

Etude de la caléfaction d'une goutte d'eau

Pierre LANCIEN, DSM 1, projet TP

Introduction :

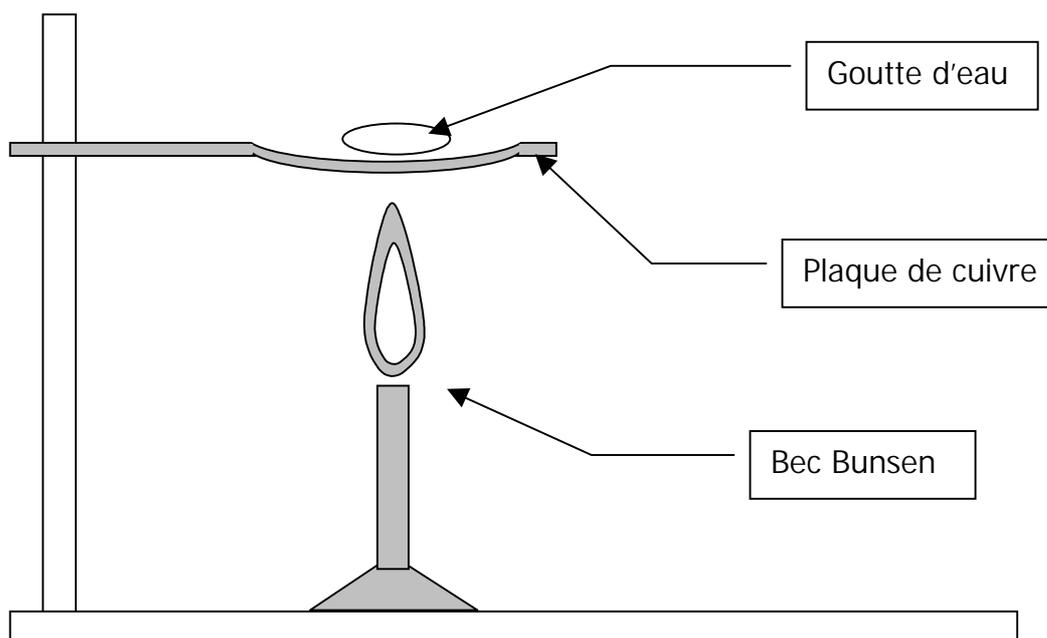
La caléfaction est la formation d'un film de vapeur, engendré par ébullition, entre une surface chaude et un liquide. Cela se traduit par un mauvais échange de chaleur entre la plaque et le liquide.

L'exemple le plus connu de caléfaction est sûrement dans la littérature : Michel Strogoff, lorsqu'on lui présente devant les yeux la lame d'un sabre chauffée à blanc, est sauvé de l'aveuglement grâce aux larmes qui lui viennent en pensant à sa mère... Ce phénomène peut aussi être observé dans la vie de tous les jours : lorsqu'on verse une goutte d'eau sur une plaque de cuisson très chaude, elle lévite comme un aéroglyseur sur le coussin de vapeur qu'elle produit. Elle peut ainsi se déplacer quasiment sans frottements, et si on arrive à la piéger, il est possible d'observer des vibrations dans la goutte, qui lui donnent des formes spectaculaires. C'est cette constatation qui m'a amené à étudier la caléfaction plus en profondeur. Cependant, comme nous le verrons, ce sujet est délicat à étudier, car le phénomène est très mal compris à l'heure actuelle. Mon but fut plus d'essayer de construire une démarche expérimentale complète que d'avoir des résultats quantitatifs et probants.

Présentation de l'expérience

Pour étudier la caléfaction d'une goutte d'eau, j'ai utilisé un dispositif expérimental très simple : une plaque de cuivre légèrement creuse pour pouvoir retenir la goutte, fixée au dessus d'un bec bunsen.

Instruments de mesure :
-Chronomètre
-Thermocouple
-Pipette graduée



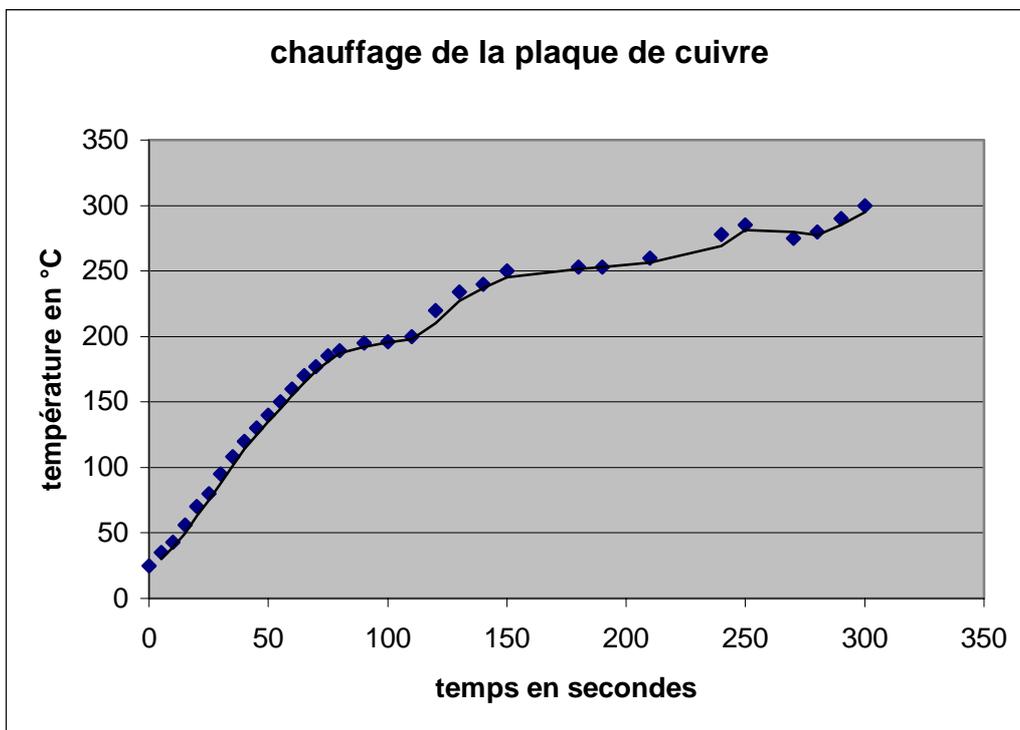
Déroulement général des mesures :

La température de la plaque est prise, un volume V d'eau est dosé grâce à la pipette graduée, puis déposé doucement sur la plaque. Au même moment, le chronomètre est déclenché, et il s'agit alors d'observer l'apparition de modes vibratoires, de consigner les instants de début et fin, et de noter au bout de combien de temps la goutte s'est complètement évaporée.

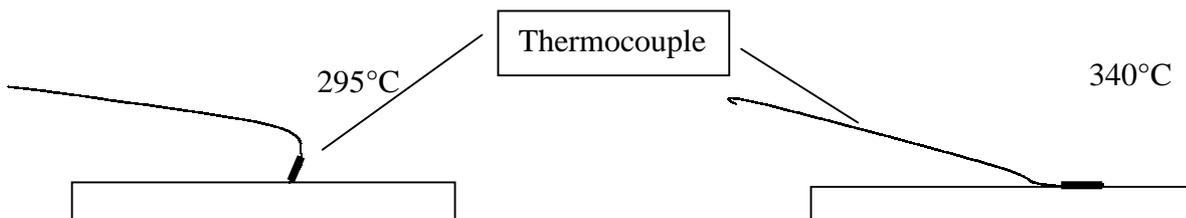
Mais voici quelques mesures et observations effectuées au début de la série de TP, qui donneront un meilleur aperçu du phénomène, utile par la suite :

Chauffage de la plaque:

Située juste au dessus du bec bunsen, la plaque arrive à plus de 200°C assez rapidement :



Elle monte facilement à plus de 300°C. Sa température a été mesurée avec un thermocouple. Le problème majeur est cependant que seule une partie de la soudure du thermocouple est en contact avec la plaque, et les mesures sont donc très sensibles à la variation de position de la soudure. Voici ce qui a pu être mesuré par exemple quasiment au même moment :



La température a donc très mal pu être évaluée, car la position de la soudure variait beaucoup d'une série de mesure à l'autre. Cependant, le tableau ci dessus a pu être obtenu, pour une position donnée du thermocouple, et la température

mesurée était plutôt le mélange des températures de la plaque et de la couche d'air immédiatement au dessus de celle-ci.

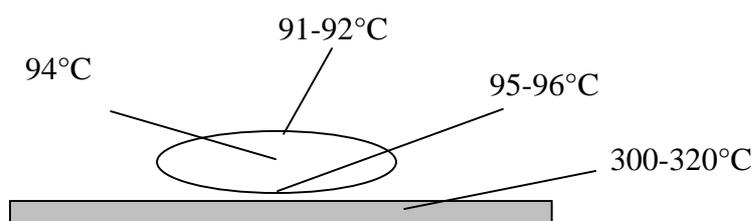
On voit bien la tendance générale de cette courbe, mais le plus intéressant sont les écarts à cette tendance : à de telles températures, le gradient de température avec l'air ambiant est très élevé, et la diffusion de la chaleur s'effectue à une vitesse très rapide : un petit souffle d'air ou une déviation de la flamme font varier la température de façon brutale.

Un autre facteur a perturbé les mesures de façon notable : lors du chauffage du cuivre (au rouge), la plaque a noirci sur le dessus. Il y a probablement eu formation d'une couche d'oxyde de cuivre, dont la conductibilité thermique est différente de celle du cuivre. Cet effet a gêné l'obtention d'une température homogène sous la goutte d'eau.

Durant toutes les séries de manipulations, le problème du maintien et de la mesure de la température de la plaque fut donc récurrent, et d'autant plus préoccupant que d'un jour sur l'autre, le débit du bec bunsen variait et entraînait des écarts dans les temps d'évaporation. Dans l'éventualité d'une nouvelle série de mesure, il faudrait prendre une plaque d'une autre matière, l'isoler des turbulences de la pièce, et trouver une méthode de mesure de la température moins aléatoire...

Répartition de la température dans la goutte :

Cette mesure fut assez délicate, compte-tenu à la fois de la taille réduite de la goutte par rapport à la grosseur de la soudure du thermocouple, et de la chaleur importante, gênant l'accès et le contrôle précis de la position du thermocouple. De plus, la goutte est en général en mouvement, et réagit à la présence du thermocouple par capillarité. Néanmoins, des valeurs donnant un bon ordre d'idée ont pu être obtenues. La moyenne de température d'une goutte de 1mL est d'environ 94°C, avec 95 à 96°C contre la plaque et 91° à 92°C sur le dessus . Il est intéressant de noter que ces température sont relativement éloignées de 100°C, qui est la température à laquelle on aurait pu s'attendre pour toute la goutte.

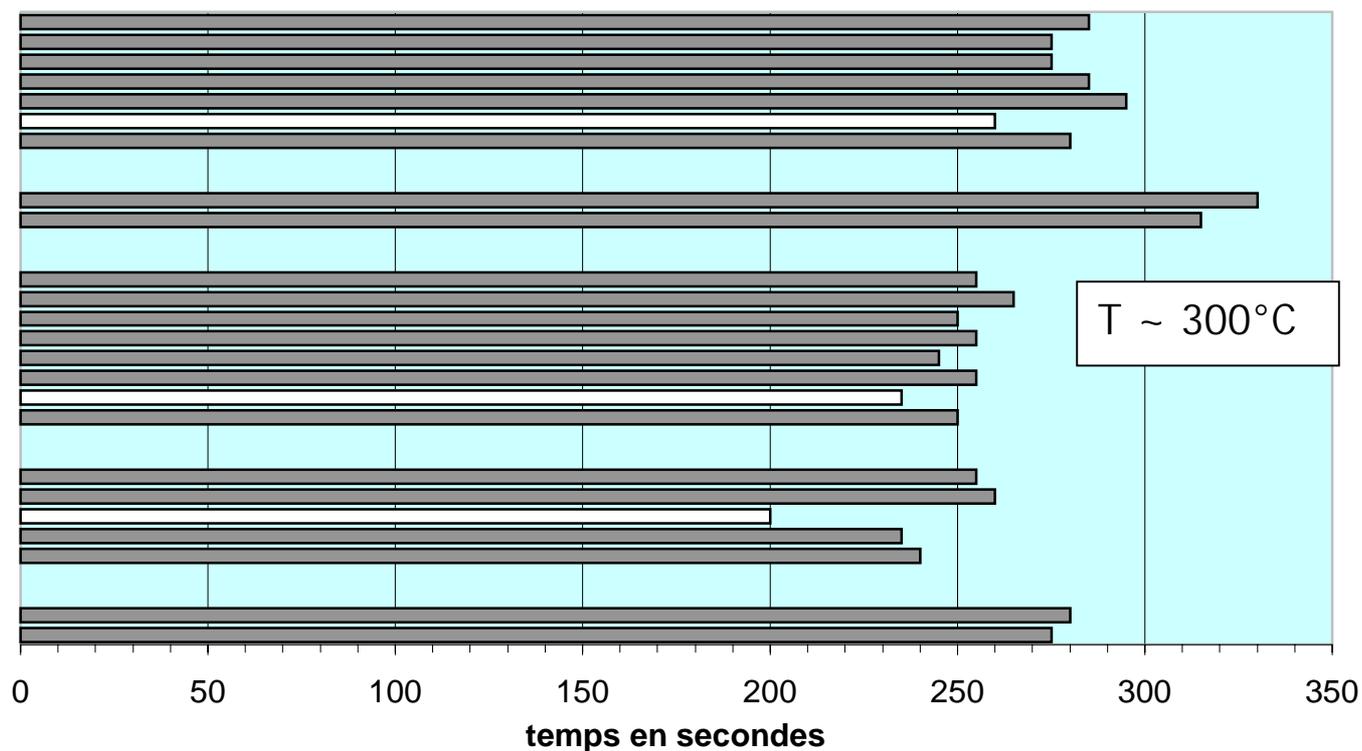


Venons en maintenant aux mesures principales :

Durée de vie d'une goutte de 1mL :

A diverses reprises, une goutte de 1mL a été déposée sur la plaque, et son temps d'évaporation a été mesuré, afin d'établir le graphique ci dessous, sur lequel les mesures issues d'une même série sont regroupées. Les espacements distinguent ainsi les mesures faites à plusieurs jours d'intervalles, pour bien séparer les séries de mesures, au cas où les conditions expérimentales non contrôlables (par exemple la température de la plaque) auraient changé entre temps.

Durée d'évaporation de 1mL d'eau



Une première constatation : la durée de vie d'une goutte de 1mL est très grande (4 min 30 en moyenne), comparée à cette même goutte déposée sur une plaque à 100 ou 110°C (la vaporisation est dans ce cas quasi instantanée). C'est le phénomène de caléfaction qui limite très fortement les échanges de chaleur. Il est intéressant de noter que ce phénomène introduit une limite au chauffage d'un liquide : passé une certaine température, le transfert de chaleur s'effectue moins bien !

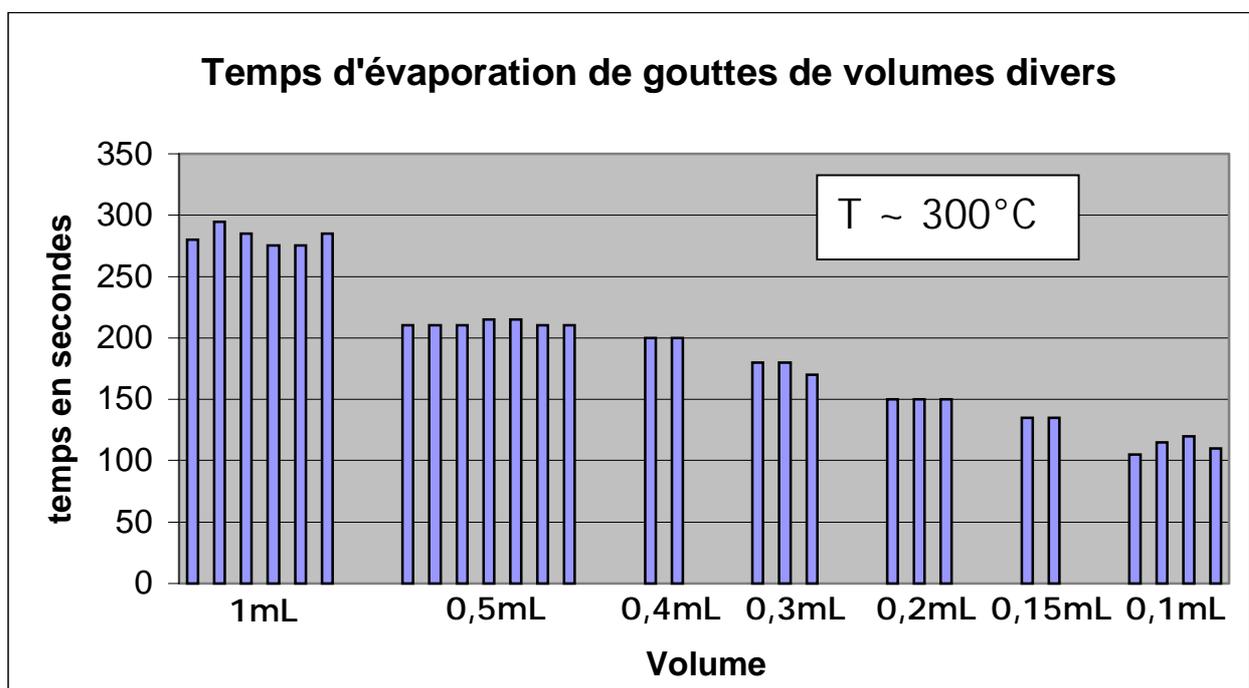
Un deuxième fait visible sur le graphe est la présence d'accidents expérimentaux : les barres hachurées indiquent des mesures qui ont été perturbées par un phénomène parasite dû à la formation de la couche d'oxyde de cuivre sur la plaque. En certains points sur la plaque, cette couche s'écaillait, laissant apparaître le cuivre rouge. De plus, des poussières restaient sur le fond de la cuvette de la plaque. Ses éléments créaient des sortes de « catalyseurs d'ébullition » : lorsque la goutte s'approchait de certains points, elle se troublait et un crépitement se faisait entendre, signe d'une ébullition. La durée de vie s'en trouvait donc raccourcie.

Exception faite de ce « bruit », les mesures d'une même série sont plutôt cohérentes entre elles, ce qui fut encourageant pour la suite. Cependant, alors que le volume d'eau est le même entre deux séries, et que le bec bunsen est à la même distance de la plaque, les moyennes sur chaque série sont notablement différentes : de 4 min 10 sec. à 5 min 20 sec. ! Ces différences sont sans doute dues à une différence de température de la plaque : dans le cas des 5min20, la plaque ne dépassait pas les 280°C, tandis qu'elle était à plus de 320°C pour les 4min10 (la température de la plaque est toujours aussi vague, pour les raisons invoquée plus haut).

Mais pourquoi la température était elle si différente d'une série de mesures à l'autre ? Je n'ai pu formuler que deux hypothèses : le débit du bec bunsen n'est pas constant au laboratoire d'un jour à l'autre, et la couche d'oxyde n'était pas toujours la même (suivant les nettoyages plus ou moins récents). Le problème reste pourtant entier...

Evolution du volume d'une goutte au cours du temps:

La dernière série de mesures s'est révélée, pour une raison inconnue, très concluante quant à ses résultats (c'est la série du haut sur le graphe précédent). Les expériences semblaient très reproductibles. J'ai donc pu varier le volume V initial de la goutte et mesurer avec fiabilité les temps d'évaporation :

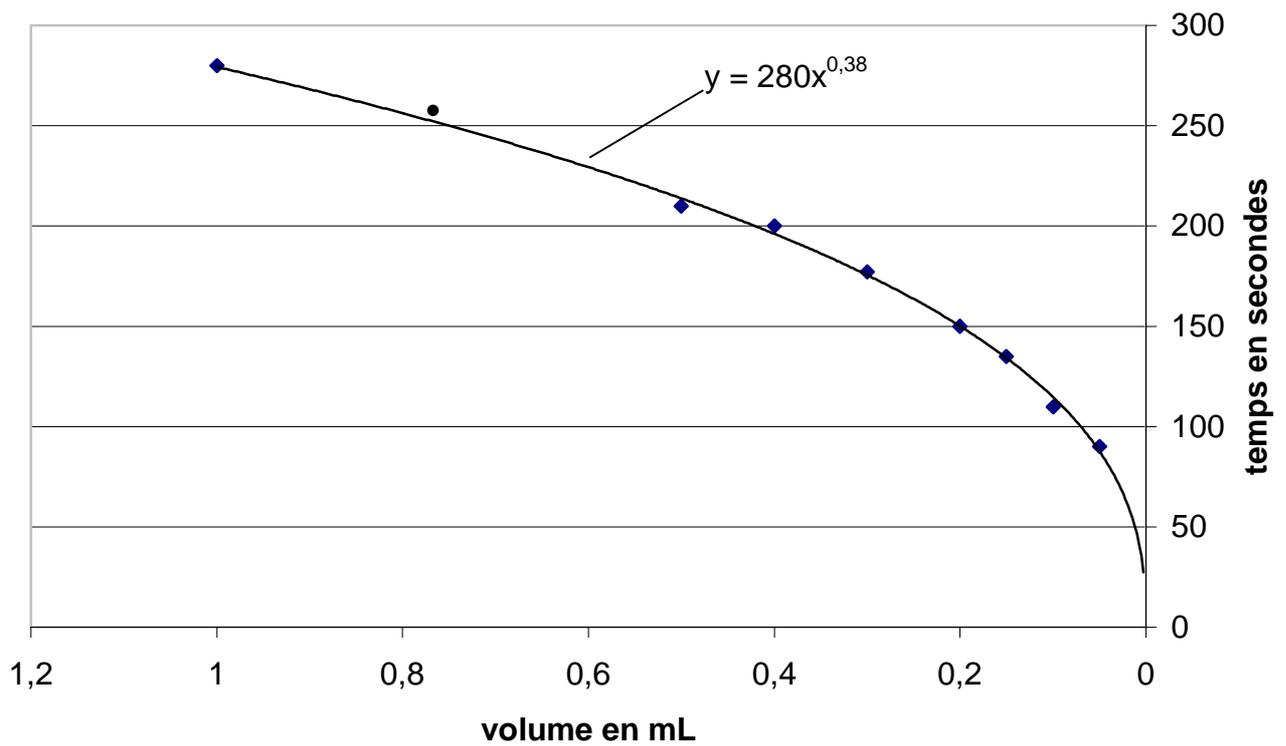


Osons maintenant une hypothèse :

Prenons une goutte de volume initial V . Son volume va diminuer et à un moment donné elle passera par le volume V' . Je suppose alors que notre goutte s'évaporera ensuite de la même façon qu'une goutte de volume initial V' . Autrement dit, si on regarde une goutte à un instant donné, je suppose que la durée de vie qui lui reste est indépendante de son passé (elle peut avoir été déposée là à l'instant tout comme 2 minutes avant). Cette hypothèse semble tout à fait évidente compte-tenu du temps de stabilisation d'une goutte lors de son dépôt, négligeable devant sa durée de vie. Cependant, nous verrons par la suite que ce n'est pas si évident que cela...

Néanmoins, cette hypothèse permet de tracer, à partir des valeurs moyennées du graphe précédent, la courbe de l'évolution du volume d'une goutte donnée en fonction du temps.

Durée de vie d'une goutte à T=300°C

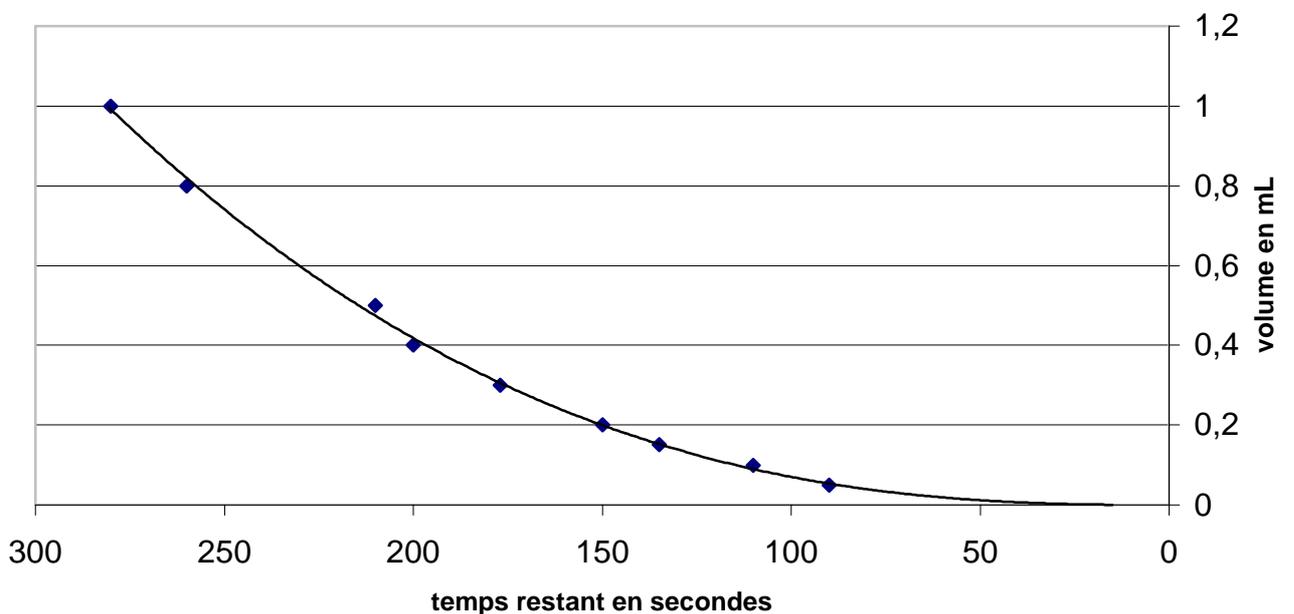


Cette courbe représente donc à la fois :

- La durée de vie d'une goutte en fonction de son volume initial
- La trajectoire parcourue par une goutte au cours de son évaporation. (l'axe des temps doit cependant être inversé pour cela)

Pour mieux appréhender le deuxième point, voici la même courbe orientée différemment :

Evolution d'une goutte à T=300°C



Interprétation théorique de la forme des courbes :

Quelques considérations simples, ainsi que des approximations, m'ont permis de rendre compte de la forme de cette courbe :

Supposons une goutte sphérique. Elle est environnée d'une couche d'air chaud que nous envisagerons comme étant pratiquement à la même température tout autour de la goutte (ou du moins l'effet des variations de cette température sur l'évaporation est négligeable). Il est raisonnable de supposer alors que l'évaporation est proportionnelle à la surface de la goutte pour tout temps t .

On a donc :

$$\frac{dV}{dt} \propto R^2 \quad \text{Soit encore :} \quad \frac{dV}{dt} = aV^{\frac{2}{3}}$$

Qui se résout, pour $V=0$ à $t=0$, en :

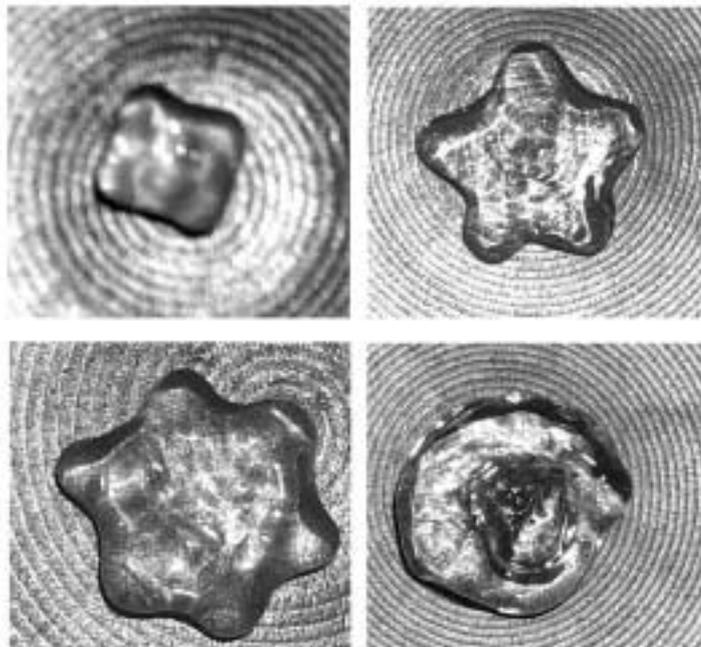
$$V(t) = \frac{(a \cdot t)^3}{27} \quad \text{équivalent à} \quad t = \frac{3 \cdot V^{0.33}}{a}$$

Le logiciel Excel donnait l'équation $t = 280 \cdot V^{0.38}$ lors de l'interpolation des points (voir graphe page précédente).

Il y a donc un bon accord entre l'étude théorique et l'expérience. De plus, la valeur plus grande de la puissance (0.38 au lieu de 0.33) peut être expliquée si on remarque que l'approximation de la goutte sphérique ne marche pas bien pour les gros volumes : en effet, la goutte de 1mL a une forme d'ellipsoïde, et pour un même volume, la surface d'une sphère est inférieure à celle d'un ellipsoïde. Donc l'évaporation est plus importante que ce qui est calculé pour les grandes valeurs de V . C'est qualitativement en accord avec l'expérience, puisque cela correspond à un coefficient a plus grand pour V grand.

Etude des modes vibratoires de la goutte :

C'est l'effet le plus spectaculaire, et malheureusement le plus difficile à expliquer de la caléfaction d'une goutte. Voici d'abord quelques photos de gouttes prises sur une plaque de cuisine avec un appareil numérique :



On voit qu'elles peuvent prendre des formes très variées. L'étude quantitative se révèle très difficile. D'après mes recherches, personne n'a encore proposé d'explication concluante à ce phénomène (j'ai contacté une équipe du collège de France et j'ai lu des articles envoyés par l'équipe japonaise de Naoko Tokugawa, et ces deux sources s'accordent pour trouver le phénomène très complexe. Il y a de très nombreuses questions ouvertes). Je me contenterai donc de donner mes résultats, en y ajoutant quelques interprétations très qualitatives.

Choix du volume comme grandeur d'étude :

L'étude la plus utile est sûrement celle qui relierait les modes vibratoires au rayon de la goutte, ainsi que l'a fait Naoko Tokugawa. Cependant, la mesure de ce rayon est délicate (il m'aurait fallu un appareil photo numérique), et je n'ai eu accès qu'à des volumes initiaux et à des temps ! Toutefois, j'ai pu remarquer qu'il a été difficile pour des équipes ayant réalisé les mesures des rayons d'aller beaucoup plus loin que du qualitatif pour l'interprétation.

Et grâce aux mesures présentées précédemment, j'ai pu obtenir la courbe $V(t)$, qui me permet, d'après mes observations des modes de vibrations de la goutte, chronomètre en main, de relier volume et figure géométrique formée.

J'ai été agréablement surpris par le fait qu'il y avait malgré tout des rapprochements possibles : les mêmes modes vibratoires apparaissaient à des dates assez proches pour dire que le volume (ou le rayon, c'est pareil) est le principal facteur influençant la vibration. Cela démontre aussi que, contrairement à ce que l'on m'avait suggéré, les vibrations ne sont dues qu'à la goutte elle-même, et non à des vibrations de la plaque, de la table, ou à d'autres phénomènes.

Un problème de taille réside dans les différences entre les séries de mesures, dont il a été traité plus haut. Comment, en effet, prendre en compte les modes vibratoires à la fois de la goutte de 1mL au départ s'évaporant en 4min00 et de celle s'évaporant en 5min30 ? Si je ne le fais pas, je perd l'intérêt d'avoir de nombreuses mesures. J'ai donc choisi de les intégrer dans le même graphe, en trouvant un moyen de les relier, de façon assez arbitraire il est vrai. La courbe de $V(t)$ tracée précédemment est valable uniquement pour la dernière série de mesures, où 1mL mettait 280 secondes à s'évaporer. Les considérations théoriques utilisées pour expliquer la forme de cette courbe semblent raisonnablement peu dépendantes de la température. Seul le coefficient a va changer.

Je peux donc légitimement poser que pour une goutte de 1mL qui a mis un temps T_0 à s'évaporer, on aura la loi :

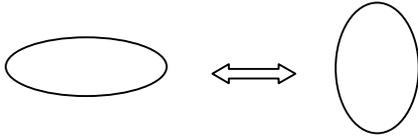
$$t = t_0 \cdot V^{0.38}$$

Où t est le temps restant avant que le volume V (en mL) soit évaporé. Cette loi me permet donc d'utiliser les 30 observations effectuées avec des gouttes de 1mL (au lieu des 5 réussies de la dernière série), en rapportant tout à V :

$$V = \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2,63}$$

Notations :

Les noms des modes dans le tableau sont arbitraires, et désignent le nombre de « sommets » rencontrés le long du périmètre de la goutte. Par exemple, la goutte en mode 2 oscille de la manière suivante :



Le mode 4 est un carré ou une étoile à 4 branches, etc...

Le mode impair regroupe essentiellement des triangles et étoiles à 5 branches. Il est ainsi nommé car il est souvent difficile de compter le nombre de branches dans ces oscillations : la goutte semble passer de 3 à 5 à 7 : la période de vibration peut pas s'écrire $2\pi R/n$, mais plutôt $3\pi R/n$ ou $5\pi R/n$

Le mode 4-n commence par un carré, et passe très vite à une myriade de branches, qu'il es impossible de compter (d'où le n), et qui doit probablement être 8,16 ou 32.

Tourne indique une rotation de la goutte, qui prend une forme elliptique. Il est probable que ce soit une période supérieure à $2\pi R$ qui entraîne ce mouvement.

Interprétations :

Le tableau des modes vibratoires permet tout de même de faire certaines remarques :

- Les instants propices à un mode vibratoire donné sont assez reconnaissables, il es possible de faire des moyennes qui seront significatives
- de même, la succession de ces modes semble suivre un ordre assez précis, même si certains n'apparaissent que très peu (1^{er} mode 2) et d'autres disparaissent parfois (mode 4-n). Cet ordre irait vaguement vers une décroissance du mode, mais on ne peut pas préciser davantage.
- De plus, ces modes ne sont pas indépendants : il semble y avoir une corrélation entre les évènements : par exemple, les mesures 12 13 et 17 sont les seules à montrer une succession serrée de 4-n et de Tourne, et on peut noter que 4-n est précédé à chaque fois d'un grand moment d'inactivité. Il hasardeux de conclure trop vite, mais les mesures que j'ai effectuées donnent l'impression que la goutte garde l'effet des conditions initiales assez longtemps. Quand le volume initial était de 0.5mL, par exemple, je voyais apparaître au bout de 20 à 30 secondes des modes qui n'apparaissent jamais pour une goutte de volume initial 1mL, alors que celle-ci passe obligatoirement par un volume de 0,5mL à un moment donné !
- Les durées des vibrations un mode donné sont sensiblement les mêmes. Là aussi, une moyenne aurait une valeur significative (pour le mode impair et le mode 4-n notamment).
- Il est possible de voir les modes les plus stables par le nombre de leurs occurrences. Le mode impair semble stable, ainsi que le mode 4-n.
- Enfin, l'ordre des mesures a été conservé, et il est possible de voir des similitudes plus grandes entre mesures d'une même séries (ex : 3-4-5-6 9-11 18-19-20-21). Il y a donc des paramètres supplémentaires qui rentrent en jeu, au nombre desquels la température figure probablement en bonne position.

Oscillations forcées :

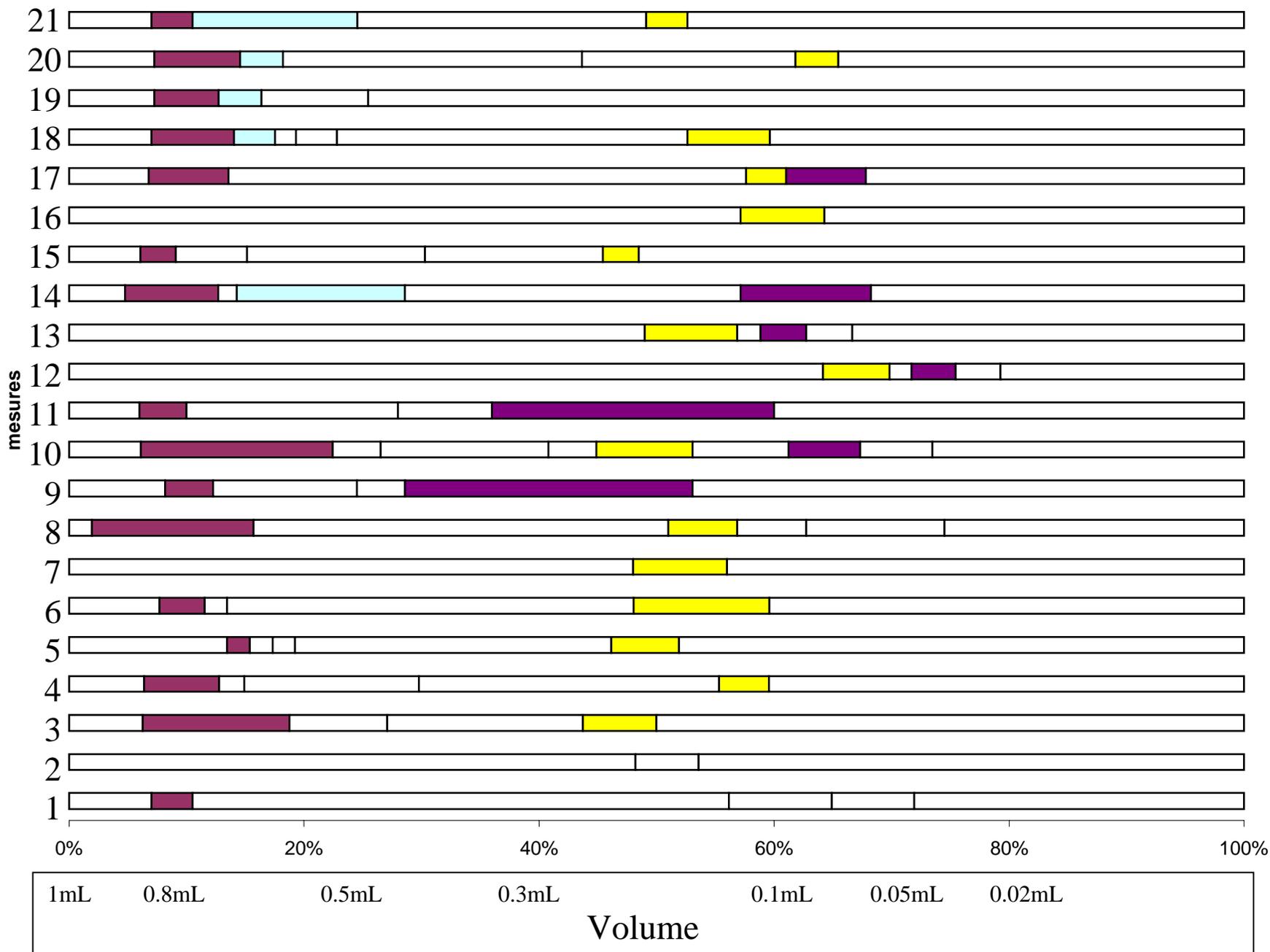
Une approche m'avait été suggérée : mettre la plaque en vibration verticale à l'aide d'un moteur et forcer les oscillations de la goutte. Vu que la goutte vibre d'elle-même, il me semble que ce serait introduire un problème supplémentaire, qui de toute manière est très difficile à mettre en œuvre : les essais que j'ai faits montrent que la plaque a déjà des résonances nombreuses et importantes : il est difficile de distinguer si la goutte réagit bien à une fréquence donnée ou si c'est la plaque (en général, c'est la plaque). De plus, la goutte s'évapore relativement vite, ce qui fait qu'une fréquence excitante ne le reste pas longtemps. De plus, de nombreux modes apparaissent, qui se mélangent et ne permettent pas des observations bien tranchées, etc...

Ceci dit, esthétiquement, l'expérience en vaut la peine.

Conclusions :

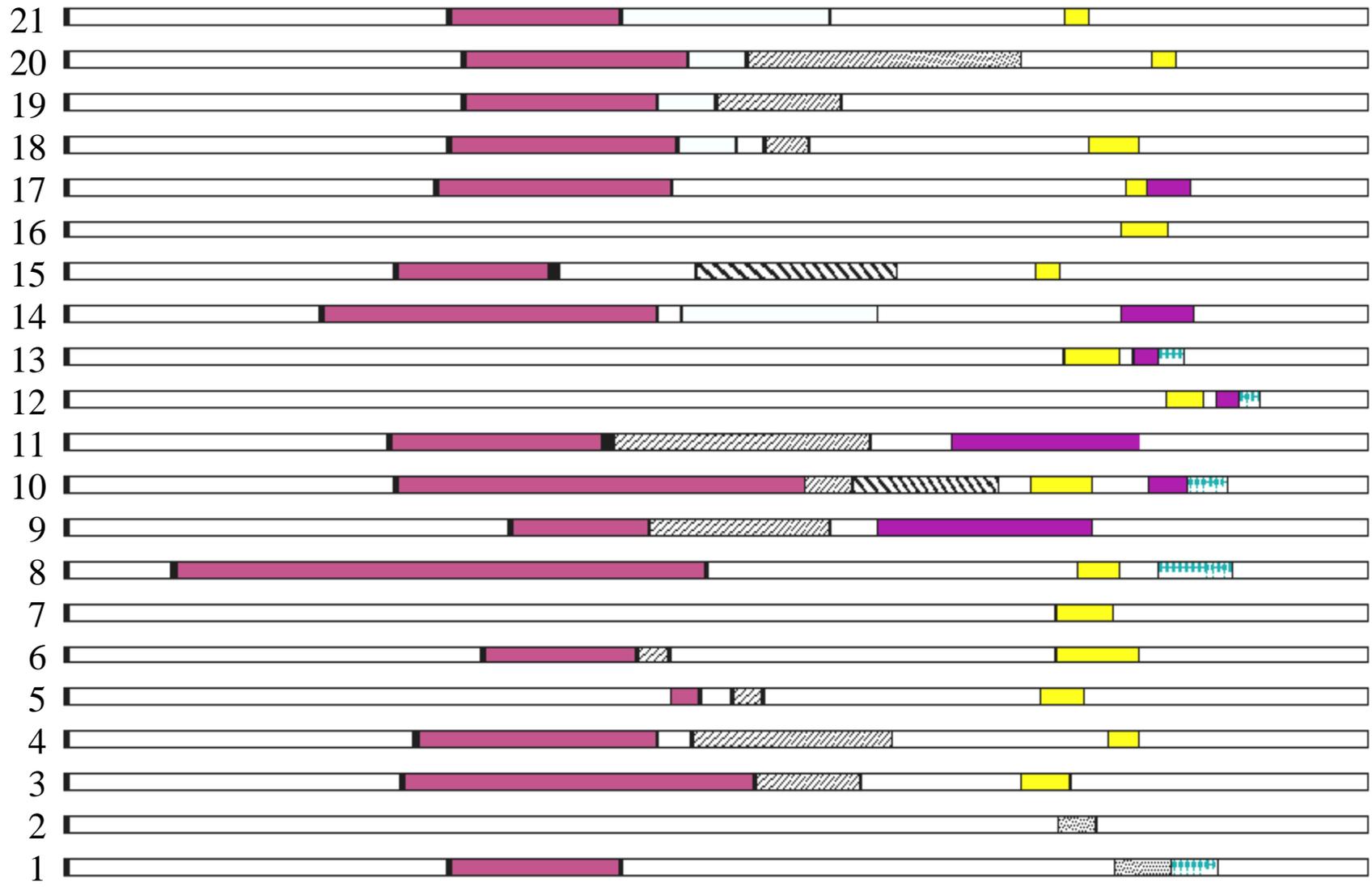
Ce projet-TP a été l'occasion pour moi d'effectuer des mesures sur un phénomène qui m'avait beaucoup attiré par son côté spectaculaire et par la simplicité du dispositif expérimental à utiliser. Une simple montre, une cuiller à café et une plaque de cuisine auraient pu permettre des mesures suffisantes pour toucher à des phénomènes encore inexpliqués en physique. Ce fut intéressant de mettre en œuvre une démarche expérimentale autour d'un dispositif si rudimentaire, et d'essayer de tirer quelque chose de phénomènes à l'aspect chaotiques. J'ai compris qu'il ne faut pas aller bien loin pour rencontrer l'inconnu en physique, et je ne pense pas qu'avec un matériel beaucoup plus sophistiqué les résultats auraient permis plus de quantitatif. Il faudrait cependant avoir le contrôle (et la mesure) de la température afin d'aller plus avant. Les points dignes de prolongement seraient sans doute l'étude du lien température-modes vibratoires, ainsi qu'une nouvelle série de mesures ayant pour but de vérifier l'existence de liens de causalité entre les modes.

modes en fonction du volume



Modes en fonction du volume

Mesures



- Mode impair
- Mode 6
- ▨ Mode 4
- ▩ Mode 2
- Mode 4-n
- Tourne
- Mode 2

1 0,9 0,8 0,7 0,6 0,5 0,4 0,3 0,2 0,1 0

Volume en mL