

Concours C.Génial 2015

Le lycée Édouard BRANLY de Boulogne sur mer

Avec Laurine ANDRIEUX et Maxime FREY

présente



Partenaires



PMMH ESPCI



UMR 7836



Résumé

Décrite pour la première fois en 1756, la caléfaction, ou effet LEIDENFROST, est le comportement particulier d'une goutte d'eau sur une plaque très chaude qui, à partir d'une certaine température seuil, ne s'évapore plus instantanément et reste sur la plaque jusqu'à plusieurs minutes.

Nous avons, après nous être intéressés au comportement d'une goutte sur un support métallique froid, étudié la goutte en caléfaction en fonction de son volume, de la température de la plaque, puis mesuré et modélisé l'évolution d'une goutte en caléfaction en fonction du temps en étudiant l'effet de divers paramètres.

Une visite de l'ESPCI nous a permis de réussir de nouvelles expériences, notamment la mesure du coussin de vapeur entre la goutte et la plaque avec la méthode de la diffraction, ou encore l'utilisation des profils en toit d'usine appelés « ratchets » pour avoir une caléfaction dynamique.

Finalement, grâce aux surfaces super hydrophobes, nous avons découvert qu'il était possible d'obtenir les mêmes effets en dessous du seuil de LEIDENFROST : c'est la caléfaction froide.

Remerciements

Avant de vous présenter notre travail nous tenons à remercier, ceux sans qui cela n'aurait pas été possible :

- ✚ Mme Christine RIGOLLET, Provisure, M. Matthieu VAAST, Provisur Adjoint, M. Régis LOONIS, chef des travaux, et M. Éric FOUCHOU-LAPEYRADE, agent comptable : les personnels de direction du lycée E. BRANLY, sans lesquels aucune des multiples activités périscolaires ne seraient possibles dans notre établissement.
- ✚ M^{mes} Céline BALLY, Elise BERTELOOT, Sophie DEPERLECQUE, Berengère SILVAIN, Florence LEBLANC, Delphine DA-SILVA, Christel FLAMAND professeures de lettres, lycée E. BRANLY, pour le soin méticuleux qu'elles ont apporté lors des nombreuses lectures correctives. Nous les avons souvent sollicitées à la dernière minute, en urgence, ... aux milieux des conseils de classes, des réunions parents/professeurs, voire de leurs inspections. Nous les remercions de leur gentillesse.
- ✚ M^{me} Elise BERTELOOT, professeur de latin, lycée E. BRANLY, Boulogne-sur-Mer, pour son aide dans les traductions des textes latins de Pline l'Ancien, ou des citations latines du « *London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* » pour y retrouver des poèmes tronqués du XVI^{ème} siècle.
- ✚ M^{mes} Betty HENGUELLE et Véronique PRUVOT et MM. Gaël DANIEL, Romain LAMARRE, Bruno HERMAND et Alexandre PICARD, personnels de laboratoire, pour leur compréhension, leur aide et leur patience. On ne compte plus le nombre de fois où ils nous ont aidés simplement en commençant par nous ouvrir une porte ... pour voir M. BURIDANT.
- ✚ L'ensemble des personnels du lycée qu'ils soient enseignants ou non, la liste est très longue. Tout le monde, un jour ou l'autre, nous a rendu un service plus ou moins grand, plus ou moins stratégique. Sans eux nous ne serions jamais arrivés à réaliser tout ce que nous avons pu faire. Merci à tous ceux qui ont eu la patience de nous écouter. Merci aussi à tous ceux qui nous ont aidés et que nous avons oublié de citer.
- ✚ Nos camarades de terminales S₂ (Promotion Pierre-Gilles de GENNES) pour leurs critiques constructives lors de la présentation de notre exposé.
- ✚ Mme Marie-Christine GROSLIERES et MM. Grégory WALLYN (rapporteur), Rodolphe VETU et Stéphane RAMSTEIN, les membres de notre jury régional pour leurs critiques constructives et leur soutien.
- ✚ MM. Nicolas PERNET, Etudiant Sup Optique (OdP 2009 & 2010, TS₂ Promotion Philippe LANCEL), M. Guillaume SERRET, Ingénieur R&D, (OdP 2005), Pierre Louis DESGROUSILLIERS (OdP 2013 & 2014, TS₂ Promotion Peter HIGGS), M^{elle} Eugénie GOBERT (OdP 2012 & 2013, TS₂ promotion Kamil FADEL) pour leurs idées, leurs conseils et surtout leurs mines de bibliographie papier : articles et livres.
- ✚ M. Christophe PRZYGODSKI, dit PRZ, enseignant chercheur, ULCO qui prend de son temps pour présenter à des lycéens la fac au travers de TP qui ne peuvent avoir lieu au lycée. Nous y avons mesuré la chaleur latente de 100 g de carboglace, il en restait 4,9 kg avec lesquels nous nous sommes amusés, entre autre à faire de la caléfaction.
- ✚ M. Kamil FADEL, directeur du département physique du Palais de la Découverte, pour nous avoir transmis l'esprit du Palais de la Découverte, c'est-à-dire apprendre en s'amusant avec une vraie expérience. On peut l'écouter 10 fois faire un exposé sur le même sujet, et chaque fois, c'est le même émerveillement, chaque fois, on apprendra une chose nouvelle. Dans son exposé sur l'air liquide, il a des manips qu'il doit être un des seuls à oser à faire tant il a confiance en la physique (éternelle selon lui).
- ✚ M. Jacques HONVAULT, Engineering Art, ingénieur photographe de génie (connu grâce au Palais et à Kamil), qui fait de magnifiques photos de science qu'il illustre avec une très grande philosophie « la Physique n'est-elle pas simplement la philosophie Naturelle depuis Newton et ses Principia Mathematica ? »
- ✚ M. José BICO, Maître de conférences à l'ESPCI, qui a pris le temps de correspondre par mails sur une période assez longue pour échanger des idées et pour nous permettre de pouvoir visiter le PMMH (laboratoire de Physique et Mécanique des Milieux Hétérogènes). MM. Philippe BOURRIANE, Ludovic KAISER, Hadrien BENSE et Mmes Anaïs GAUTHIER et Helene BERTHET les doctorants de l'équipe de M. David QUÉRÉ (que nous avons eu le plaisir de croiser entre deux réunions internationales) qui nous ont accueillis durant toute une journée à l'ESPCI et nous ont présenté leurs expériences et leurs résultats en toute simplicité, en nous prodiguant trucs et astuces, en nous confiant quelques petites manips à faire, en acceptant de donner un regard critique sur nos résultats. Un grand merci pour cette superbe journée.
- ✚ M. Didier SORET, professeur de mathématiques, lycée E. BRANLY, pour nous avoir encadrés, aidés, soutenus et appuyés dans nos démarches les mercredis après-midi. Merci aussi pour les petits coups de pouce en maths, les graphiques et les logiciels de maths.
- ✚ M. Olivier BURIDANT, ne souhaite pas qu'on le remercie. Nous remercierons donc notre Mister BUBU qui est le symbole des concours de physique pour le lycée Branly. Il passe un temps monstrueux dans le seul but d'aider ses élèves, et, il a été celui qui a rendu l'aventure des Olympiades extraordinaire, il nous fournit le savoir qu'il nous manque pour réaliser nos expériences, et nous remotive pendant les périodes difficiles, et a fait bien plus que ce qu'on pouvait lui demander. Mais au-delà de l'aspect éducatif, nous avons découvert un homme, aidant et serviable, une personne au grand cœur sur qui nous pouvions toujours compter, et un simple merci serait dérisoire face à ce qu'il a réalisé pour nous, même si c'est la moindre des choses que nous pouvons lui dire. Donc merci, merci pour votre aide, merci pour votre soutien, merci de votre investissement, merci d'être là, et merci pour tout.
- ✚ Merci à tous ceux qui rendent possible, depuis le début, l'aventure des concours de physique et qui les perpétuent chaque année.

Sommaire

PARTENAIRES	2
RESUME	3
REMERCIEMENTS.....	4
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	6
METHODE – COMMENT ETRE A PLAT	7
PRISES DE VUES.....	8
DE LA GOUTTELETTE A LA PLAQUE.....	9
DIFFERENCE DE COMPORTEMENT EN FONCTION DE LA TEMPERATURE DE LA PLAQUE CHAUFFANTE	12
EVOLUTION DE LA FORME DE LA GOUTTE EN CALEFACTION.	13
ASPECT QUALITATIF	13
ASPECTS QUANTITATIFS.....	14
DUREE DE VIE D’UNE GOUTTE EN FONCTION DE LA TEMPERATURE.....	15
DUREE DE VIE D’UNE GOUTTE EN FONCTION DE SON VOLUME	16
MESURE DE L’INTERVALLE ENTRE LA GOUTTE ET LA PLAQUE	17
NOS PREMIERS ESSAIS.	18
NOS PREMIERES MODELISATIONS, NOS PREMIERS RESULTATS.	18
DIFFRACTION SUR UNE GOUTTE STABILISEE	23
EVOLUTION DE L’ESPACE ENTRE LA PLAQUE ET LA GOUTTE EN FONCTION DE SON VOLUME	25
CALEFACTION SUR SUPPORT SUPERHYDROPHOBE.....	26
OBTENTION DE SURFACES SUPERHYDROPHOBES	26
ETUDE DE LA DUREE DE VIE D’UNE GOUTTE SUR UNE PLAQUE SUPERHYDROPHOBE.....	27
ELABORATION DE PROFIL EN TOIT D’USINE.....	28
CALEFACTION SUR UN PROFIL EN TOIT D’USINE	29
CONCLUSION	30
BIBLIOGRAPHIE	31
ANNEXE 1 : LA CALEFACTION DANS LA BIBLIOGRAPHIE	32
ANNEXE 2 : LA VISITE DE L’ESPCI.	33
LES CONCOURS DE PHYSIQUE : UNE AVENTURE	35

Introduction

La finale nationale des Olympiades de physique a toujours lieu à quelques jours de la chandeleur. Aujourd'hui nous utilisons des crêpières antiadhésives qui, très souvent, comportent une pastille qui change de couleur quand elle est à la bonne température. Nos grands-mères avaient un truc pour le savoir. Pour l'enseigner à nos mamans, elles prenaient leur meilleure poêle et la plaçaient sur un feu vif, puis procédaient comme suit :

Attends quelques secondes et laisse tomber quelques gouttes d'eau. Regarde, elle adhère à la poêle puis se met à bouillir et finit par s'évaporer très rapidement, la poêle n'est pas assez chaude

Attends un peu plus longtemps, c'est-à-dire quelques minutes, enfin le temps de préparer autre chose, et recommence. L'eau semble rouler sur la poêle, il ne semble pas y avoir de résistance, elle n'accroche pas. Elle se déplace comme des billes. La poêle est suffisamment chaude pour passer à la cuisson des aliments.

Il est amusant de noter que nos pères font la même chose avec nos frères lors des barbecues et autres planchas l'été.

Nous avons également remarqué ce phénomène en TP lorsque nous déposons une goutte sur une plaque chauffante. C'est lors d'une séance de travaux pratiques organisée dans le cadre d'une liaison lycée/université, alors qu'on nous proposait de déterminer la chaleur latente de sublimation de la glace carbonique que nous nous sommes vraiment intéressés à ce phénomène. Comme des gouttes sur une plaque chaude, des glaçons de glace carbonique à -88°C se déplaçaient sur une table plane, comme s'ils étaient sur un coussin d'air. Nous avons demandé s'il s'agissait de la même chose, oui il s'agit de **la caléfaction**.

Ce phénomène a été visiblement décrit pour la première fois au XVIII^{ème} siècle par un médecin allemand *Johann Gottlob LEIDENFROST*. Ce nom comme celui de caléfaction évoquait bien peu d'enthousiasme autour de nous, même si chacun y allait de son anecdote du fakir marchant sur les braises, au prof de fonderie passant sa main dans une coulée de métal en fusion, aux expériences avec l'air liquide de Kamil FADEL au Palais de la Découverte, en passant par la case poêle de la grand-mère, sans oublier les yeux de Michel STROGOFF sauvés du supplice de FEOFAR-KHAN par des larmes. Pour beaucoup, on allait vite faire le tour d'un sujet anecdotique.

Nous avons alors procédé à quelques recherches d'abord sur internet. Très vite nous nous sommes aperçu que c'était bien plus qu'une curiosité de laboratoire ou un contexte pour un sujet de classe prépa. Nous avons tracé (Annexe 1), une courbe du nombre d'ouvrages, articles et de citations mentionnant le mot « leidenfrost » dans Google Scholar © de 1700 à nos jours d'abord de 5 ans en 5 ans puis années par année à partir de 1960. Certes, ce n'est pas d'une valeur scientifique absolue mais un bon indicateur selon nous. On atteint 500 mentions en 1875, il faut attendre 1963 pour dépasser les 1000 et aujourd'hui (31 décembre 2014 à 9h15) nous en sommes à 8340 soit 550 de plus que l'an dernier. Cela semble être plutôt encourageant pour notre projet, d'autant que de grands laboratoires s'y intéressent de l'école polytechnique à l'ESPCI, où nous aurons le privilège d'être invités et de rencontrer de grands chercheurs comme M. José BICO et M. David QUÉRÉ, nous les remercions encore pour tous leurs conseils et tout le temps qu'ils nous ont consacré (Annexe 2).

L'objet de notre étude est donc de mesurer les paramètres qui influent sur la caléfaction. Dans un premier temps nous aborderons le cas de l'eau sur un support à température ambiante. Puis nous étudierons le comportement d'une goutte en fonction de la température de la poêle en acier de nos grands-mères notamment en mesurant la durée de vie d'une goutte en fonction de la température.

Pour étudier l'évolution du profil de la goutte, nous avons développé un protocole de mesures à partir de photographies, tant pour mesurer la taille des gouttes que leurs contours.

Le film de vapeur, se formant entre la goutte et le support, est à l'origine de la longévité de celle-ci, nous avons souhaité le mesurer et voir comment il évolue au cours de la caléfaction.

Enfin pour apporter une touche moderne à ces 250 ans d'histoire de la caléfaction, nous montrerons ce que nous avons appris au contact des chercheurs de l'ESPCI, une étude du mouvement d'une goutte en caléfaction sur un ratchet : un profil en toit d'usine (en hommage à nos grand-mères nous préférons le profil en crémaillère).

Pour terminer nous reviendrons aux poêles modernes de la chandeleur, en étudiant la caléfaction sur des surfaces superhydrophobes sur lesquelles il est possible d'observer une **caléfaction froide**, c'est-à-dire pour des températures bien en deçà du seuil de LEIDENFROST

.

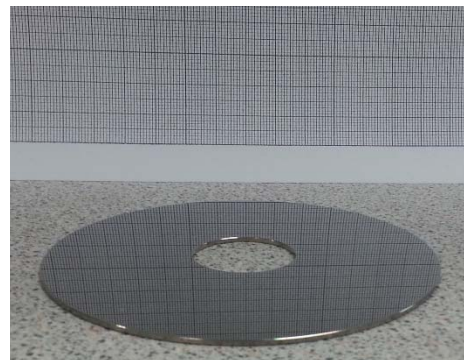
Méthode – Comment être à plat

Nous nous sommes très vite aperçus qu'il était indispensable d'avoir une surface parfaitement plane posée de manière parfaitement horizontale.

- Pour l'horizontalité, nous avons décidé de réaliser « une platine », porte-matériel muni de 3 vis de réglage, car par 3 points ne passe qu'un seul plan.
- Pour la surface plane nous avons eu plus de difficultés.
 - Dans un premier temps, nous avons pensé que le plus simple était de chercher la plaque chauffante idéale, celle qui se règle facilement avec 3 pieds et qui est parfaitement plane. Nous avons très vite déchanté car même en parcourant les labos de SVT, de biochimie et autres laboratoires de physique appliquée, c'était impossible de trouver notre bonheur. Nous en avons testé 17 modèles, plus ou moins récents, ils sont :
 - Pour les uns, striés
 - Pour les autres, avec une franche cavité au milieu
 - Les derniers sont soit concaves, soit convexes même si à l'œil nu elles paraissent planes
 - Dans un second temps, nous sommes allés au magasin du lycée où nous sommes très connus pour venir souvent demander des solutions, nous en sommes repartis avec de très nombreux échantillons métalliques, tous référencés à la nuance près. Du carré (20 cm x 20 cm) de tôle acier inoxydable X2CrNi18-09 (dit A2) de 2,0 mm d'épaisseur, à une tranche de 5 mm de profil hexagonal d'aluminium, nous les avons tous testés. Un bilan très décevant, car même le plus plat se déformait avec la chaleur en devenant convexe. La dilatation non uniforme courbait la tôle la plus plane. D'autres, comme le laiton, changeaient d'aspect au premier chauffage et devenaient « rugueux ».
 - Pour terminer, nous sommes allés voir les informaticiens du lycée. Avec un parc de près de 700 ordinateurs, le disque dur qui rend l'âme est monnaie courante. Grâce à eux et la fameuse clé spéciale pour les démonter fournie par le magasin, nous avons récupéré ces disques parfaitement plats, d'une faible épaisseur et qui résistent très bien à la chaleur. Le disque dur garde son aspect miroir qui permet de vérifier que l'image d'une grille est une grille, à froid comme à chaud, donc il ne se déforme pas. Il présente un seul problème : il est troué en son centre, en conséquence nous utiliserons tout le reste de sa surface.



Le démontage d'un disque dur



L'image d'une grille est une grille

Grâce à cela, nous obtenions un support parfaitement plat et horizontal et nous avons pu commencer notre étude. En 2009, les sables mouvants avaient acheté un sac de microbilles (environ $1\text{ }\mu\text{m}$), nous avons déposé quelques unes d'entre elles sans vitesse initiale sur notre dispositif, elles restent immobiles. Le système a donc passé avec succès le test des microbilles.

Prises de vues.

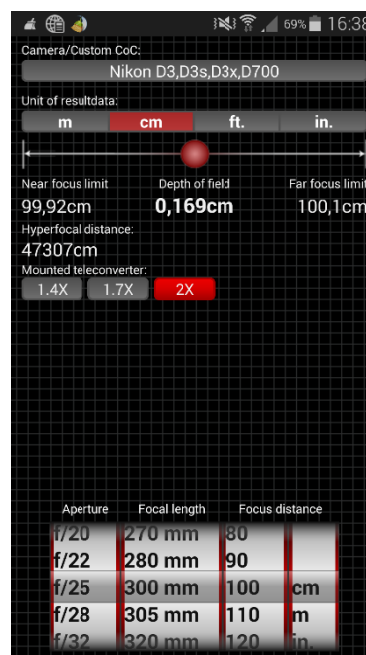
Nous avons effectué un suivi de l'évolution temporelle des gouttes en caléfaction à l'aide d'un appareil photo numérique Nikon D3100, muni d'un téléobjectif macro de 300 mm Sigma et d'un doubleur de focale. Le tout sur un pied réglable et muni de bulles de niveau. La vérification finale d'horizontalité est faite d'après une série de photos test, projetées sur un vidéo projecteur. L'appareil photo est utilisé en mode manuel, et piloté par un PC via un port USB et le logiciel digiCamControl (c'est un logiciel gratuit <http://digiCamControl.com/>), il est indispensable de mettre en marche l'appareil photo avant de lancer le logiciel. La profondeur de champs étant faible, il nous a fallu trouver un compromis.

Nous avons choisi de travailler à 1,000 m, distance mesurée avec un régleur de 1,000 m, entre la face avant de l'objectif et le lieu de dépôt ou notre objet échelle.

Notre objet étant petit, nous utilisons une grande focale, ce qui réduit la profondeur de champ. L'objet étant peu lumineux, nous travaillons avec une grande ouverture (nombre d'ouverture petit), la conséquence est la même. Le temps de pose, lui, est optimisé pour avoir des photos les plus claires possibles. La profondeur de champ est calculée par l'application Android « DoF Calc » pour « depth of field » c'est-à-dire profondeur de champ.



Notre installation



Copie d'écran de l'application Dof Calc

Les vidéos ont été faites :

- Soit à l'aide de nos téléphones portables
- Soit à l'aide de l'appareil photo pour les vidéos lentes 25 images/s ou 4 images par minutes pour les ralentis
- Soit à l'aide d'une caméra rapide Jeulin

Pour donner l'échelle sur nos photos nous utilisons au départ un clou ou un écrou, car ils résistaient bien à la chaleur. Un jour nous avons décidé de faire un objet en cuivre avec le symbole des Olympiades de physique pour personnaliser nos photos et aider à faire la mise au point.

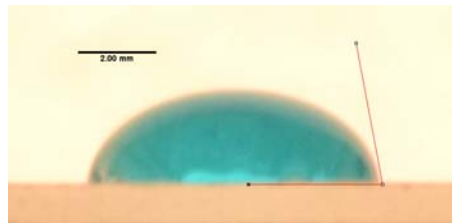


Notre symbole échelle

Il fait 14,4 mm de large au milieu. Depuis la visite de l'ESPCI nous utilisons une règle graduée métallique sur laquelle nous collons des étiquettes qui sont périodiquement renouvelées car elles finissent par brûler.

De la gouttelette à la flaque

Nous avons commencé par étudier le comportement d'une goutte sur une plaque de verre. Lorsqu'on dépose un petit volume d'eau sur une plaque de verre bien propre (lame de SVT neuve) :



Goutte de 70 μ L sur une lame de verre

On s'aperçoit qu'elle ne s'étale pas complètement : elle ne mouille pas complètement car l'angle de contact n'est pas nul mais vaut ici 78° . Cela est dû aux tensions superficielles. C'est également par ce phénomène que l'on explique la présence de ménisque lors d'un contact liquide/solide.



Ménisque formé au contact d'une électrode de pH contre un bécher.

La tension superficielle, γ , s'exprime en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ (ou $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$), sa valeur dépend de la nature du liquide et de la température.

Température ($^\circ\text{C}$)	γ ($10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$)
0	75,66
20	72,80
25	71,97
37	70,01
50	67,91
100	58,85

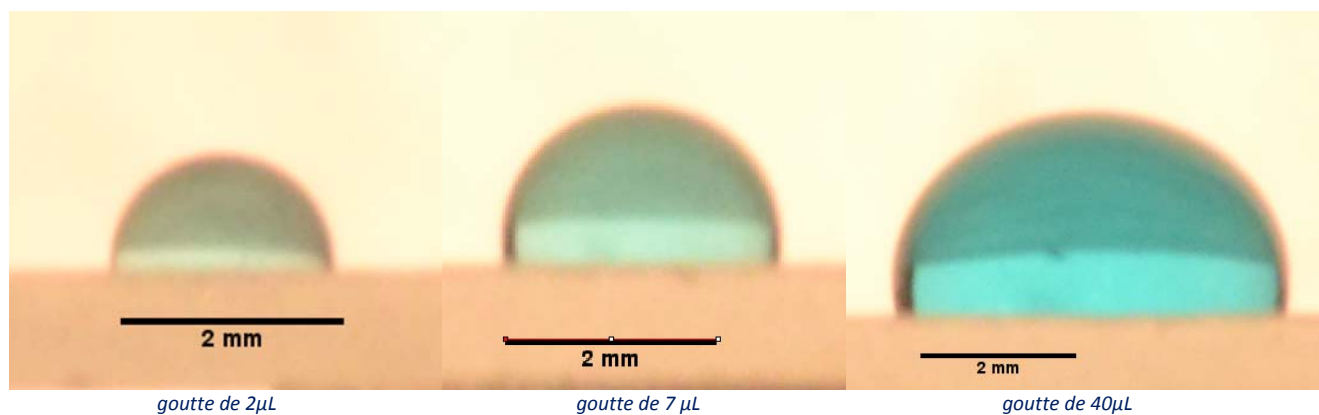
Valeurs pour l'eau selon Internet

Nous avons souhaité voir l'évolution de l'allure d'une goutte en fonction du volume de celle-ci. Pour cela nous avons emprunté un paquet de lames pour microscope à la SVT et deux pipettes automatiques de marque HANA (l'une de 100 μ L et l'autre de 1000 μ L) au laboratoire de biochimie situés juste sous notre local Olympiades.

À température ambiante, $24,2^\circ\text{C}$ ce jour-là, nous avons déposé des volumes croissants d'eau

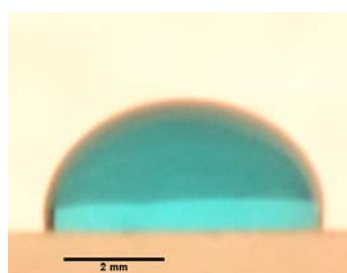
- De 1 à 10 μ L microlitre par microlitre
- De 10 à 100 μ L (de 10 en 10)
- De 100 à 1000 μ L (de 100 en 100)

Certaines gouttes ont été déposées en 3,4, voire 5 ou 6 exemplaires. Chaque goutte a été photographiée dans les secondes suivant le dépôt. Une lame neuve a été utilisée à chaque fois en prenant garde de ne pas mettre les doigts dessus. Les gouttes présentées ici sont colorées avec du bleu de méthylène avec une concentration de 0,1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, les résultats sont identiques avec de l'eau pure mais plus difficiles à présenter.

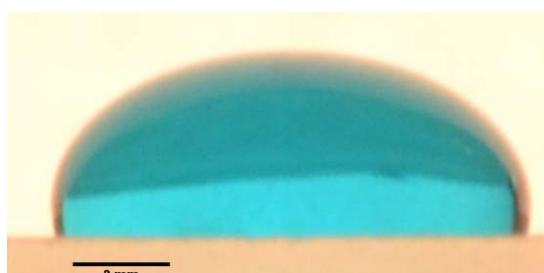


Dans un premier temps, nous constatons que la forme est plutôt sphérique et surtout que le mouillage est partiel, nous émettons l'hypothèse que les lames (de ce lot ?), sont peut-être traitées.

Pour de petits volumes, les forces de tensions superficielles tendent à former des gouttes sphériques, du moins plutôt rondes, le rayon augmente en même temps que le volume déposé.

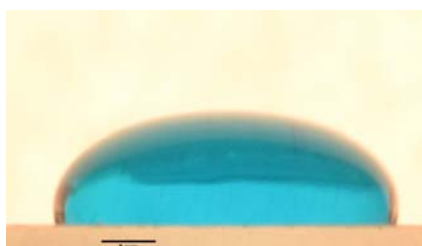


goutte de 50 μ L

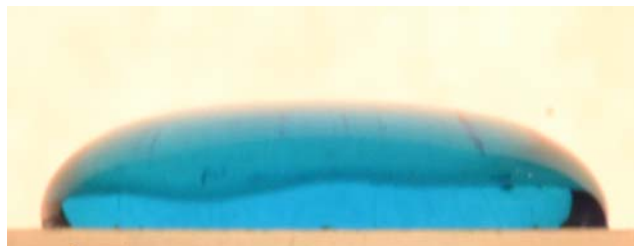


goutte de 200 μ L

Puis les forces de gravité commencent à se manifester : la goutte perd son côté sphérique mais continue de s'élargir.



goutte de 400 μ L

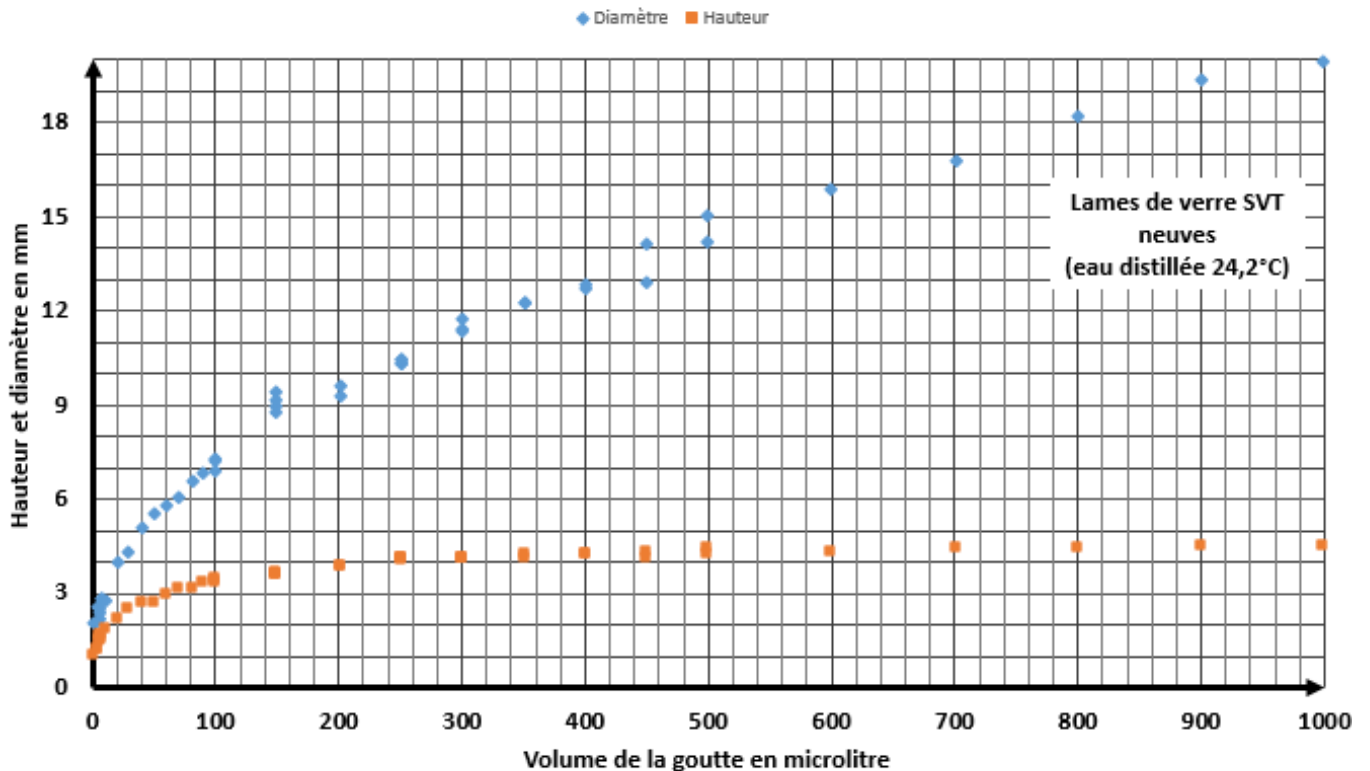


goutte de 1000 μ L

Puis, le volume augmentant, on passe progressivement d'une goutte à une flaque. Nous nous sommes arrêtés à 1000 μ L car au-delà, la plaque n'était plus assez large.

Pour poursuivre notre étude, sur le passage d'une goutte à une flaque, nous avons pris le soin de mettre un objet calibré sous la lame de verre. Cet objet est une cale cubique de 17,53 mm, mesuré au pied à coulisse numérique Facom™ de l'atelier du lycée. Il permet d'étalonner et de mesurer la hauteur et le diamètre en fonction du volume déposé. Le diamètre a été mesuré au niveau de la zone de contact, et également au « plus large », c'est le premier qui est représenté ci-dessous car nous n'avons pas mis en évidence de relation particulière avec le second.

Variation de la hauteur et diamètre d'une goutte d'eau en fonction de son volume



Ce graphique confirme nos impressions visuelles, dans un premier temps la hauteur varie avec le volume pour donner des gouttes rondes, puis dès que la goutte atteint environ 3 mm de diamètre, elle cesse de pousser vers le haut et commence à s'étaler.

Sa hauteur va tendre vers un maximum de l'ordre 4,2 mm, dès lors, la goutte s'étale sous forme de flaque en gardant une épaisseur constante de l'ordre de grandeur de longueur capillaire κ^{-1} .

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho \cdot g}}$$

Où :

- γ est la tension superficielle dans nos conditions d'expérience autour de $72 \cdot 10^{-3} \text{ J/m}^2$,
- ρ , la masse volumique de l'eau $997,299 \text{ kg.m}^{-3}$ à 24°C ,
- g , l'accélération de la pesanteur $9,807 \text{ m.s}^{-2}$ à Boulogne, d'après le site du BRGM et nos téléphones portables.

Numériquement on trouve :

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{72 \cdot 10^{-3}}{997,299 \times 9,807}} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

L'épaisseur d'une flaque est donnée par la relation $e = 2\kappa^{-1} \sin\left(\frac{\theta_E}{2}\right)$, où θ_E est l'angle de mouillage. Ceux que nous avons mesurés variaient de 79° à 105° donc notre $\sin\left(\frac{\theta_E}{2}\right)$ est maximal pour 105° et minimal pour 79° . Ce qui nous donne des épaisseurs respectivement comprises entre 3,4 et 4,3 mm. Nous ne sommes pas très loin, nous allons analyser plus finement ce résultat pour comprendre.

De même, nos nuages de points nous donnent accès à la possibilité de modélisation, mais faute de connaître le modèle auquel il faut se référer nous risquerions de dire des bêtises, nous préférons en discuter avec nos partenaires de l'ESPCI.

Différence de comportement en fonction de la température de la plaque chauffante

Nous avons remarqué très tôt qu'une goutte avait un comportement très différent en fonction de la température de la plaque, en fait, bien avant notre engagement dans les Olympiades, dès que nous avons utilisé des plaques chauffantes au lycée.

Si la plaque est froide, c'est-à-dire qu'on ne sent pas de sensation de chaud en la touchant, donc une température entre 15 et 37°C, l'eau s'évapore sans qu'on ne remarque rien de spécial. La plupart du temps, on n'y prête même pas attention, c'est pourtant une situation que l'on rencontre chaque jour. L'eau passe imperceptiblement de l'état liquide à l'état de gaz, par des échanges avec l'air environnant, le substrat sèche.

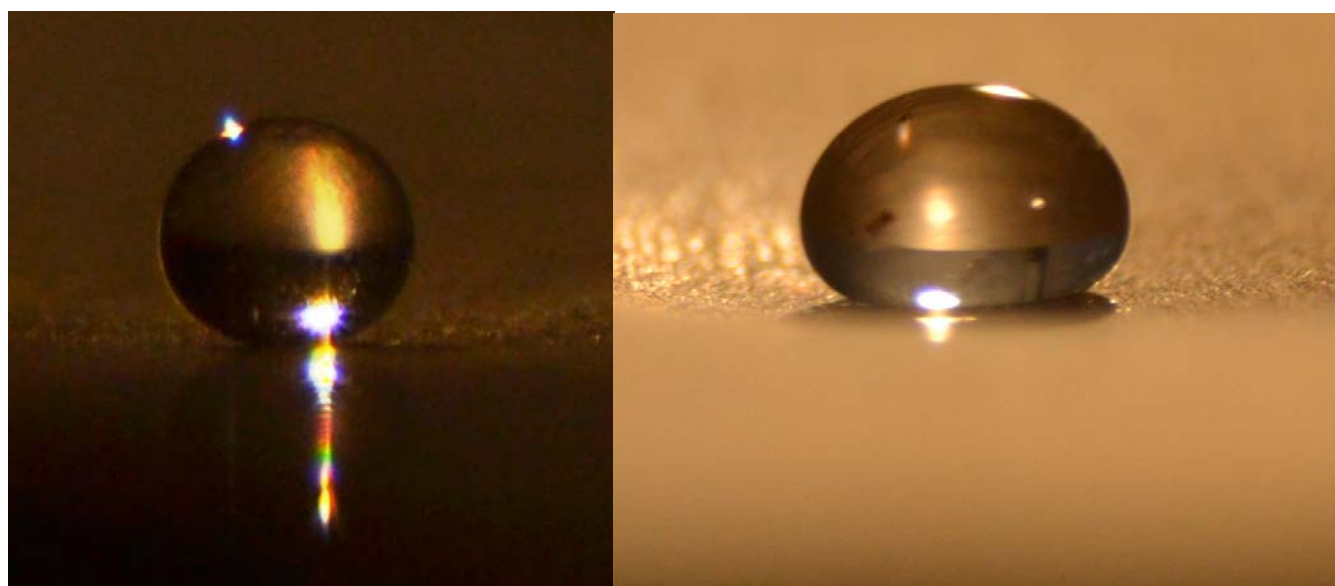
Si la plaque est chaude à très chaude (vers 60°C on ne peut plus tenir fermement un objet dans les mains), on « voit » l'eau s'évaporer, plus exactement, on constate que la quantité d'eau diminue rapidement. Il en est de même jusque 100°C, l'eau s'évapore de plus en plus rapidement. Si la quantité est assez importante, on peut voir quelques bulles de gaz s'en échapper.

Si maintenant la plaque a une température supérieure à 100°C, on pourrait s'attendre à la voir bouillir. Mais cela dépend de la température. Si elle est voisine de 100°C, disons jusque 120-130°C, la goutte se dégaze, se met à bouillir et disparaît. Si la température est très élevée, plus de 200°C (on l'a observé sur du zinc en fusion à près de 420 °C), la goutte continue de vivre, elle s'évapore lentement, c'est la caléfaction. En fait entre la goutte liquide et la plaque se forme une couche de vapeur d'eau qui conduit très mal la chaleur. La goutte est maintenue sur un coussin de vapeur qui se renouvelle sans cesse, un peu comme un palet autoporteur utilisé en TP ou un Hovercraft dont le son reste dans nos mémoires d'enfants.



*Un aéroglisseur ayant assuré la liaison transmanche jusqu'en 2000
(Source internet)*

Suivant le volume d'eau et la température, on peut observer des comportements différents.



Eau en caléfaction sur une plaque chaude

Cet effet a été décrit par Johann Gottlob LEIDENFROST en 1756 dans « *De Aquae Communis Nonnullis Qualitatibus Tractatus* » (Traité sur certaines propriétés de l'eau), la caléfaction est internationalement connue sous le nom d'effet LEIDENFROST.

A titre anecdotique, Herman BOERHAAVE, le mentionnait déjà en 1732 dans « *Elementa chemiae* ».

Evolution de la forme de la goutte en caléfaction.

Aspect qualitatif

Pour étudier l'évolution de la forme de la goutte en caléfaction, au fur et à mesure de sa diminution de volume, nous avons décidé de réaliser des séries de photographies toutes les 3 secondes. C'est un choix dicté par un équilibre entre :

- Le temps de photographie ($1/200^{\text{ème}}$ de seconde),
- Le temps de transfert de la photo (rapide théoriquement d'après la notice : 2 fois le temps d'exposition, dans la pratique : près de 1s),
- L'économie de la batterie,
- Le nombre de photographies (4 à 5 minutes correspondent à 120 à 150 photographies, ce qui prend rapidement de la place).

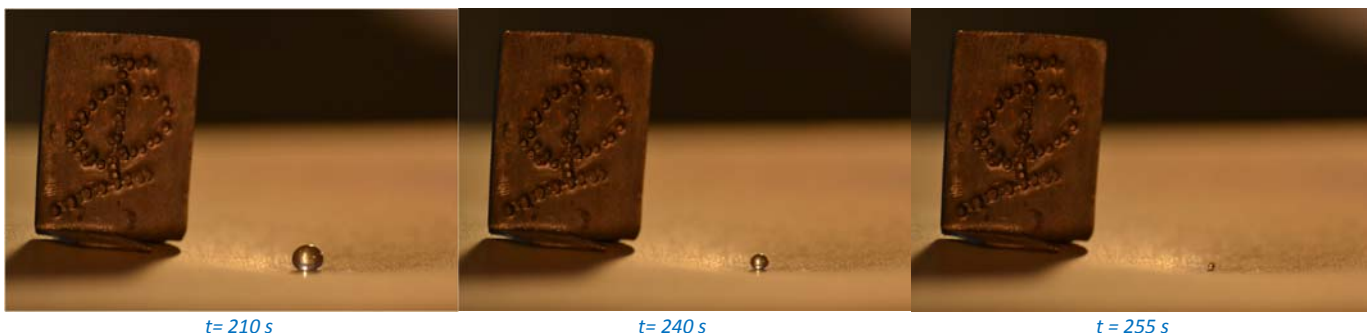
Nous décrivons ici l'évolution d'une goutte de 500 μL sur une plaque à 236°C (très légèrement en creux).



Dans un premier temps, la goutte a un profil en calotte ovoïde. Au cours du temps, la diminution du volume se traduit par une diminution de la longueur, la hauteur est constante. Nous présenterons des résultats quantitatifs ci-après.



Puis, dès que la longueur vaut pratiquement deux fois la hauteur, les deux grandeurs vont diminuer ensemble, en même temps, jusqu'à ce que les deux grandeurs soient égales, on a alors une goutte sphérique.

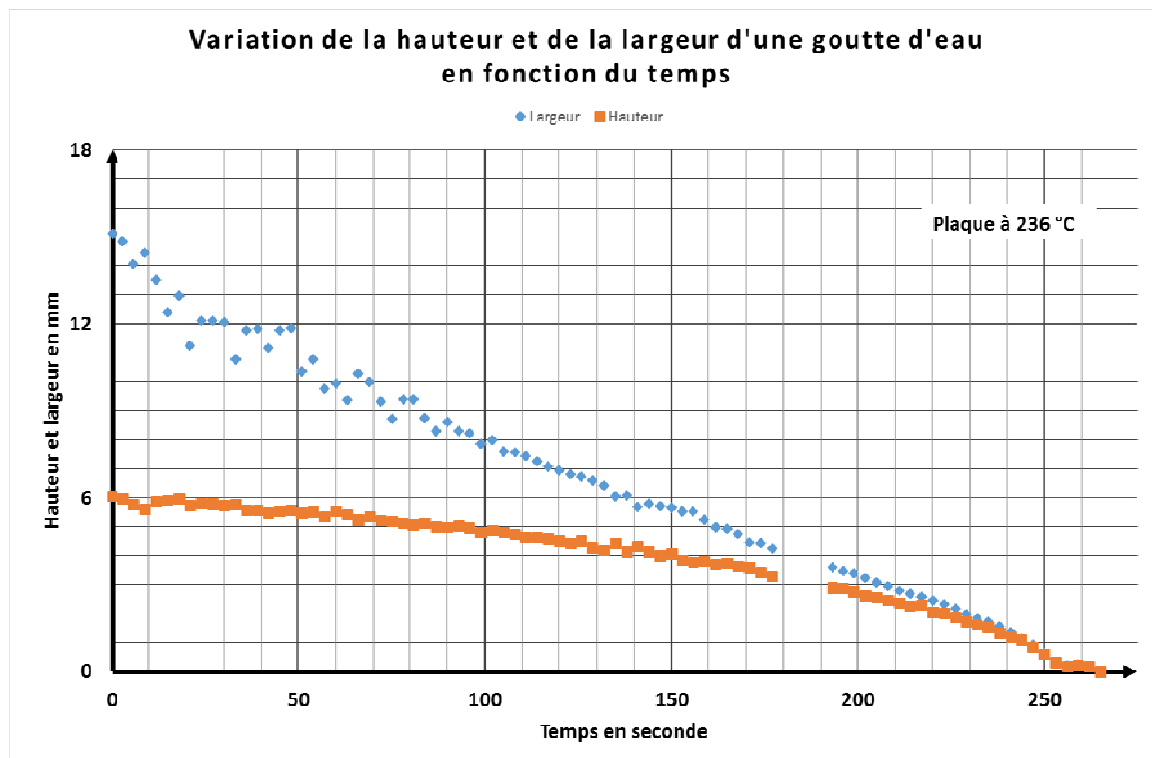


Dès lors, l'unique dimension est le rayon, qui ne cesse de décroître jusqu'à la disparition de la goutte.

Ces différentes phases ont toujours été observées, il y a quelques variations horaires, minimes, liées, à notre avis, aux perturbations de la température de la plaque et à l'utilisation de l'horloge de l'appareil photo pour les photos. Théoriquement cela devrait toujours être un multiple de 3 secondes, ce n'est pas toujours le cas, un mystère de l'informatique ? Nous n'en savons rien, mais nous avons préféré éliminer ces séries de photos.

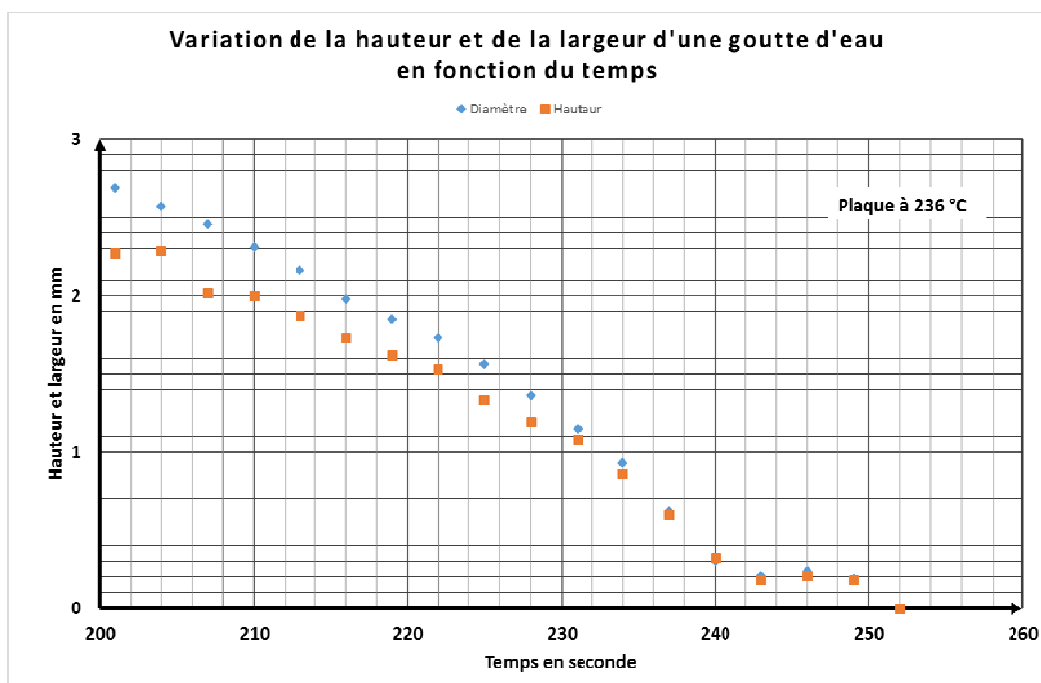
Aspects quantitatifs.

Nous avons mesuré les dimensions des gouttes : la hauteur et le diamètre, à partir des mêmes photographies, sur lesquelles figure notre objet étalon de 14,40 mm (mesuré au micromètre).



Ce graphique traduit bien nos impressions visuelles :

- Dans un premier temps, on a bien le diamètre qui diminue, alors que la hauteur reste assez stable. Notons que cette fois la goutte est plus haute que pour une goutte froide, l'angle de mouillage explique une bonne partie de la surélévation, mais pas intégralement. On remarque également des variations aléatoires de diamètre, c'est parce que la goutte se met à osciller, c'est l'une des prochaines pistes à explorer.
- Quand le diamètre vaut sensiblement deux fois la hauteur, les deux diminuent ensemble. Cette phase dure jusqu'aux environs de 220 s. Nous avons un trou dans notre courbe, car lors d'une ultime vérification avant le concours national, nous nous sommes aperçus que l'appareil photo ne s'était pas déclenché pendant 16s. Faute de temps de refaire une série de mesures nous laissons un blanc pour les photos manquantes.
- Pour la dernière phase nous décidons de zoomer.



Contrairement à ce que nous pouvions penser, la gouttelette n'est jamais sphérique, elle est toujours un petit peu aplatie.

Durée de vie d'une goutte en fonction de la température

La température étant un paramètre important dans l'évolution d'une goutte, nous avons décidé de refaire « la classique » courbe de la durée de vie d'une goutte en fonction de la température.

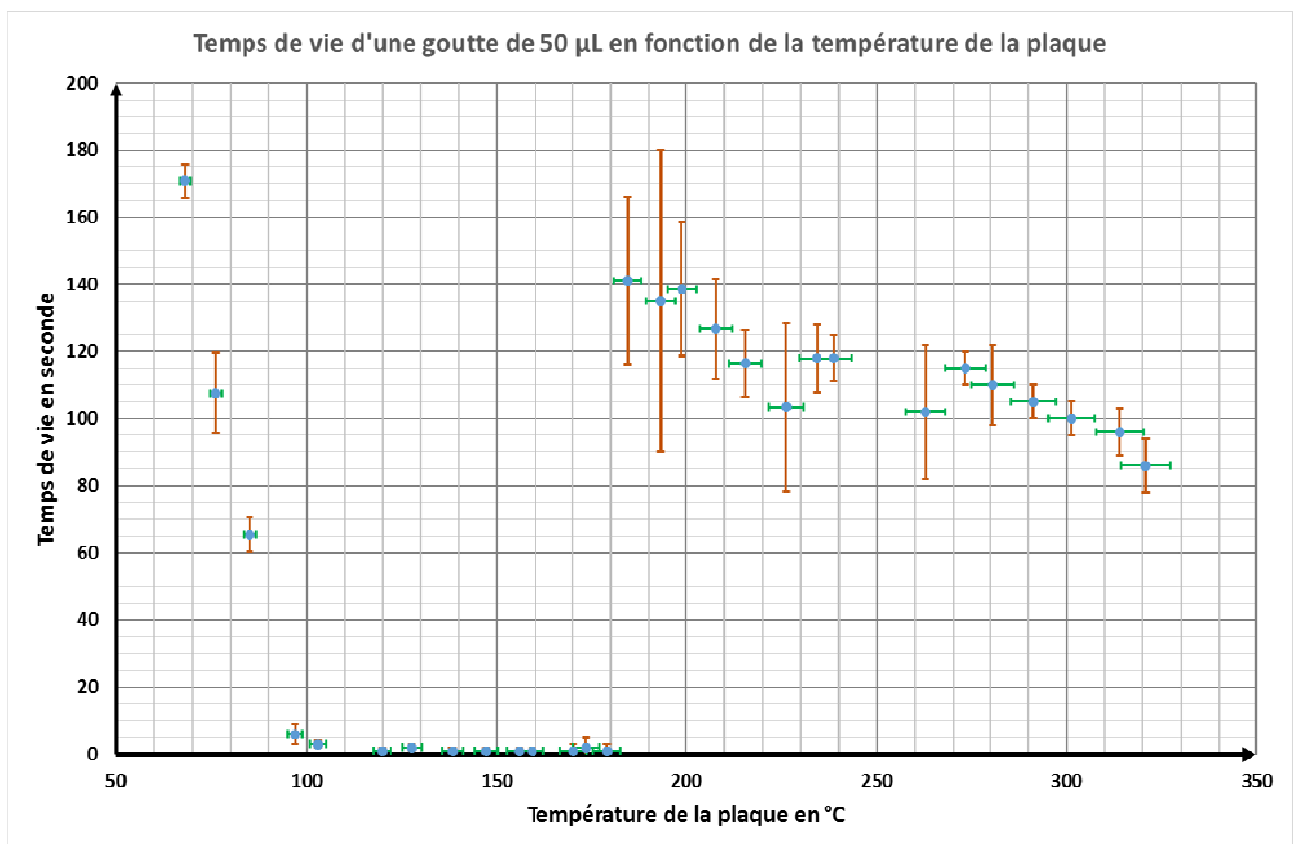
Pour cela nous avons décidé de mesurer la durée de vie d'une goutte de 50 μL à l'aide d'un chronomètre. La durée de vie est mesurée de la fin du dépôt sur la plaque à l'instant de disparition de la goutte, le critère étant l'absence de visibilité à l'œil nu.

Le chronomètre a une précision de $1/100^{\text{ème}}$ de seconde mais nous avons arrondi à la seconde car les temps sont assez longs et pour tenir compte du temps de réflexe.

Plutôt que de chercher à obtenir une température précise, nous avons utilisé une plaque stabilisée à une température « intéressante ». Vu le système de régulation intégré et le thermomètre utilisé, les professeurs de Génie Electronique et Génie Electrique du lycée, ont estimé que la précision était de l'ordre de 2%.

Nous avons multiplié les mesures jusqu'à 20 pour des temps très courts, mais nous nous sommes limités à 10 voire 7 pour des temps plus longs car $10 \times 100 \text{ s} = 1000 \text{ s}$ soit un quart d'heure pour un point ! Nous avons ensuite calculé les moyennes et les écarts-types dans Excel, nous avons choisi de représenter une barre d'incertitude de 1,96 écart type, on peut donc considérer que nos résultats sont acceptables à 95%.

Voici la courbe obtenue :



Nous avons compris pourquoi tout le monde utilise la même courbe dans la bibliographie.

En dessous de 100 °C pas de problème, il s'agit d'être patient. Plus la plaque est froide plus la goutte vit longtemps.

Entre 100 et 180°C, les gouttes disparaissent très vite.

Au-delà de 200°C, l'évolution est assez monotone, la gouttelette vit plus de 100 s sans problème.

C'est entre 180 et 200 °C que les problèmes commencent, car la vie est parfois tumultueuse, la goutte peut se mettre à bondir voire exploser, cela donne des résultats qui peuvent paraître chaotiques. Dans cette zone, nous avons 3 séries de 20 mesures, or c'est là que les écarts sont les plus importants.

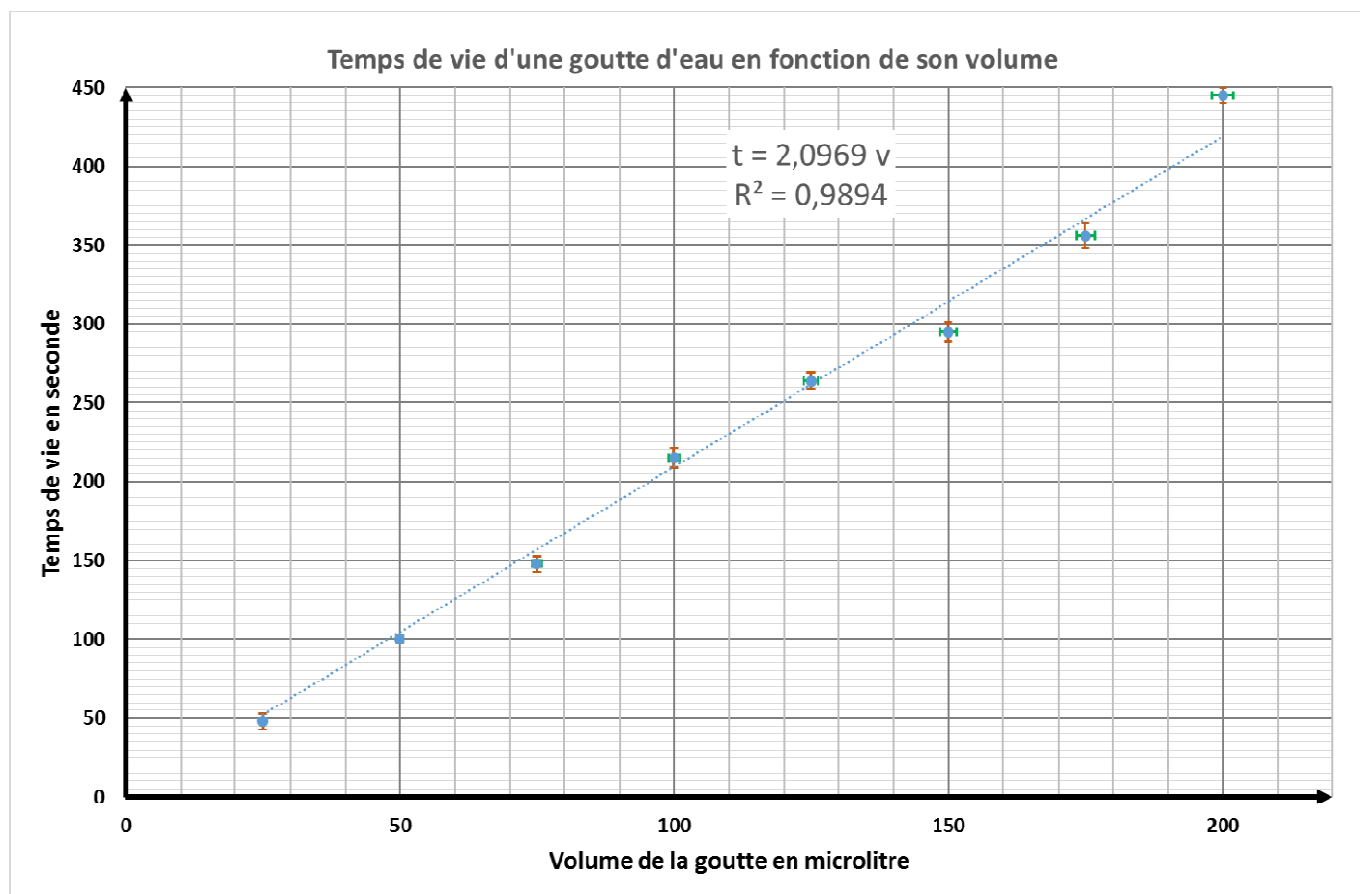
C'est tout à fait classique selon M. Philippe BOURRIANNE, doctorant à l'ESPCI, et selon lui l'état de surface de la plaque a une importance. Faute d'avoir un nombre infini de disques durs, nous avons presque toujours utilisé le même et il a parfois été nécessaire de donner un petit coup de chiffon pour réparer une bêtise, cela peut laisser des marques microscopiques et perturber les mesures. Selon lui notre pic est à 192°C.

Cette courbe qui montre l'effet LEIDENFROST est en fait moins classique qu'elle ne peut l'apparaître dans les bibliographies.

Durée de vie d'une goutte en fonction de son volume

Nous avons choisi d'étudier également la durée de vie d'une goutte en fonction de son volume. Nous avons décidé de travailler à haute température, c'est-à-dire au-delà de 300°C car, à ces températures, on a des résultats très reproductibles et une goutte peut vivre « assez longtemps » sur du zinc en fusion.

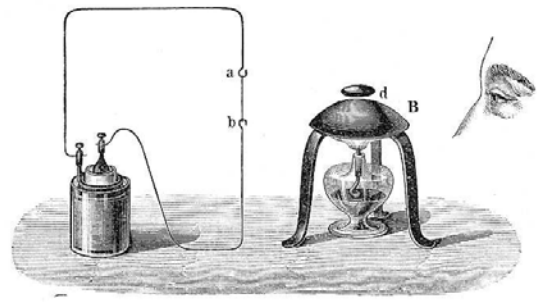
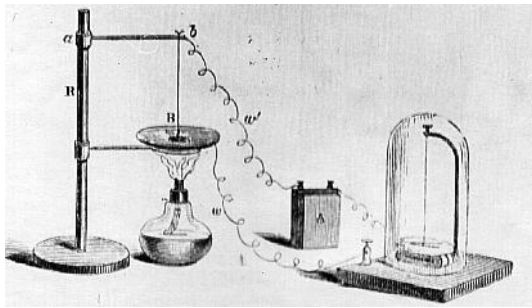
Nos mesures ont été faites à 328°C.



Nous avons remarqué qu'à cette température, le temps de vie en seconde était de 100 s pour une goutte de 50 μL . Ces résultats issus de moyennes faites sur 5 mesures, montrent qu'aux erreurs d'expériences près, il y a presque une proportionnalité entre le volume et le temps de vie, du moins dans le domaine 25 à 200 μL .

Mesure de l'intervalle entre la goutte et la plaque

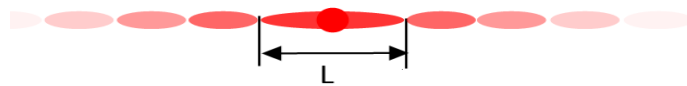
Johann Christian POGGENDORFF a montré, à l'aide de solution légèrement salée, qu'il n'y avait pas de continuité électrique entre la goutte en caléfaction et la plaque chauffante. John TYNDALL a montré qu'on pouvait voir un faisceau de lumière entre la goutte et la plaque.



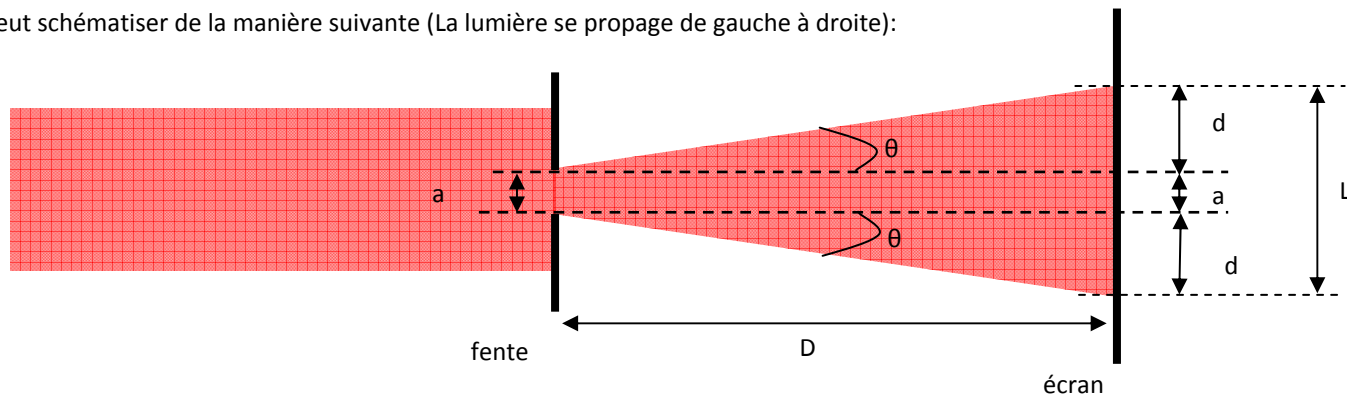
Ces expériences relatées dans « Heat: a mode of motion », J. Tyndall, (1875). p. 157 et 158

Nous avons eu l'idée de mesurer cet intervalle à l'aide de la diffraction que nous venions de voir dans le cadre du programme de TS.

Si on éclaire avec un laser une fente de largeur, a , on observe alors sur un écran placé à une distance, D , une figure de diffraction.



On peut schématiser de la manière suivante (La lumière se propage de gauche à droite):



L'angle θ étant petit, on peut écrire $\tan \theta = \theta$

De même si a est très petit devant L ($a \approx 0,1$ mm, et $L \approx 10$ cm soit 1000 fois plus) on peut écrire que :

$$L = d + a + d = 2.d + a \approx 2.d$$

$$\text{Soit } d = \frac{L}{2}$$

$$\text{Or } \tan \theta = \frac{d}{D} = \frac{\frac{L}{2}}{D} = \frac{L}{2.D}$$

Soit finalement :

$$\theta = \frac{L}{2.D}$$

Avec :

- θ l'angle de diffraction aux bornes de la tache centrale
- L la largeur de la tache centrale
- D la distance objet diffractant – écran

Et on démontre que :

$$\theta = \frac{\lambda}{a}$$

Où :

λ est la longueur d'onde du laser utilisé (en m) et a la taille de l'objet diffractant (en m).

L'angle est alors d'autant plus grand que l'objet a une taille de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde. Cet angle est inversement proportionnel à la taille de l'objet et proportionnel à la longueur d'onde.

Nos premiers essais.

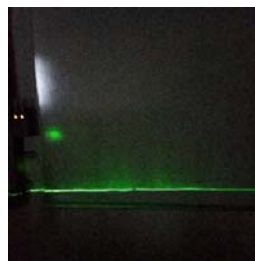
Naïvement, nous avons cru que cela se passerait comme en TP, 20 - 30 minutes de mesures, une bonne heure d'exploitation des résultats. Pour des raisons de visibilité nous avons choisi dans un premier temps de travailler avec un laser vert ($\lambda = 530 \text{ nm}$).

Nous aurions eu des figures plus grandes (de près de 20%) avec un laser rouge, $\lambda = 632 \text{ nm}$. Mais l'œil humain est beaucoup plus sensible au vert, en particulier dans la pénombre, d'où notre choix.

Nous avons donc visé l'interface de la goutte avec la plaque parfaitement horizontale, plus exactement le lieu de dépôt habituel. Le problème est que la moindre vitesse initiale communiquée à la goutte se traduit par un mouvement rectiligne uniforme, comme pour un palais à coussin d'air sur une table plane. Nous avons essayé de filmer pour intercepter une image, ce fut un échec. Sur conseil de notre professeur, nous avons intercalé une tige de verre sur le trajet entre le laser et la goutte, cela a pour effet d'étaler le faisceau de manière très large.



Laser seul



laser + tige

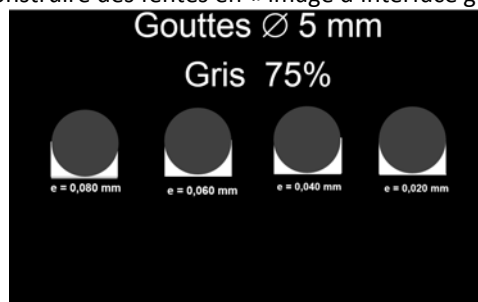
Image sur un écran placé à 3,76 m (un tableau blanc) : rien de convaincant.

Lors de la visite de l'ESPCI, que nous avons faite pendant les vacances de Toussaint, le 28 octobre 2014, M. Philippe BOURRIANE, nous a confié que c'était une manipulation délicate qui n'avait été faite que par des manipulateurs hors-pair. Il nous a conseillé d'y aller progressivement et de commencer par modéliser une goutte pour voir l'allure de la figure.

Nos premières modélisations, nos premiers résultats.

Modélisations diapositives.

Comme en TP nous avons eu l'idée de construire des fentes en « image d'interface goutte/plaque ».



Exemple de diapositive avant la déduction finale pour mettre à l'échelle.

Nous avons réduit au format diapositive 24/36 mm, nous pouvions changer la transparence de la goutte en modifiant le niveau de gris. Nous pouvions mettre sur une même feuille n modèles, avant d'imprimer sur un transparent en haute densité d'impression noir et blanc, qualité photo.

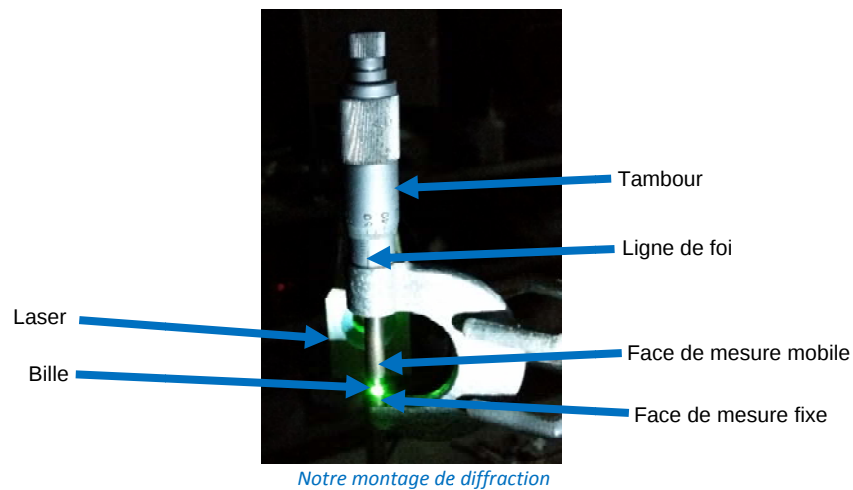


La planche à imprimer

L'idée pouvait paraître bonne, mais les résultats furent très décevants, le laser est bien stoppé par les zones noires, mais on ne voit pas de figures de diffraction apparaître, même en imprimant des fentes simples, du moins pas avec les imprimantes de notre lycée.

Modélisation billes/palmer.

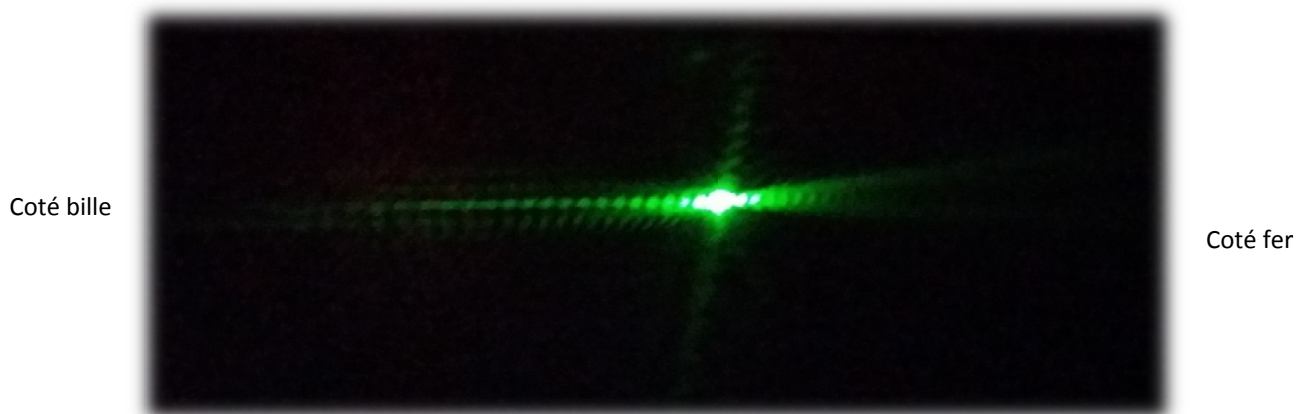
Nous avons ensuite eu l'idée de d'étudier la diffraction par une ouverture créée entre la face de mesure fixe d'un micromètre et une bille collée à la superglue sur la face de mobile de celui-ci.



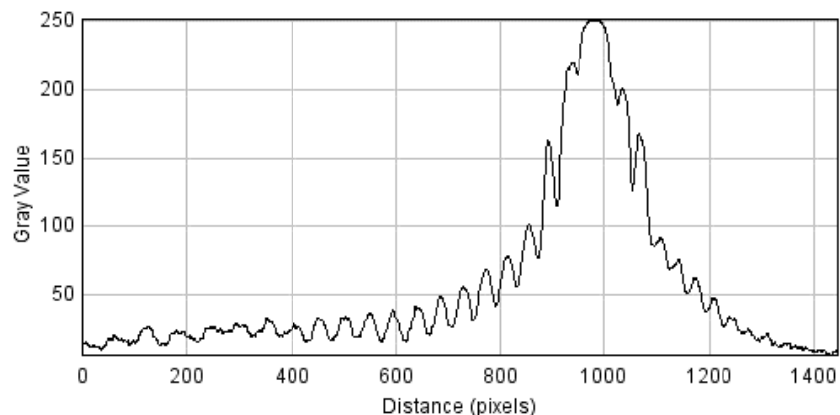
Nous avons obtenu cette fois des figures reproductibles et dont les dimensions caractéristiques dépendaient de l'intervalle entre les deux faces. Ces figures ont été obtenues à une distance de 5,124 m, distance mesurée du centre de la figure au centre du « point de contact ».

A chaque variation de la position du tambour, nous avons fait une photo de celui-ci et une photo de la figure de diffraction avec un téléphone portable Galaxy S5, par sécurité la photo a souvent été faite en 2 ou 3 exemplaires. Les figures de diffraction seront exploitées avec le logiciel libre ImageJ (<http://imagej.nih.gov/ij/>), et une mini notice sur la page de M. José BICO au PMMH (<http://www.pmmh.espci.fr/~jbico/tuto-imageJ.pdf>).

Pour de « larges » ouvertures, on retrouve des figures classiques



Avec un profil classique



Profil de l'image précédente donnée par le logiciel ImageJ

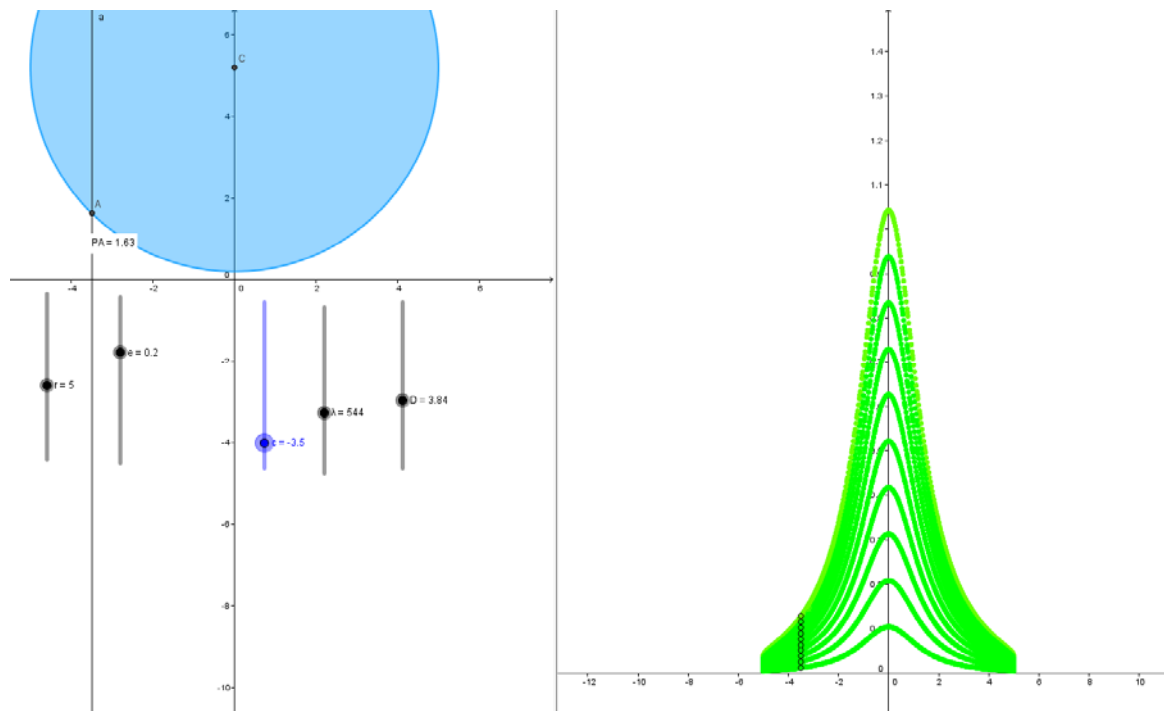
Dans d'autres cas, pour de très petites ouvertures, l'image est moins classique, voire surprenante !
Il y a apparition de courbe avec une pointe vers le centre de la figure

Coté bille



fer.

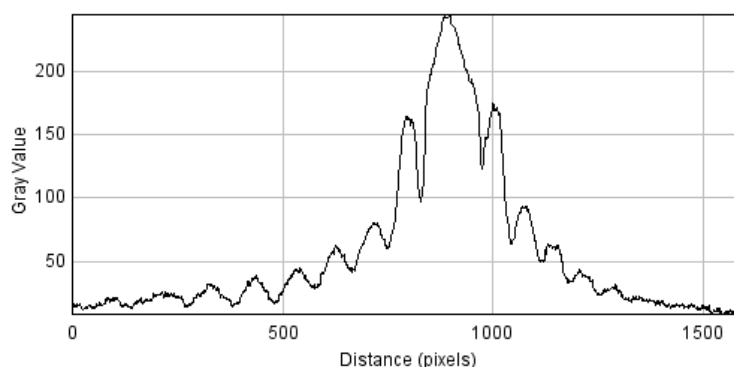
Faute de pouvoir faire une solution mathématique, nous avons fait une simulation avec GéoGebra



Simulation des maxima de diffraction, pour une bille de 5 mm de diamètre ($\lambda = 544$ nm, $D = 3,84$ m, un écartement de $200\mu\text{m}$)

D'après notre simulation, on devrait avoir des courbes pointues vers l'extérieur, car la diffraction est plus marquée au centre de la sphère. Nous interprétons cela comme une probable réflexion sur la surface de la bille.

Cependant l'analyse de la figure avec ImageJ nous semble correcte, quand l'intervalle entre la bille est plus petit, la figure de diffraction est plus grande.



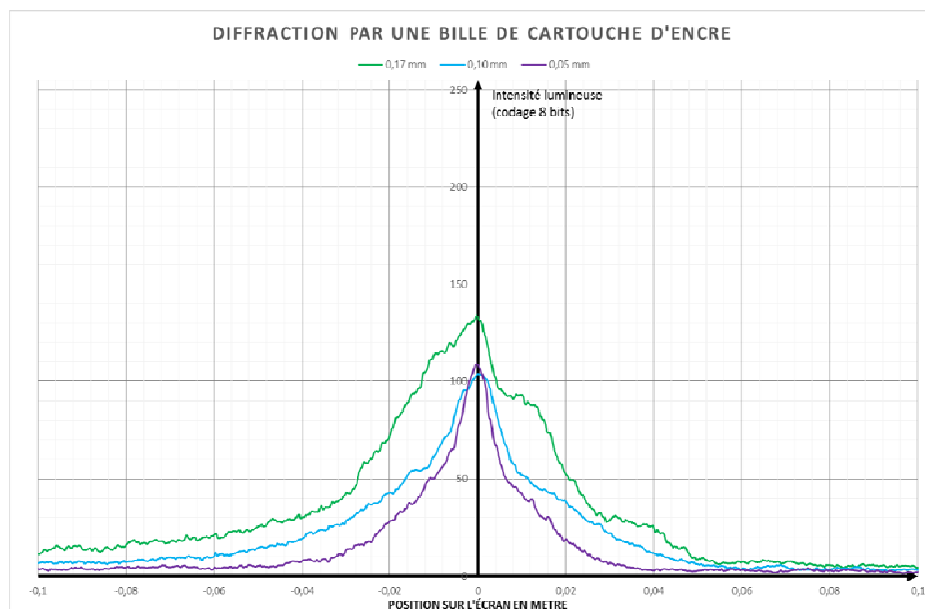
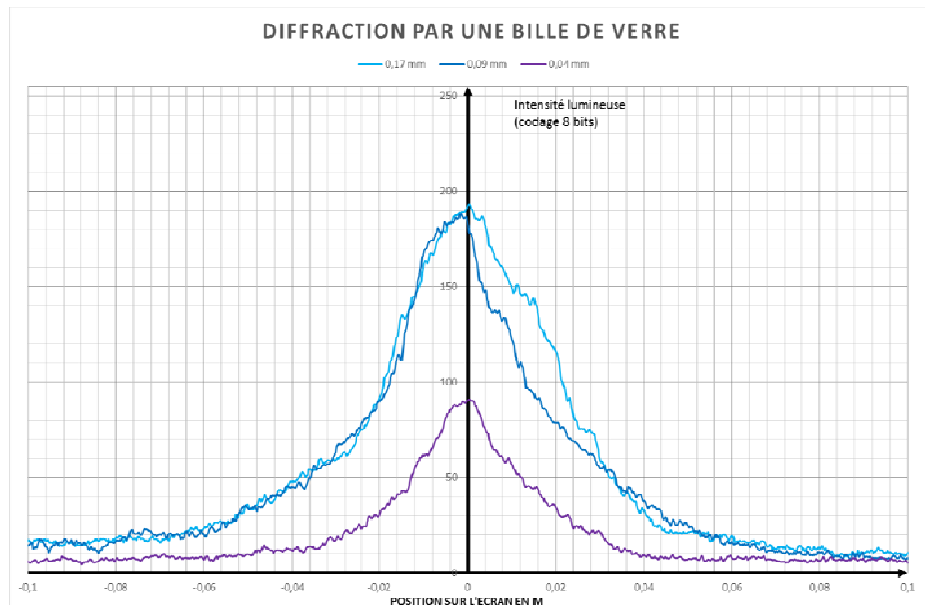
Analyse de la photo précédente à l'aide d'ImageJ

Nous avons effectué trois séries de mesures :

- La première avec une bille en acier d'un diamètre de 4,95 mm de diamètre
- La seconde avec une bille en verre utilisée en chimie d'un diamètre de 5,06 mm
- La troisième avec une bille de cartouche d'encre Waterman bleue de 3,39 mm de diamètre

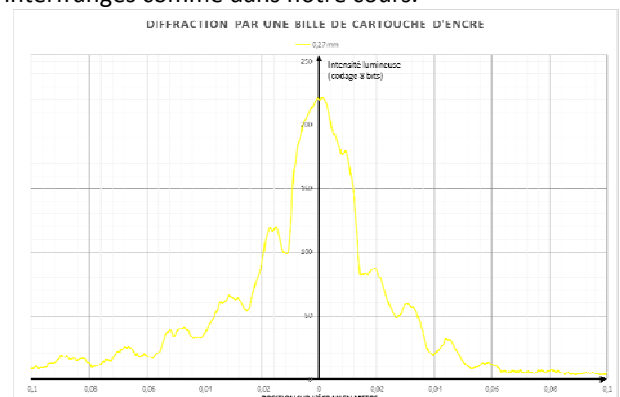
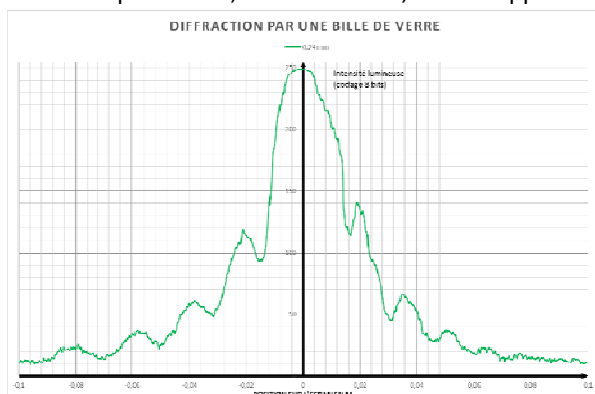
Ces mesures ont été faites avec les micromètres différents sur lesquels les billes ont été collées à la superglue.

Pour de petits espaces, entre la bille et la face de mesure fixe, inférieurs à 0,20 mm on n'observe pas de figure de diffraction avec des interférences classiques, mais simplement une tache centrale dont la taille dépend de l'ouverture, plus l'ouverture est large plus la frange est large et brillante. On est loin d'avoir un résultat en $1/a$ comme dit notre cours.

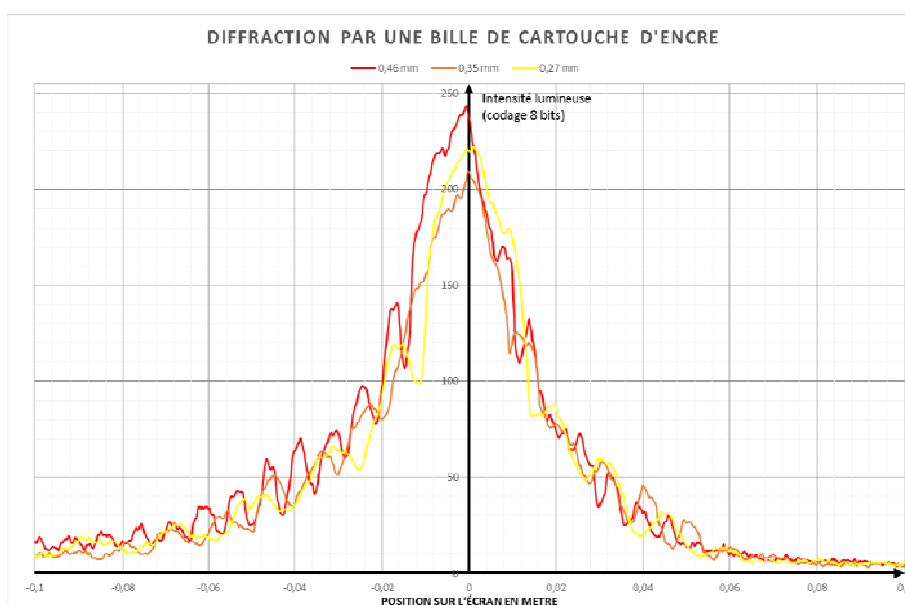
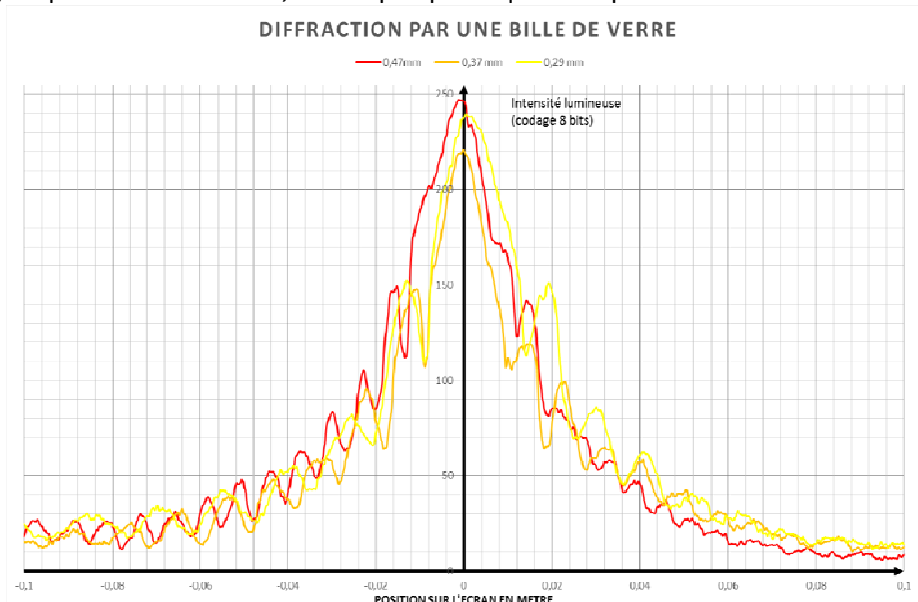


Pour la bille de cartouche d'encre, on observe le même phénomène, mais avec moins de luminosité. Nous avons travaillé avec le même laser, nous interprétons cela comme dû à une différence de matériaux ou d'état de surface.

En revanche à partir de 0,20 mm environ, on voit apparaître des interférences comme dans notre cours.



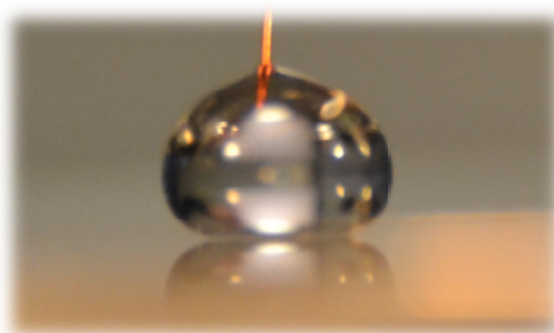
De plus, l'interfrange dépend de l'écartement, elle est plus petite quand l'espace entre la bille et la mâchoire augmente.



Les allures sont les mêmes pour nos différents types de billes, les résultats semblent indépendants de la nature de celle-ci.

On peut vérifier la relation $i = \frac{\lambda \cdot D}{a}$

Nous avons nos courbes d'étalonnage, nous sommes passés à la mesure avec une goutte. Nous avons retenu les leçons apprises lors de notre visite de l'ESPCI, c'est beaucoup plus simple de mesurer sur une goutte immobile, pour cela, il suffit d'introduire dans la goutte un petit fil métallique, par capillarité la goutte tient toute seule, elle n'est plus sensible aux courants d'air et autres perturbations. Selon les spécialistes, cela ne modifie pas l'espace entre la goutte et la plaque.



Une goutte en caléfaction immobilisée à l'aide d'un petit fil.

Diffraction sur une goutte stabilisée

Nous avons donc repris notre montage, mais cette fois en stabilisant la goutte avec un petit fil.

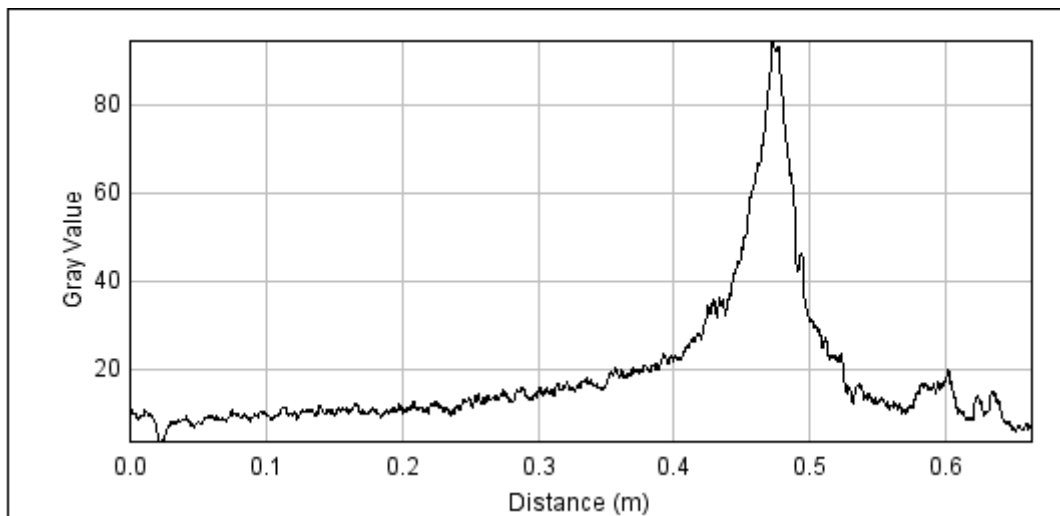


Notre dispositif

Dans un premier temps, nous avons fait un test, en incidence rasante, sans goutte : stupéfaction! Nous avons une figure de diffraction par un bord.



L'analyse par ImageJ nous donne :



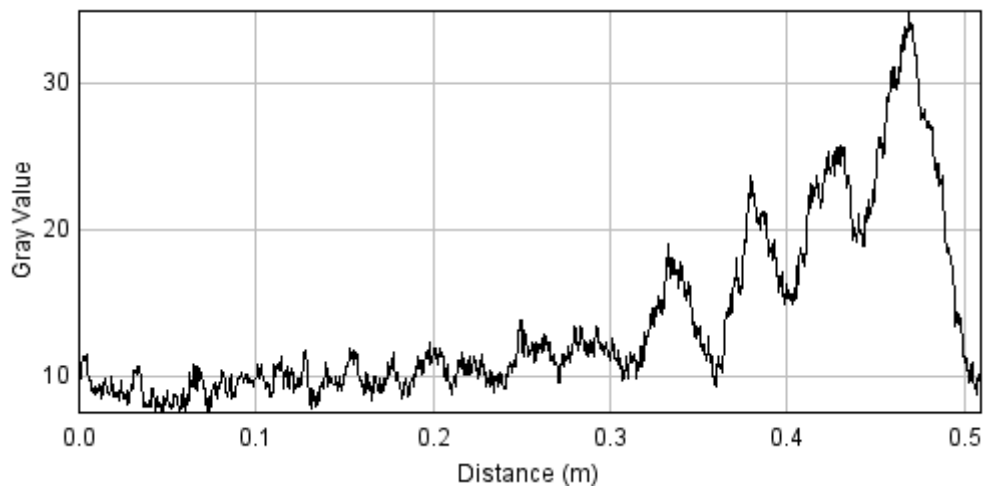
Analyse de la diffraction par un bord dans ImageJ

Mais avec une goutte, on obtient :



Figure de diffraction obtenue avec une goutte immobilisée

L'analyse avec imageJ donne :



Analyse de la diffraction par la goutte immobilisée

Même si cet essai n'est pas exceptionnel, on peut y remarquer une certaine périodicité spatiale de 4,2 cm, mesurée avec ImageJ directement.

Cet interfrange, i , de 4,2 cm nous permet de calculer l'intervalle entre la goutte et la plaque : par application numérique, on trouve :

$$a = \frac{\lambda \cdot D}{i} = \frac{531 \cdot 10^{-9} \times 5,12}{4,2 \cdot 10^{-2}} = 6,5 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 65 \text{ } \mu\text{m}$$

C'est la valeur trouvée pour cette goutte. Nous avons remarqué qu'elle variait au cours du temps : nous envisageons de faire une étude en fonction du temps.

C'est l'ordre de grandeur de ce qui nous a été annoncé à l'ESPCI.

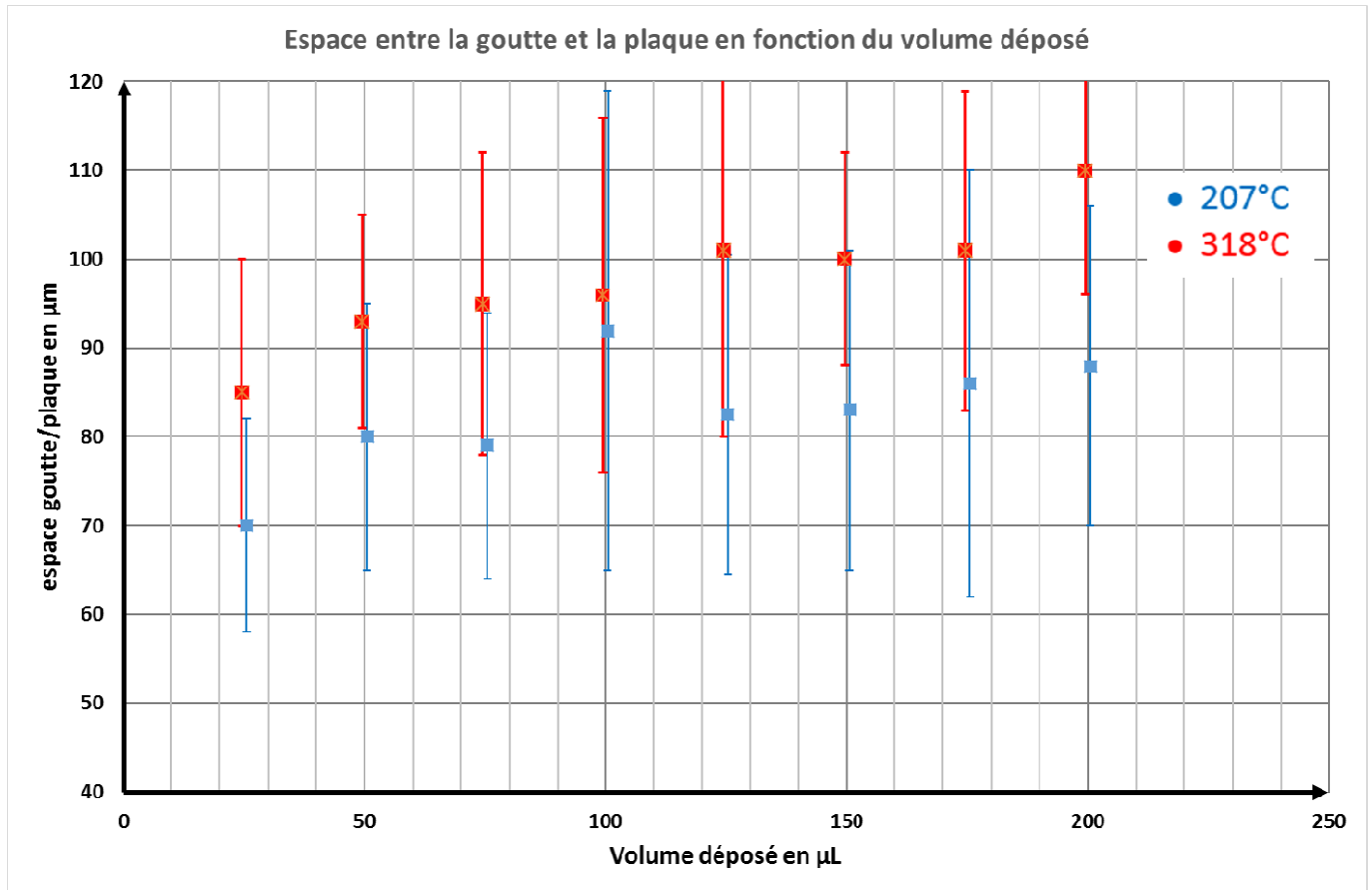
Nous envisageons une autre méthode plus directe à partir de l'analyse de photographie, comme le fait le PMMH.



Evolution de l'espace entre la plaque et la goutte en fonction de son volume

Nous nous sommes demandé si le volume de la goutte avait une influence sur l'intervalle entre la goutte et le support. En effet nous avons vu précédemment lorsque que le volume d'une goutte augmente, sa hauteur tend vers une limite liée à la hauteur capillaire, donc la pression exercée par la goutte devrait être constante, du moins nous semble-t-il.

Nous avons effectué deux séries de mesures : l'une à 207°C et l'autre à 318°C, en faisant varier le volume déposé d'une goutte stabilisée avec un fil. Puis nous avons procédé comme précédemment. Les résultats sont consignés dans le graphique ci-dessous.



Nous avons une forte dispersion des résultats pour des conditions données, car il n'est pas facile de toujours déposer rapidement la goutte calibrée sur le fil. Le temps de faire la mesure, le volume de la goutte évolue. Nous nous sommes contentés de faire au minimum deux mesures et trois au maximum (nous avons également décidé d'éliminer nos premiers résultats d'essais).

On peut tout de même constater deux choses :

- La température de la plaque joue un rôle dans la taille de l'intervalle entre la goutte et la plaque. Ici, quand la température est plus élevée, l'intervalle est plus important. Ce n'est pas avec deux températures que nous allons pouvoir établir une loi, il faudra sûrement faire une étude systématique de l'influence de la température sur l'intervalle pour un volume donné.
- Le volume de la goutte, lui, a une influence plutôt inattendue à nos yeux. Lorsque le volume de la goutte augmente, l'intervalle entre celle-ci et la plaque augmente. Ce n'est pas proportionnel, ni affine : cela semble plus être une loi type puissance, mais faute d'avoir un modèle théorique : nous ne nous avançons guère.

Pour conclure plus simplement : le volume de la goutte et la température de la plaque influent sur l'espace entre la plaque et la goutte en caléfaction.

Caléfaction sur support superhydrophobe

Notre visite à l'ESPCI nous a invité à travailler sur d'autres matériaux que les métaux classiques. Une autre spécialité du PMMH est l'étude des surfaces hydrophobes ou superhydrophobes¹ depuis que M. David QUÉRÉ a étudié l'effet Lotus, connu dans la littérature depuis Pliny l'Ancien.

Obtention de surfaces superhydrophobes

Le PMMH utilise, entre autres, un superhydrophobant acheté au Japon. Pour plus de simplicité, nous avons choisi d'acheter le kit découverte Ultra Ever Dry commercialisé la société TAP France (<http://ultraeverdry-tap.com/>). C'est simple d'utilisation, mais il faut **LIRE TRES ATTENTIVEMENT LA NOTICE**, et procéder comme suit pour obtenir de bons résultats.

1. Obtenir une surface plane métallique.
2. Dégraisser à l'alcool puis à l'acétone
3. Sécher à l'étuve 30 min à 105°C

Maintenir hors poussière dans une boîte propre et sèche.

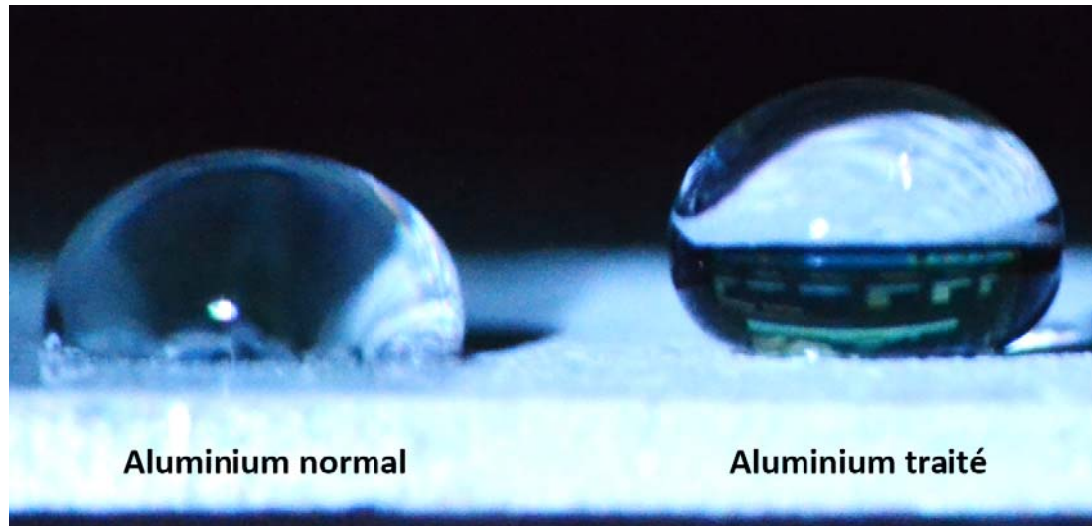
L'application doit se faire en deux couches à l'aide d'un spray (ou d'un pistolet à peinture).

4. Il faut d'abord bien agiter le flacon, **comme c'est indiqué sur la notice**. Nous nous sommes imposés un temps d'agitation, même de secouage, d'une minute. La solution doit devenir homogène et de couleur gris clair.
5. Sous la hotte, on transfère dans le spray. Et on continue d'agiter
6. On pulvérise pour avoir une couche régulière, en agitant régulièrement le spray.
7. On laisse sécher une heure sous la hotte (après avoir remis la solution dans la bouteille d'origine)

On répète ces 4 phases 3 ou 4 fois, le but est d'avoir une couche fine et régulière d'apprêt.

On peut ensuite passer à la couche définitive avec les mêmes instructions. Après 3 ou 4 traitements, la plaque est mise en séchage final dans une étuve à 105°C, puis stockée dans une boîte propre et sèche. Les plaques sont alors prêtes à l'utilisation, elles sont blanches comme des plaques de chromatographie.

Ce qui surprend à la première utilisation ce sont les gouttes qui roulent sur une plaque froide légèrement inclinée. On est dans le cas de l'effet Lotus qu'étudiait M. David QUÉRÉ.



Gouttes de 50 µL sur différentes surfaces

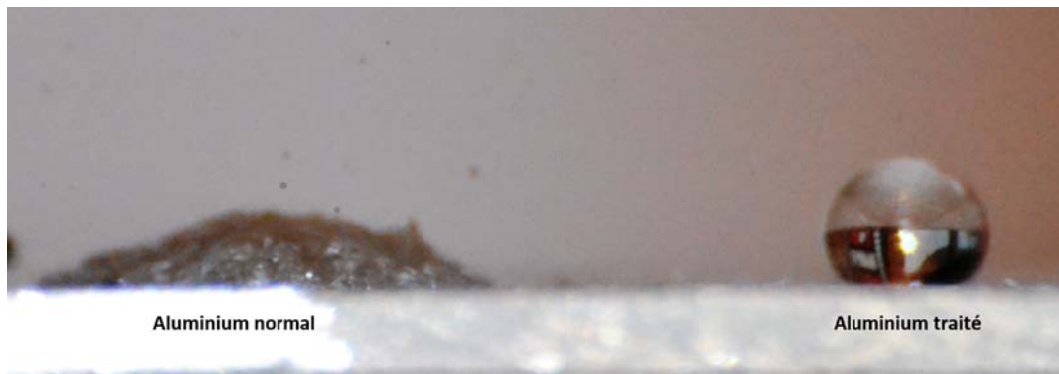
Les angles de mouillage sont très différents suivant la nature du support. Dès qu'on lève le bord de la plaque, la goutte sur la surface traitée roule, la seconde reste accrochée.

Nous avons voulu tester le comportement à « chaud ». Nous mettons des guillemets car obtenir une plaque chaude est plutôt une opération longue et délicate, un essai à une température de plus de 350°C en a transformé une en lui donnant une teinte dorée, nous avons fait le choix de ne plus faire de test à des températures aussi élevées.

¹ On parle de superhydrophobie lorsque l'angle de mouillage est 150°

Etude de la durée de vie d'une goutte sur une plaque superhydrophobe

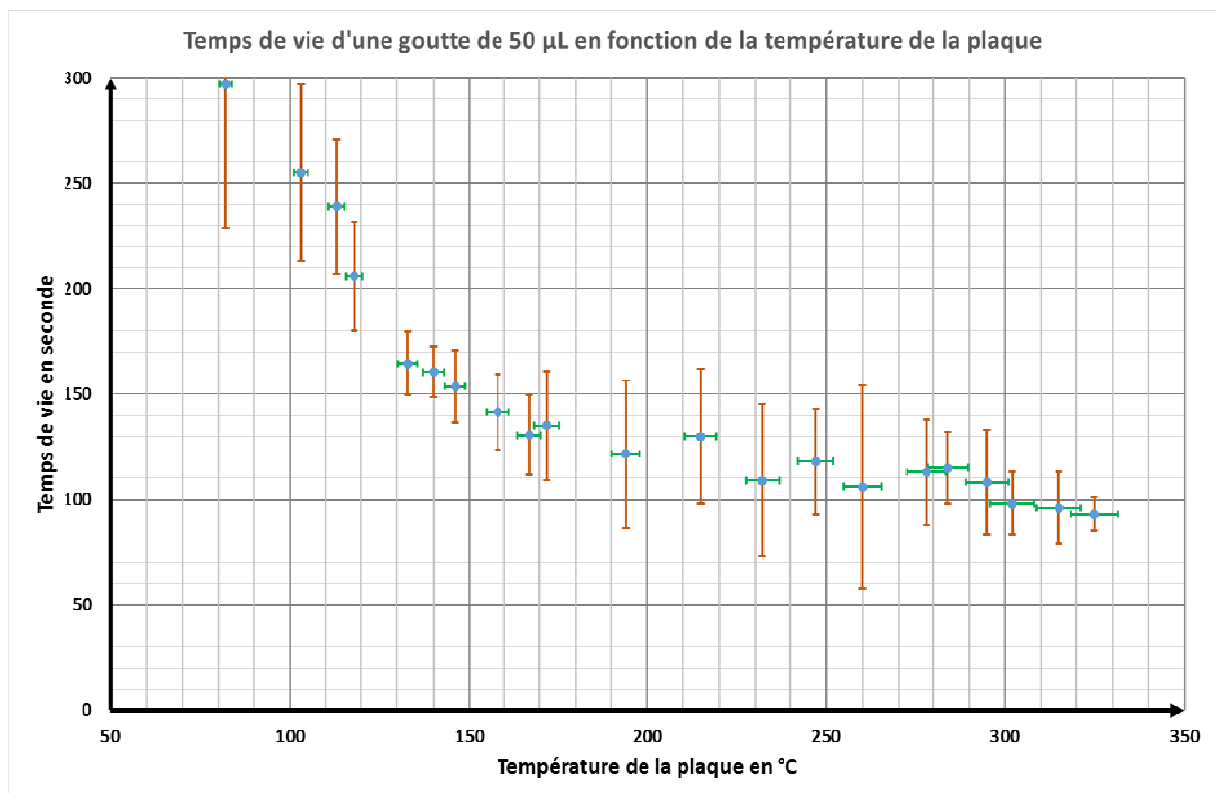
Nous avons très rapidement observé des différences de comportement en « basse température ».



Comportement d'une goutte d'eau en fonction de la nature de la plaque à 126°C

A cette température (126°C), l'eau sur la plaque bout instantanément sur une plaque normale, elle s'évapore très progressivement sur une surface superhydrophobe.

Nous avons choisi d'étudier la durée de vie d'une goutte de 50 μL en fonction mesurée au thermocouple à la surface de la plaque superhydrophobe. Les résultats sont consignés dans le graphique ci-dessous.



Les résultats sont plus « étendus », on a une plus grande dispersion des mesures, nous pensons que cela est dû au traitement de la surface qui n'est pas parfaitement homogène. Cependant, on peut noter qu'ils sont très différents de ceux obtenus sur une plaque métallique ordinaire.

- Les temps de vie sont bien supérieurs à ceux obtenus sans traitement superhydrophobe pour des températures inférieure à 100°C, la zone de contact étant plus réduite, il y a moins de transferts thermiques, la goutte vit plus longtemps.
- Surtout on peut remarquer qu'à une température comprise entre 100 et 180°C, on a encore de l'eau qui existe à l'état liquide alors que pour une surface métallique simple elle se serait vaporisée très vite. Il existe donc une zone nouvelle dans laquelle la caléfaction est possible, à une température inférieure au seuil de LEIDENFROST, c'est la caléfaction « froide ».
- Au-delà de 190°C nous retrouvons des résultats analogues à ceux sur une plaque métallique.

Nous avons réalisé des séries d'images que nous espérons pouvoir analyser pour le concours national (après le bac blanc).

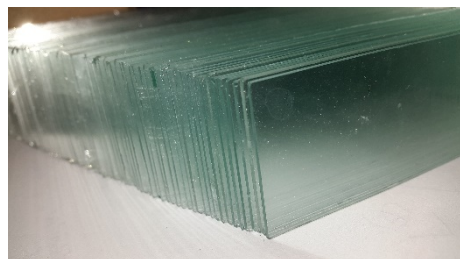
Elaboration de profil en toit d'usine

Lors de notre visite à l'ESPCI, M. Philippe BOURRIANNE nous avait beaucoup parlé de la dynamique d'une goutte placée sur un « ratchet », un profil en toit d'usine. Malheureusement avec la rénovation des programmes des sections STI2D, les machines-outils qui ont fait jadis la réputation de notre lycée ont disparu. C'est un savoir-faire qui n'est plus enseigné dans notre lycée, les professeurs qui l'enseignaient font aujourd'hui autre chose. Il nous a fallu un peu d'imagination. Les dimensions qu'on nous avait données pour l'expérience de HINKE sont sur le schéma ci-dessous :



Dimension d'un profil en toit d'usine un « ratchet »

En rangeant une pile de livre de notre bibliographie, nous avons eu l'idée de faire un « empilement couché », on prend une pile d'objet de la même taille des livres ou des lames métalliques et on incline lentement.



Mise en parallèle



Début d'inclinaison



égalisation

Nous ne présentons ici que le principe avec des lames usagées et ayant beaucoup vécu. Les lames sont ensuite scotchées puis placées dans un bac de sable jusqu'à moins d'un centimètre du haut. On balaie avec un pinceau l'excès de sable, on graisse avec de l'huile, on attend une heure. Puis on coule dessus un plâtre bien liquide et surtout on attend le séchage. Il faut attendre quelques jours avant de mettre à sécher à l'étuve à 90°C pour commencer, puis 105°C, une heure à chaque fois. Pour démouler c'est simple, on enlève le scotch puis on réussit à enlever une lame, puis deux ... puis toutes. On a alors un moule en creux dans lequel on coule du zinc en fusion.



Coulée de zinc dans le moule en plâtre positionné dans le bac de sable

La profil est ensuite découpé proprement, nettoyé à la lime douce, puis éventuellement traité.



Un « ratchet » brut

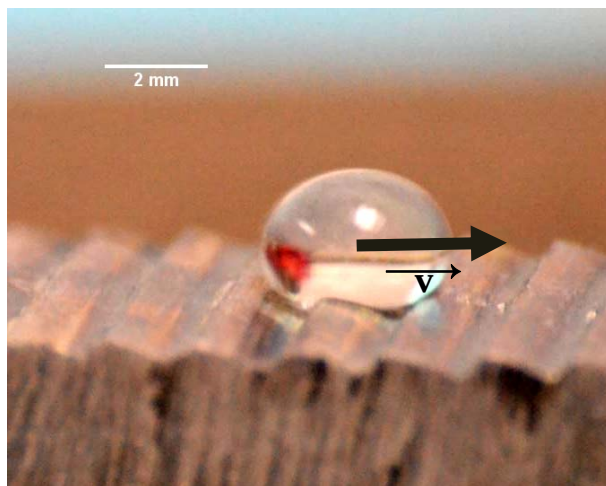


Un « ratchet » fini et traité (d'où sa couleur blanche)

Caléfaction sur un profil en toit d'usine.

L'expérience de HINKE consiste à déposer une goutte calibrée sur un profil en toit d'usine chauffé. En dehors de l'obtention de ce profil en toit d'usine le « ratchet », la grande difficulté est d'obtenir une parfaite horizontalité, non plus de la plaque mais du profil. Dans notre cas, la pièce étant obtenue par moulage, il y avait bien peu de chance d'obtenir un dessous bien plat. C'est M. Fabrice FRANCOIS, professeur de topographie en BTS Génie Civil au lycée, qui nous a prêté un niveau à bulle de précision avec un très grand rayon de courbure : pour l'utiliser, il faut savoir être très patient.

Et là, après des mois d'effort à comprendre pourquoi et comment une goutte est immobile sur un support, on a le plaisir de la voir se déplacer.



Goutte se déplaçant sur un profil en toit d'usine

Nous sommes actuellement en train de faire des mesures de vitesse à partir d'enregistrements avec un plan moins resserré car d'après nos premières mesures la vitesse est centimétrique à décimétrique. Nos valeurs vont 3,6 à 12,7 cm.⁻¹. Une autre chose que nous avons également noté c'est que la température du support semble être un facteur ayant une influence sur la vitesse de déplacement de la goutte. Plus la plaque est chaude, plus la vitesse est grande, plus c'est spectaculaire. Lors du concours régional nous avons poussé la plaque chauffante à son maximum, l'effet fut maximal, avant que le support ne fonde vers 420°C, il nous a fallu une petite vingtaine d'heure pour reconstruire de nouveaux profils.

Nous avons également fabriqué des profils en toit d'usine traité de manière superhydrophobe. Là aussi on a bien un mouvement.



Mouvement d'une goutte sur un profil superhydrophobe (issu d'une vidéo)

Ici on a le même phénomène mais on y parvient à des températures assez basses, notre record est de 108°C.

Conclusion

Lorsqu'on augmente le volume d'une goutte déposée sur une plaque, elle change de géométrie passant progressivement à une flaque de hauteur quasi constante liée à la hauteur capillaire.

Lorsqu'une goutte est déposée sur une plaque chaude, le comportement diffère selon la température de la plaque :

- En dessous de 100°C, elle s'évapore lentement
- Entre 100°C et 170-190°C, selon la nature et l'état de la surface sur laquelle elle est déposée, elle s'évapore en bouillant violemment
- Au-delà du seuil appelé température de LEIDENFROST, l'eau peut rester à l'état de goutte qui s'évapore progressivement.

C'est la caléfaction : un phénomène qui a été décrit en 1756 par J. LEIDENFROST. L'eau est maintenue sur un coussin de vapeur.

Dans nos conditions expérimentales habituelles, son épaisseur est de l'ordre de 70 μm , distance que nous avons mesurée par diffraction d'un faisceau laser. Nous avons montré qu'il dépend du volume initial de la goutte et de la température de la plaque. La goutte s'y évapore progressivement en changeant de géométrie partant d'une calotte ovoïdale, on obtient une quasi-sphère. Dans un premier temps c'est essentiellement le diamètre qui diminue, puis lorsque la goutte atteint une taille critique, diamètre et hauteur diminuent de concert, on est dans un état sphéroïdal. Pour de petits volumes (de 25 à 200 μL) nous avons montré qu'il semble y avoir une relation de proportionnalité entre le volume et le temps de vie.

Après une visite de l'ESPCI, nous nous sommes intéressés à la caléfaction sur des surfaces rendues superhydrophobes. Dans ce cas on a la persistante d'une goutte à l'état sphéroïdal de la température ambiante jusqu'à la température de fusion du support. On a une disparition du palier entre 100°C et la température seuil de LEIDENFROST : on parle de caléfaction froide. Nous étudions actuellement l'évolution de la géométrie des gouttes en caléfaction froide.

Pour terminer, nous avons fabriqué des profils en toit d'usine (« ratchet » en anglais) par fusion de zinc dans des moules en plâtre. Lorsqu'on y dépose des gouttes :

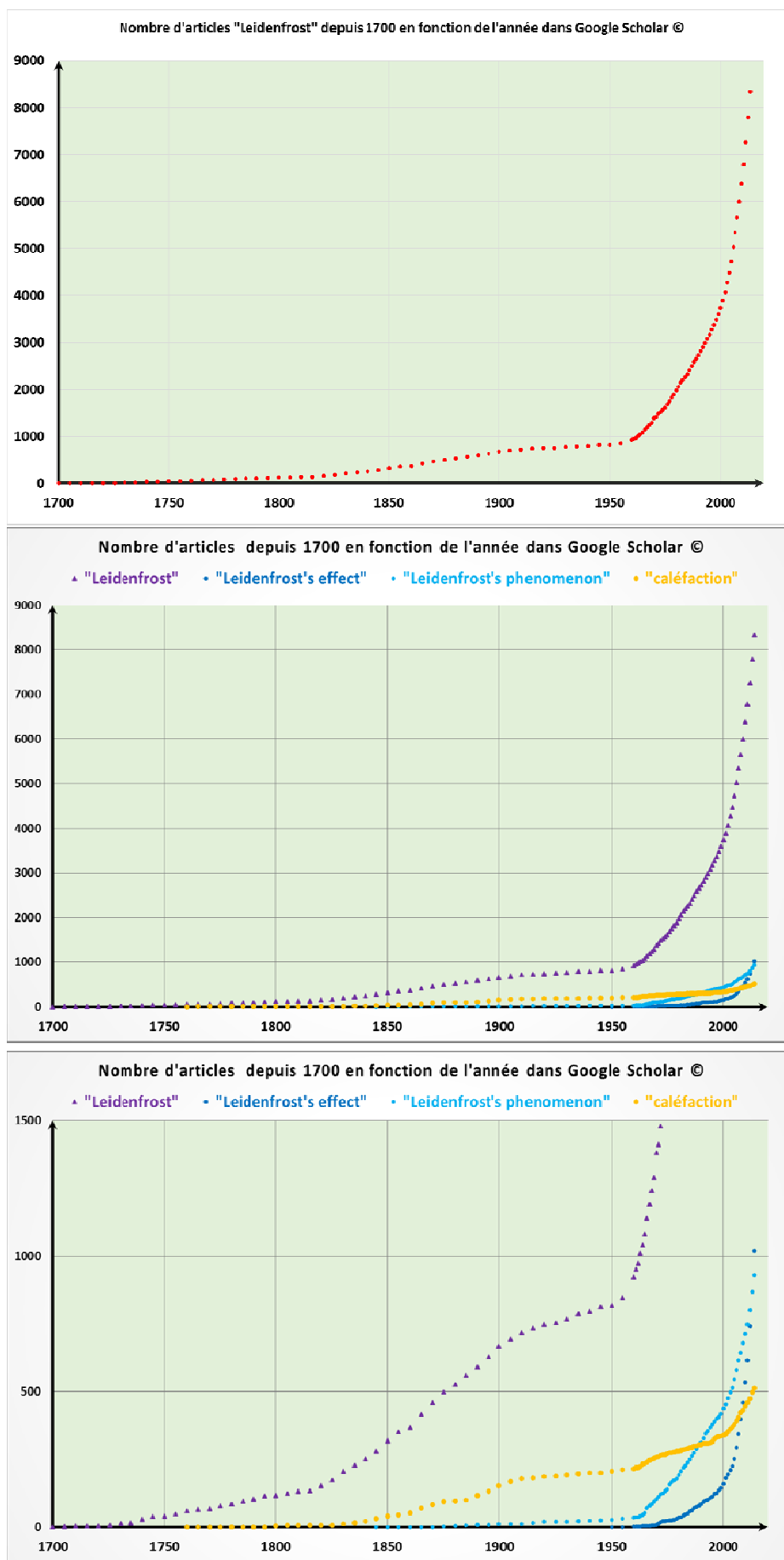
- Lorsqu'il est métallique, la goutte s'y déplace à une vitesse centimétrique à décimétrique. La température étant visiblement un facteur influant sur la vitesse de ce qui nous semble être un mouvement rectiligne uniforme.
- Lorsqu'il est rendu superhydrophobe, on observe un déplacement dans le même sens à des températures où la caléfaction décrite par LEIDENFROST est impossible. Nous étudions actuellement les paramètres qui influent sur ce phénomène.

Finalement la caléfaction, que nous pensions relégués au rang des curiosités de laboratoire amusantes, intéresse une grande communauté de chercheurs qui cherchent soit à éviter la caléfaction soit à faire léviter des gouttes. Car les problèmes de mouillage, de dépôts de salissures, de corrosion des surfaces ... sont des problèmes dans beaucoup d'industrie. Notre visite à l'ESPCI nous a montré qu'il y avait d'autres méthodes pour faire léviter des gouttes. La caléfaction « froide » permet dans sa version statique d'éviter par exemple que des aliments en cuisson « très basse température » n'adhèrent aux récipients et interagissent avec lui. Dans sa version dynamique, elle permet un transport à des températures qui seront peut-être un jour biocompatible, il est envisageable par exemple de faire un convoyeur pour des cellules vivantes.

Bibliographie

1. AUSSILLOUS, Pascale et QUÉRÉ, David. *Properties of liquid marbles*. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 2006, vol. 462, no 2067, p. 973-999.
2. BERTOLA, Volfango. *Viscoelastic Leidenfrost drops*. In : Proc. 22nd European Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Como, Italy. 2008.
3. BIANCE, Anne-Laure, CLANET, Christophe, et QUÉRÉ, David. *Leidenfrost drops*. Physics of Fluids (1994-present), 2003, vol. 15, no 6, p. 1632-1637.
4. BICO, J., TORDEUX, C., et QUÉRÉ, D. *Rough wetting*. EPL (Europhysics Letters), 2001, vol. 55, no 2, p. 214.
5. BICO, José, MARZOLIN, Christian, et QUÉRÉ, David. *Pearl drops*. EPL (Europhysics Letters), 1999, vol. 47, no 2, p. 220.
6. BICO, José, THIELE, Uwe, et QUÉRÉ, David. *Wetting of textured surfaces*. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2002, vol. 206, no 1, p. 41-46.
7. BICO, José. *Élasto-capillarité: Poils mouillés, Origamis, Cloques*. 2011. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
8. BOURRIANNE, Philippe, DUPEUX, Guillaume, CLANET, Christophe, et al. *Propulsion on a superhydrophobic ratchet*. Bulletin of the American Physical Society, 2013, vol. 58.
9. CLANET, Christophe, CLAVIN, Paul, BOHR, Tomas, et al. *Nappes, Gouttes, Ménisques et Bulles*.
10. DARBOIS-TEXIER, Baptiste, DUPEUX, Guillaume, LAGUBEAU, Guillaume, et al. *La caléfaction*. Reflets de la physique, 2013, no 37, p. 12-16.
11. DE GENNES, Pierre-Gilles, BROCHARD-WYART, Françoise, et QUÉRÉ, David. *Gouttes, bulles, perles et ondes*. Paris : Belin, 2002.
12. DUPEUX, Guillaume, BOURRIANNE, Philippe, MAGDELAINE, Quentin, et al. *Propulsion on a superhydrophobic ratchet*. Scientific reports, 2014, vol. 4.
13. HIMBERT-BIANCE, Anne-Laure. *Gouttes inertielles: de la caléfaction à l'étalement*. 2004. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
14. LAVALLE, G. Guido, CARRICA, P., GAREA, V., et al. *A boiling heat transfer paradox*. Am. J. Phys, 1992, vol. 60, no 7, p. 593-597.
15. LINKE, H., ALEMÁN, B. J., MELLING, L. D., et al. *Self-propelled Leidenfrost droplets*. Physical review letters, 2006, vol. 96, no 15, p. 154502.
16. NOBLIN, Xavier. *Mouillage et dé mouillage inertiel: triplons, flaques vibrées, ondes de chocs*. 2004. Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie-Paris VI.
17. OLLIVIER, Héroïs. *Recherches sur la capillarité*. J. Phys. Theor. Appl., 1907, vol. 6, no 1, p. 757-782.
18. QUÉRÉ, David. *Qu'est-ce qu'une goutte d'eau?*. Le Pommier, 2003.
19. QUÉRÉ, David, BICO, José, et RICHARD, Denis. *Le mouillage nul (ou presque)*. Bulletin de la SFP, 2000, vol. 125, p. 8.
20. QUÉRÉ, David et AJDARI, Armand. *Liquid drops: Surfing the hot spot*. Nature materials, 2006, vol. 5, no 6, p. 429-430.
21. QUÉRÉ, David. *Wetting and roughness*. Annu. Rev. Mater. Res., 2008, vol. 38, p. 71-99.
22. REYSSAT, Mathilde et QUÉRÉ, David. *L'effet lotus*. Pour la science, 2006, no 347.
23. TYNDALL, John. *Heat: a mode of motion*. D. Appleton, 1881.
24. VAKARELSKI, Ivan U., PATANKAR, Neelesh A., MARSTON, Jeremy O., et al. *Stabilization of Leidenfrost vapour layer by textured superhydrophobic surfaces*. Nature, 2012, vol. 489, no 7415, p. 274-277.
25. WALKER, Jearl. *Boiling and the Leidenfrost Effect*. Cleveland State University, 2010,

Annexe 1 : La caléfaction dans la bibliographie



Annexe 2 : La visite de l'ESPCI.

Après avoir constaté que la caléfaction était toujours un phénomène étudié de nos jours, nous avons décidé d'envoyer des mails à tous les grands laboratoires et à toutes les personnes dont les adresses étaient plus ou moins directement dans les publications trouvées sur internet. C'était le début des grandes vacances, mais nous avons eu quelques messages d'encouragements pour notre initiative d'étudier la caléfaction.

Parmi ceux-ci, un message très encourageant de M. José BICO qui nous invitait à lui rendre visite au PMMH de l'ESPCI. Là, nous avons très vite compris qu'on avait décroché un contact en or. Des groupes d'Olympiades de notre lycée avaient déjà échangé des mails avec M. Etienne GUYON sur les sables mouvants et les vortex. Mais là nous étions invités.

L'École Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles de la ville de Paris est l'une des meilleures écoles d'ingénieurs civils au monde. Dans l'exiguïté des locaux historiques, il y a, depuis l'origine un concentré d'excellence, de pluridisciplinarité et de simplicité.

Après de multiples échanges, c'est finalement le mardi 28 octobre 2014 qu'a lieu la visite. Nous sommes accueillis par M. BICO qui vient en personne nous chercher à l'espace Pierre Gilles de GENNES². Il nous emmène dans son laboratoire, ça ressemble à notre local Olympiades mais à l'échelle d'une salle de classe, chacun semble occuper un coin du labo pour y mener ses propres expériences. L'ambiance est chaleureuse, la déco murale est faite de posters, de thèses et d'impression d'images qui ont fait la réputation du labo dans le monde, comme les micro-origamis capillaires, et un peu partout, presque à chaque poste de travail : un tableau le plus souvent à la craie sur lequel on trouve des équations bien compliquées pour un non-initié mais aussi des dessins d'enfants passés rendre visite à leurs parents.

Après un rapide rappel historique de l'ESPCI et de la vocation du PMMH (laboratoire de **Physique** et **Mécanique** des **Milieux Hétérogènes**), M. BICO nous présente le programme de la journée, il n'est pas spécialiste de la caléfaction, mais nous allons en rencontrer pendant toute cette journée.

Puis dans l'esprit de l'ESPCI, il nous présente un sujet actuel de recherche de son laboratoire sur le déchirement d'une feuille de papier (certes un peu spéciale car isotrope), le résultat est assez bluffant. Mais nous n'en sommes qu'au début, il nous montre comment arrêter la progression d'une fissure puis, clou du spectacle, on s'intéresse maintenant à ce qui se passe quand on attaque une feuille par le centre avec une amorce de déchirure bloquée d'un côté ... ça dure 5 à 10 s ... le résultat est spectaculaire. L'interprétation théorique est bien hors de notre portée, M. BICO ne s'y aventure pas, mais là nous comprenons que des choses aussi basiques que les déchirures de feuilles de papiers peuvent faire l'objet de recherches très sérieuses qui auront une application industrielle un jour plus ou moins proche. Avant de nous quitter, notre hôte nous explique bien l'intérêt de la recherche fondamentale et de sa coexistence avec la recherche appliquée, elles ne sont pas concurrentes mais interdépendantes, sans l'une l'autre n'existe pas. La curiosité et/ou l'observation font naître la recherche théorique, la recherche appliquée n'a de solution à proposer que si quelqu'un s'est un jour posé la question juste pour le plaisir. Il ne faut pas toujours rechercher un intérêt immédiat, c'est peut-être un message assez difficile à faire passer de nos jours. Nous remercions très chaleureusement M. BICO pour tout ce qu'il a pu faire pour nous.

C'est entre les mains d'Anaïs GAUTHIER, qui travaillait juste à côté de nous depuis notre arrivée, qu'il nous laisse. Cette jeune doctorante étudie ce qui se passe lorsqu'une goutte arrive sur une surface plane en mouvement. Le but est d'éviter le mouillage c'est-à-dire un étalement plus ou moins complet de la goutte sur le support. A partir d'une certaine vitesse caractéristique il se forme entre la goutte et le support un film d'air (qui s'accroche aux objets en mouvement) qui empêche le mouillage du support, celle-ci rebondit et se déforme en prenant des formes variées, c'est de la caléfaction dynamique. Un amusement pour le plaisir ? Peut-être ! Mais des surfaces en mouvements soumises à des impacts de gouttes il y en a beaucoup : des pare-brise de voiture aux ailes d'avions. Le sujet de sa thèse : « *peut-on éviter à des gouttes de s'écraser sur des surfaces en mouvement* ». Une réponse partielle est actuelle : il faut être capable de faire passer un film d'air entre la goutte et le support et que la goutte soit déformable (c'est donc impossible avec des billes de plastiques ou des grêles). Il y a aussi un autre paramètre : la vitesse seuil, selon Anaïs, il faut une vitesse de 1000 km.h⁻¹ pour une goutte de pluie, du moins pour que 100% soit éjecté si on travaille sur une surface plane. Le problème n'est pas clos.

Arrive l'heure du repas, C'est Philippe BOURRIANE qui nous prend maintenant en charge. L'ESPCI est en travaux et sa cantine aussi ! On va tous ensemble se chercher un sandwich, et tout le monde revient au local cafetière du labo. Là nous sommes tous logés à la même enseigne : les thésards, les post-docs, les chercheurs professionnels, des administratifs, des enseignants ... c'est un petit moment de simplicité comme on ne s'attend pas forcément à en partager, ça fait plaisir. En parlant de tout et de rien au milieu des pommes de la grand-mère d'Anaïs, nous apprenons que nous avons raté de peu la venue d'Etienne GUYON parti en Argentine pour défendre la physique.

Après : place au sacro-saint café, une institution dans tous les labos qui ne sont pas forcément adaptés à cela. Au PMMH c'est dans un coin de placard, mais excellent !

L'après-midi peut recommencer c'est Philippe BOURRIANE qui s'y colle. On recommence par le début : LEIDENFROST en 1756. En fait nous apprenons qu'Herman BOERHAAVE a décrit en 1732 le comportement de gouttes d'alcool sur une plaque

² Il se trouve que cette année la TS₂ de notre lycée a reçu comme nom « Promotion Pierre-Gilles de Gennes ».

chaude. Il nous explique la courbe de LEIDENFROST et pourquoi nous avons autant de difficultés à l'obtenir, le plus difficile c'est autour de 170-190°C car la goutte n'a pas un comportement net. Elle peut commencer à survivre à haute température puis se mettre à sauter pour enfin exploser en milles petites gouttes. Ce que nous avons très souvent vu et parfois réussi à photographier. Nous lui parlons de nos soucis pour mesurer l'intervalle entre la goutte et la plaque chauffante. Là aussi il nous montre des photographies analogues à celles que nous avons faites, il nous donne des conseils techniques. La grande astuce c'est comment maintenir une goutte en place. Un très fin fil de cuivre (ou n'importe quel métal conducteur) d'un diamètre très petit devant celui de la goutte, s'il est suffisamment fin et long, il reste froid même à proximité de la plaque, l'eau y adhère par capillarité et la goutte s'immobilise. Il nous conseille de procéder par étape pour mesurer l'intervalle entre la goutte et la plaque. Procéder par étape, faire des courbes d'étalonnage avec des billes : pourquoi pas ? La mesure est délicate mais c'est faisable.

Après cette première partie de rappels et de conseils, M. BOURRIANE commence par nous mettre de la bibliographie sérieuse sur une clé USB. M. David QUÉRÉ vient d'arriver, il en profite pour nous présenter ce grand chercheur d'une très grande simplicité.

C'est maintenant Melle Helene BERTHET qui vient nous expliquer la micro-fluidique, ou comment des gouttes peuvent se mettre en mouvement sur un « ratchet ». En 2006, Heiner LINKE a eu l'idée de déposer une goutte sur un profil en toit d'usine (« a ratchet » en anglais, il n'y a en fait pas de traduction synonyme exacte, ratchet étant plus un cliquet). Elle nous explique comment et pourquoi les gouttes se déplacent dans un sens et pas dans l'autre. Elle nous montre à l'aide de maquettes microporeuses le sens du déplacement de la vapeur d'eau. Elle nous présente l'intérêt de son étude : pouvoir déplacer, guider des gouttes pour les amener là où on le veut.

C'est là que revient Philippe BOURRIANE, qui lui reproduit la même chose mais à plus basse température. Son secret : la superhydrophobie. Nous connaissons le caractère hydrophile ou hydrophobe d'une surface, ici la surface est tellement hydrophobe que les gouttes n'accrochent plus du tout : elles roulent sur la surface dès qu'elle est légèrement inclinée. Il nous explique toute la technique de mesure du caractère superhydrophobe. L'ESPCI utilise un superhydrophobant qui se vend au Japon. Et vu notre niveau en japonais il nous explique qu'il existe en France un produit assez similaire. Il est relativement simple à utiliser.

M. BOURRIANE nous réexplique les expériences avec le ratchet, cette fois en faisant des mesures de vitesses sur une surface métallique en toit d'usine brute puis la même mais traitée pour la rendre superhydrophobe. Ici la goutte se met en mouvement à une température où, selon le modèle classique elle ne peut exister. On parle alors de caléfaction froide. Ses explications sont extrêmement claires, nous avons eu bien plus d'explication que ce que nous souhaitions, mieux : nous repartons avec beaucoup plus de perspectives que ce que nous pensions en arrivant. M. David QUÉRÉ, nous voyant partir, nous rappelle de ne pas hésiter à contacter son équipe en cas de souci, nous lui promettons de le tenir au courant de nos résultats.

Avant de quitter l'ESPCI, nous retournons récupérer toutes nos affaires et voir d'autres manips.

- Hadrien BENSE est aussi un doctorant, qui étudie la déformation d'un polymère quand il est soumis à une tension assez importante de l'ordre de 3000 V. Une idée d'application est un nouveau type de moteur qui fonctionnerait sur le même principe qu'un muscle avec de très grands raccourcis.
- Ludovic KEISER lui étudie « les petites gouttes vertes » comme dit M. BICO, en fait il cherche comment extraire une huile coincée par capillarité à l'aide de tensioactif, une application est par exemple extraire un maximum de pétrole d'une roche.

Nous remercions une fois de plus toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à cette journée inoubliable et TRES riche en contenus. MERCI²

Les concours de physique : une aventure

Après avoir réalisé un projet sur l'isolation vestimentaire et avoir obtenu un deuxième prix national lors de la XXIème édition, j'ai décidé de participer aux Olympiades de Physique France et au concours C.Génial pour la deuxième année consécutive.

C'est certes un investissement en temps, car il fallait venir tous les mercredis après-midi au lycée; cela nous a paru être un sacrifice au début, mais nous nous sommes rendus très vite compte que l'esprit y est très différent d'un cours magistral. En effet, ce sont nous, les élèves, qui choisissons le projet qui nous plaît afin de faire NOS recherches, NOS expériences. Par conséquent, nous faisons aussi nos propres erreurs, nous échouons et recommençons en apprenant de nos erreurs et c'est ce qui nous fait progresser dans notre étude.

Souhaitant faire une classe préparatoire scientifique, où je devrai aussi préparer un TIPE, les concours de physique sont un bon entraînement qui permettent l'obtention d'une démarche scientifique et expérimentale, une confiance en soi et une aisance à l'oral; ils permettent une sorte de « lien » entre les TPE de 1^{ère} et les TIPE de prépa.

Avoir lu de nombreux documents en anglais est aussi un plus pour mes études à venir car ça m'a permis d'acquérir du vocabulaire spécifique et complexe, des techniques de compréhension qui me serviront pas la suite.

Préparer les concours de physique est avant tout un travail de groupe, un partage entre élèves mais aussi avec les professeurs avec lesquels nous lions une complicité particulière. Cette année, je partage cette expérience avec un garçon. De fait, je me suis en quelque sorte imposée comme le leader du projet car j'avais déjà l'expérience des Olympiades. Travailler avec un garçon est bien différent qu'avec deux filles, parce que les garçons sont plus attentifs (plus manuels aussi), qu'on expose nos idées et réfléchit au pour et au contre de chacune d'entre elles au lieu d'aller à la confrontation en étant persuadés que la nôtre est la meilleure.

On dit tout le temps que l'univers des sciences est fait pour les garçons, c'était peut-être vrai avant, mais nous sommes au XXIème siècle, et les femmes sont toutes aussi importantes pour les sciences que les hommes, même à l'échelle des Olympiades : il est important que des filles soient là afin de représenter l'égalité des genres.

Alors oui, les concours de physique sont une aventure scientifique qui nous fait progresser en sciences, nous fait gagner en maturité, en aisance à l'oral, et surtout en confiance en soi. Mais c'est surtout une aventure humaine, car nous tissons des liens avec nos coéquipiers, nous apprenons à connaître des gens qui sacrifient leur temps dans le seul but de nous aider, mais aussi des gens qui nous invitent, par exemple dans leurs laboratoires (l'ESPCI) et passent du temps à nous expliquer leur travail, leurs objets d'étude, et font ce qu'ils peuvent pour nous aider dans notre projet.

Mais c'est aussi, et surtout, des rencontres inoubliables pendant les finales régionales et nationales, des gens que nous croisons seulement quelques jours mais avec lesquels nous gardons contact, même plusieurs mois après.

Toutes ces heures de travail sont résumées en quelques minutes de présentation lors de la finale nationale. C'est une journée qui mêlera le stress du passage à l'oral devant un jury de professionnel, le stress des résultats avec la joie de présenter enfin son travail d'une année. L'esprit n'est pas à la compétition mais au contraire, à l'entraide, même entre groupes de lycées différents.

En résumé, ces concours sont le bilan provisoire de tout notre travail et permettent des rencontres que nous n'aurions jamais faites sans ces aventures: pour moi, **les concours de physique sont la base de mes années lycées. J'espère qu'un jour elles seront, la base d'une option facultative au bac S.**



Laurine ANDRIEUX

16 ans, spécialité physique

TS₂ Promotion Pierre-Gilles de Gennes

OdP Branly N°100

