \text{ pour la sphère libre}$$

$$i_c = n(n-1)(n+1) \text{ pour la crêpe libre}$$

$$i_{\text{pos}} = \frac{n(n-1)(n+2)}{1 + \sqrt{(2n+1)/4\pi}} \text{ pour la sphère posée sur un plan vibrant}$$

Cet indice constituera par la suite notre outil permettant d'étudier et de comparer les différents procédés utilisés pour faire osciller une goutte.

(17) indices théoriques en fonction des modes



7. Mesures

Nous voulons calculer pour chaque procédé les indices expérimentaux $i = \frac{\omega_n^2}{\omega_c^2} = \frac{(2\pi f)^2 \rho R^3}{\gamma}$ afin de les comparer aux indices théoriques précédents.

Il faut donc mesurer R et f pour chaque procédé et chaque mode.

Pour ce faire, nous exploitons les films réalisés à l'aide du logiciel d'acquisition « Généris ».

7.1. Mesure des fréquences

En faisant défiler le film image par image, on compte le nombre d'images séparant deux passages successifs de l'étoile par la même forme. On obtient ainsi la période puis la fréquence.

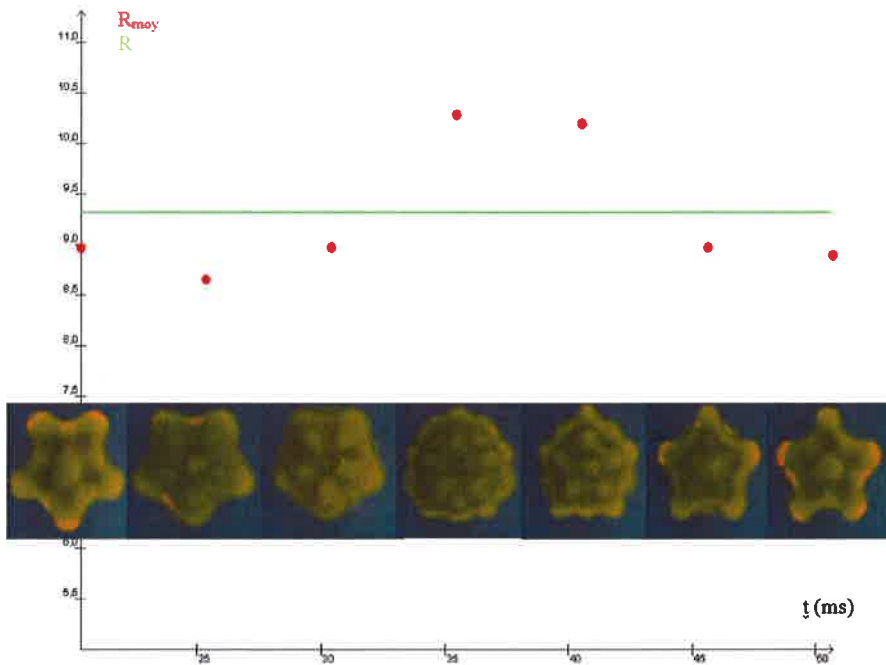
7.2. Mesure des rayons

Pour mesurer le rayon moyen R, on pointe à intervalles réguliers le contour à un instant donné, on calcule le rayon correspondant et on en fait la moyenne R_{moy} . On réitère l'opération pour des images successives sur une période. Pour un mode donné, ce rayon moyen R_{moy} varie périodiquement au cours du temps sur une demi-période.

(18)



(19) Rayon moyen en fonction du temps



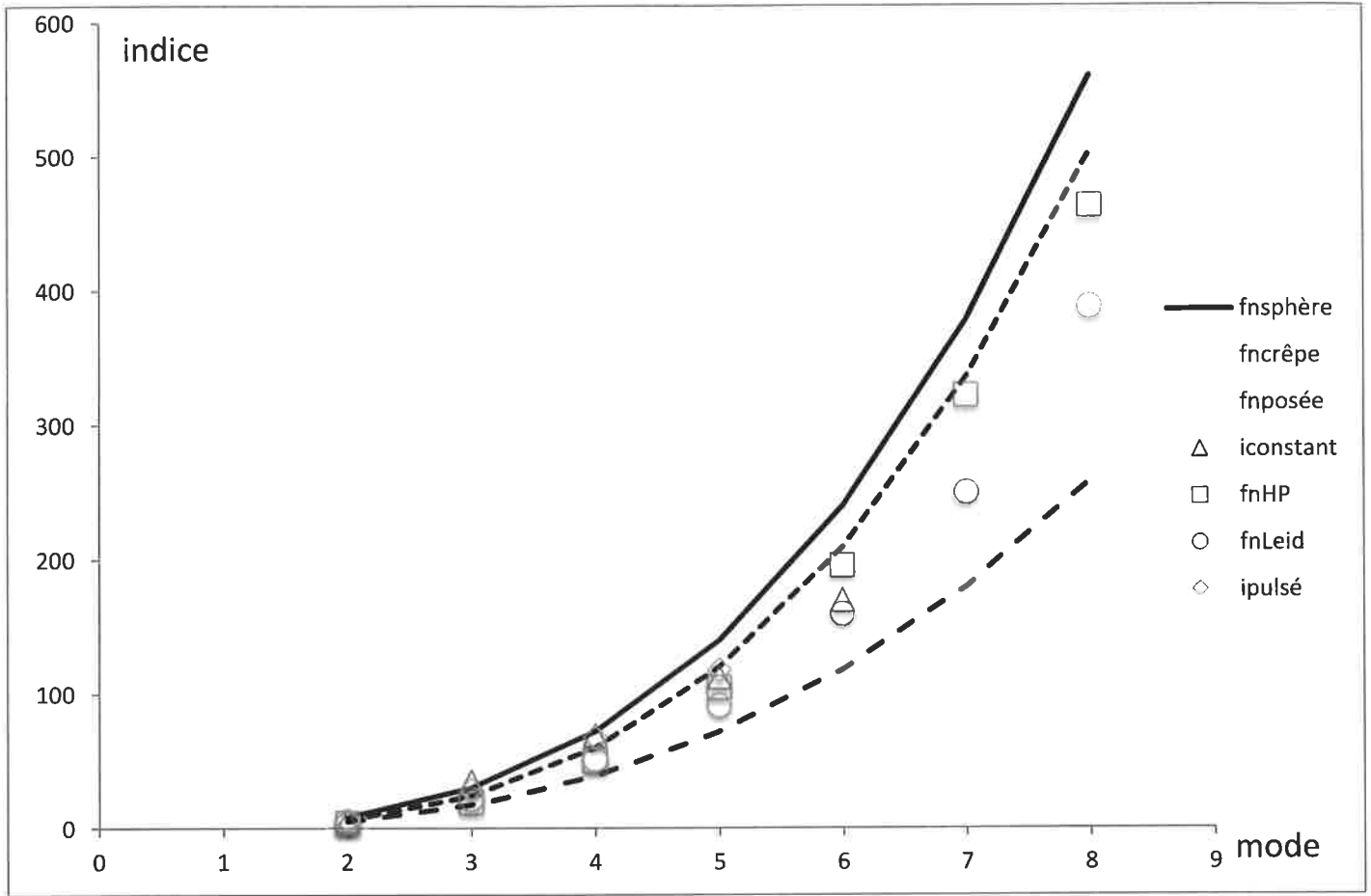
La hauteur moyenne de la goutte varie donc en opposition de phase avec son rayon moyen, le volume étant constant.

Pour calculer les indices, nous utiliserons donc la valeur moyenne R des R_{moy} .

7.3. Calcul des indices

Nous avons calculé pour chaque procédé les indices expérimentaux $i = \frac{\omega_n^2}{\omega_c^2} = \frac{(2\pi f)^2 \rho R^3}{\gamma}$

Nous traçons ensuite les graphes $i = f(n)$ pour chaque procédé.



8.1. Crêpes caléfiées ○

« Les fréquences propres mesurées sont situées entre celles des crêpes libres et celles des gouttes sphériques posées sur un substrat. Cela peut être dû à la présence de la plaque, qui joue un rôle similaire à celui du substrat, mais de moindre importance sans doute à cause du film de vapeur. A ces corrections près, les résultats sont donc en accord avec la théorie. » [3].

8.2. Substrat vibrant □

Nous mesurons la fréquence et le rayon pour les 7 modes obtenus et ce pour 5 volumes différents. Nous calculons ensuite les indices correspondants et en faisons la moyenne. Les indices moyens sont faiblement inférieurs à ceux des crêpes libres et nettement au dessus de ceux des sphères posées sur un substrat.

La comparaison avec les gouttes caléfiées est doublement intéressante :

- il est difficile d'obtenir des oscillations en étoile en caléfaction comme en substrat vibrant sur une surface plane.
 - les indices des gouttes vibrées sont au dessus de ceux des caléfiées mais proches.
- Le rôle du film de vapeur et celui de la surface vibrante hydrophobe sont comparables. Le phénomène observé en caléfaction semble bien résulter de vibrations forcées.

8.3. Air pulsé ◇

Les indices calculés sont en accord avec ceux des crêpes libres, voire des sphères libres pour les petits modes.

Comparons air pulsé, vibration HP et caléfaction :

Les indices des gouttes en air pulsé sont légèrement supérieurs à ceux des crêpes posées et caléfiées : le flux d'air semble diminuer l'interaction avec le substrat et rapprocher de la crêpe libre.

La similitude des modes observés et des graphes confirme l'interprétation précédente : en caléfaction, les oscillations sont forcées et les étoiles résultent bien d'un phénomène de résonance.

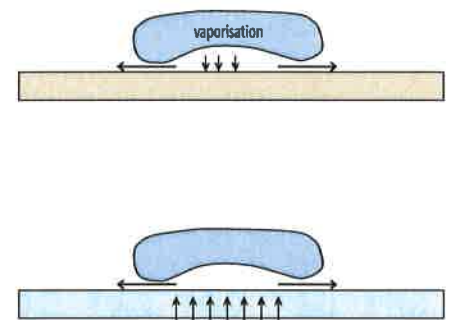
Il semblerait donc par analogie que c'est bien le film de vapeur qui oscille et qui fait osciller la goutte.

Il reste cependant à confirmer ce mécanisme car deux hypothèses sont possibles :

- 1) Le film de vapeur oscille. Cette oscillation a pour conséquence l'oscillation de la goutte.
- 2) C'est l'oscillation de la goutte, notamment à cause de fluctuations thermiques, qui engendre les fluctuations de l'épaisseur du film de vapeur.

Une étude de gouttes sur coussin d'air permettrait de trancher : une telle goutte est soumise aux mêmes écoulements qu'en caléfaction, tout en s'affranchissant des gradients thermiques.

L'observation d'oscillations en flux d'air constant permettrait donc de supprimer la deuxième hypothèse.



8.4. Air constant Δ

Les résultats sont similaires à ceux observés en air pulsé.

Là encore, la forme des étoiles et le graphe sont très comparables à ceux observés dans les trois cas précédents.

L'existence des gouttes en étoile en flux d'air constant permet donc de répondre à la question du mécanisme de leur formation en caléfaction.

En lévitation sur coussin d'air, l'air est injecté par-dessous. C'est différent pour les gouttes caléfiées qui flottent sur leur propre vapeur.

Leur dynamique est cependant très similaire. Par conséquent, il est vérifié que le phénomène d'oscillation de gouttes en étoile ne dépend pas des effets thermiques mis en jeu lors de la caléfaction, contrairement à des hypothèses antérieures.

Les surfaces utilisées jouent un rôle prépondérant :

- par leur forme : dans les 4 cas, il faut un creux pour obtenir les oscillations
- par leurs propriétés : en vibration HP comme en air pulsé et constant, il faut un très bon hydrophobe (la surface se détériore d'ailleurs assez vite et il faut retraiter). En caléfaction, la nature, la température et l'état de la surface jouent un rôle important et complexe.

8.5. Lévitation acoustique

Au moment où nous filmions les oscillations de gouttes en lévitation, notre ampli HF est tombé en panne et donc nous n'avons pas pu pour l'instant mesurer les rayons et les fréquences et calculer les indices. Nous émettons l'hypothèse que les indices seront très proches de ceux de la crêpe libre en l'absence de substrat.

9. Conclusion

Nous avons donc étudié et comparé différents procédés pour obtenir des oscillations en forme d'étoile de gouttes d'eau.

L'étude a montré un bon accord avec la théorie et les études menées précédemment que nous avons trouvées dans diverses publications.

Nous pensons avoir apporté notre contribution en utilisant des surfaces creuses en vibration sur un substrat et en flux d'air pulsé et constant, en filmant les surfaces et en introduisant les gouttes en lévitation dans la comparaison.

La comparaison des différents procédés nous a permis d'élucider une partie du mécanisme de formation des étoiles en caléfaction, notamment le caractère hydrodynamique et non thermique des oscillations de gouttes caléfiées. Notre recherche actuelle se concentre sur l'étude de l'écoulement des fluides (film de vapeur, air) afin de préciser ce mécanisme.

10. Remerciements

Nous remercions tout particulièrement :

- Olivier Polidoro, professeur de physique, et Alphonse Desimone, préparateur, qui ont fourni un travail énorme !
- Jean-Marie Gras et tous les autres préparateurs pour leur aide, leur gentillesse et leur patience.
- Jean-Pierre Roubin pour ses conseils avisés, ainsi que toute l'équipe des professeurs de physique qui nous ont soutenu dans notre projet.
- Cédric Payan (et son collègue Eric Debieu), responsable de l'équipe ondes et imagerie LMA (laboratoire de mécanique et d'acoustique) CNRS Aix Marseille Université, qui est venu nous voir, s'est enthousiasmé pour notre projet, nous a prêté du matériel, et nous propose son aide et celle de son labo pour la suite.
- Serge Dos Santos, Maître de Conférences HDR INSA Centre Val de Loire, pour son soutien et ses conseils.
- Dr. Wilco Bouwhuis (universiteit Twente), Dr. Fredericks et Dr. Saylor (Clemson University) pour nous avoir consacré un peu de leur précieux temps.

Enfin, un grand merci à tous ceux qui nous offrent les véritables aventures que sont les Olympiades de Physique et le concours C-Génial.



11. Bibliographie

- [1] J. G. Leidenfrost, *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus*, Duisburg on Rhine, Germany (1756).
- [2] H. Lamb. *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, Cambridge, 1932.
- [3] Anne-Laure Himbert Bianche, *Gouttes inertielles : de la caléfaction à l'étalement*, Thèse de doctorat (2004)
- [4] Courty S, Lagubeau G, Tixier T , *Oscillating droplets by decomposition on the spherical harmonics basis* (2006) Phys. Rev. E 73, 045301(R).
- [5] Philippe Brunet and Jacco H. Snoeijer, *Star-drops formed by periodic excitation and on an air cushion A short review*, Eur. Phys. J. Special Topics 192, 207–226 (2011)
- [6] Bouwhuis, Winkels, Peters, Brunet, van der Meer and H. Snoeijer, *Oscillating and star-shaped drops levitated by an airflow*, Physical Review E 88, 023017 (2013)
- [7] Wilco Bouwhuis , *Dynamics of Deforming Drops* (2015)
- [8] W. Ran, S. Fredericks, & J.R. Saylor, *Shape oscillation of a levitated drop in an acoustic field* (2013)
- [9] Raphaëlle Thévenin, *Superhydrophobie Active*, Thèse doctorat 2014
- [10] Lord Rayleigh, *Proc. R. Soc. London* 29, 71 (1879).
- [11] L. D. Landau, E. M. Lishitz, *Course of Theoretical Physics: Fluid Mechanics* (1959)

