



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE

Chaud...froid...Ecoute les indices



LPI

Lycee Pilote Innovant International

Projet présenté par :

- *Lila ROUILLARD*
- *William DRJOT*
- *Wenjin YAN*
- *Pierre LOUSTE*
- *William GOLIGER*

Résumé :

Lorsque l'on verse de l'eau dans une tasse, nous sommes habitués à entendre un ensemble de sons qui accompagnent ce remplissage. Nous sommes même habitués à entendre de l'eau chaude versée et de l'eau froide versée dans une tasse, car il y a bien une différence.

Quelle est l'origine physique de cette différence ?

C'est la quête dans laquelle nous nous sommes lancés et à laquelle nous tenterons de répondre. Et pour cela, il a fallu faire du tri. Du tri dans les sons perçus tout d'abord, car ces sons produits lors du remplissage n'ont pas la même origine physique. Et une fois mieux cernés ces signaux, la question était alors de savoir si l'un d'entre eux était modifié par le fait de verser de l'eau froide plutôt que de l'eau chaude, ou bien est ce que quelque chose apparaît avec l'eau chaude, et qui n'existait pas avec l'eau froide, ou inversement ?

C'est en suivant une démarche d'investigation que nous avons tenté de répondre à tout cela.

Sommaire :

I - Présentation du phénomène observé

- 1 – Le phénomène
- 2 – Quelles sont les origines physiques des composantes des sons produits en versant de l'eau dans la tasse ?
- 3 – Des vibrations dans l'eau

II – En quoi la température de l'eau versée peut modifier la fréquence des sons décrits ?

- A – Vibration de la tasse
- B – Vibration de la colonne d'air
- C - L'interface eau/air peut-elle vibrer à une fréquence différente selon la température de l'eau ?

III – Des résultats étonnants et d'autres champs d'investigation :

- 1 – Durée de vibration d'une bulle
- 2 – Dynamique dans l'eau froide et dans l'eau chaude
- 3 – Une expérience troublante

Introduction :

Peut-être l'avez-vous vous aussi remarqué, mais si ce n'est pas le cas, prenez quelques secondes pour le faire : verser de l'eau froide dans une tasse. Puis verser de l'eau chaude dans la même tasse une fois vidée.

Et bien voilà... Vous êtes vous aussi en train de formuler des hypothèses pour expliquer ce que vous venez de constater : une différence de son, selon que la température de l'eau est plutôt 20°C, ou plutôt proche de 100°C.

Notre projet consiste à rechercher l'explication de ce phénomène. Pour cela, il faut que nous comprenions pourquoi, de façon générale, nous entendons un son lorsque nous versons de l'eau dans une tasse. Puis une fois que nous aurons compris l'origine de ce (ou ces) sons, nous chercherons si l'un de ces sons est modifié en fréquence ou en amplitude, selon que l'on verse de l'eau chaude ou de l'eau froide dans la tasse. Nous tenterons aussi de savoir si quelque chose de fondamentalement nouveau apparaît dans un cas et pas dans l'autre. Nous devrons donc veiller à ne pas fermer la porte à des éventuelles explications qui pourraient se dégager de nos expériences.

Dans tous les cas, prenez vous aussi le temps d'imaginer l'explication du phénomène au fur et à mesure de nos investigations, car c'est avec plaisir que nous partageons ici notre enquête avec vous !

I – Présentation du phénomène observé :

1 - Le phénomène

Ce projet part d'un constat que l'on peut faire, dans la vie courante, à condition d'aimer les boissons chaudes. Mais on peut tout aussi bien passer à côté, car ce n'est que si on verse de l'eau chaude et de l'eau froide dans des tasses que l'on peut être confronté à ce que nous avons observé.

Prenez une tasse, de préférence assez profonde, et versez de l'eau froide dedans. Videz là, puis versez de l'eau chaude. Vous avez entendu une différence ? Il se peut que non... Peut-être parce que vous n'avez pas prêté attention... Alors recommencez et écoutez.

Le son paraît plus sourd lorsqu'on verse de l'eau chaude que lorsqu'on verse de l'eau froide dans la tasse.

Cette observation peut être délicate, car on distingue un ensemble de sons différents lorsqu'on verse de l'eau dans la tasse. Et le phénomène que l'on cherche alors à expliquer se mélange à tout cet ensemble de sons.

Et comme cela est une impression, et qu'une impression comporte une part plus ou moins grande de subjectivité, et il convient peut-être de mener une mesure plus objective pour tenter de décrire cette différence.

Pour cela, nous avons choisi de réaliser un spectrogramme du son produit lors du remplissage de la tasse. Pour cela, nous avons veillé à nous placer dans les mêmes conditions expérimentales lors du remplissage par de l'eau froide puis par de l'eau chaude (figure 1). En particulier, nous avons tenu à garder identiques les distances entre les différents éléments intervenant dans l'expérience, et nous avons fait en sorte que le débit de remplissage de la tasse soit identique dans les 2 cas. Pour éviter de toucher aux éléments du montage, nous avons vidé la tasse en utilisant un siphon.



Figure 1 : Enregistrement du son obtenu en versant l'eau dans la tasse

L'analyse spectrale donne alors les spectrogrammes suivants : figure 2

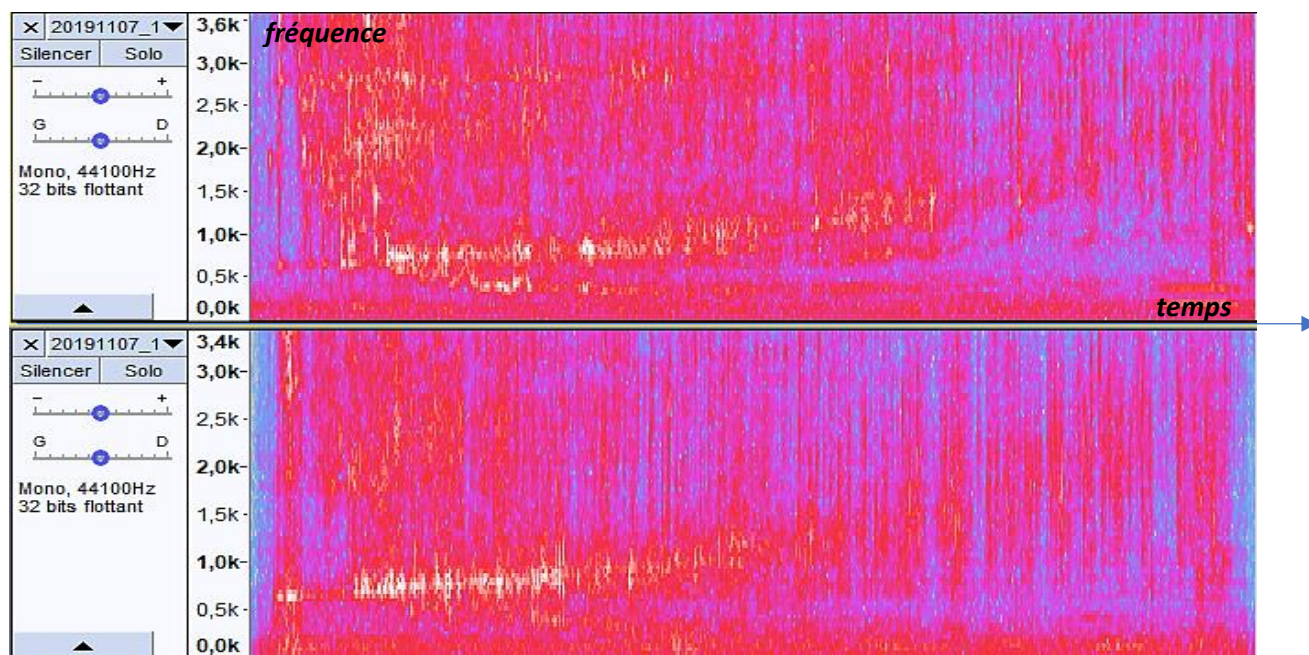


Figure 2 : spectrogramme du son obtenu en versant l'eau froide (au-dessus) et l'eau chaude (en-dessous)

Pour se rendre compte du son produit, **voici la bande sonore** correspondant à ces spectrogrammes :

A première vue, il semble compliqué d'y voir clair dans ces spectrogrammes. Et pourtant, à force de réaliser cette expérience, nous sommes maintenant en mesure de dire quel spectre doit être attribué à celui de l'eau froide, et lequel concerne l'eau chaude sans pour autant avoir vu l'expérience. Nous sommes également en mesure de savoir si on verse de l'eau froide ou de l'eau chaude simplement en écoutant le son produit.

La différence entre ces deux spectres se fait surtout au début du remplissage de la tasse. On remarque en effet que le spectrogramme du dessus présente des fréquences entre 1000 Hz et 3000 Hz plus intenses que celles présentes dans le spectrogramme du dessous. S'agit-il de fréquences présentes lorsqu'on verse de l'eau froide uniquement, ou bien sont-elles des fréquences présentes dans les deux spectrogrammes, mais plus intenses dans le spectrogramme obtenu en versant l'eau froide ? Ce sont là des questions auxquelles il nous faudra répondre. D'autre part, il semblerait que la composante du son dont la fréquence diminue décroît davantage avec l'eau chaude qu'avec l'eau froide.

Pour savoir ce qui peut être modifié lorsqu'on verse de l'eau chaude par rapport à de l'eau froide, nous avons tout d'abord voulu savoir s'il était possible d'identifier les différents sons que l'on peut distinguer dans les spectrogrammes.

2 – Quelles sont les origines physiques des composantes des sons produits en versant de l'eau dans la tasse ?

Essayons d'attribuer les signaux observés à leurs origines physiques.

Alors que voit-on dans chacun de ces spectres ?

- Une fréquence qui diminue au cours du temps, en passant d'environ 600 Hz à 200 Hz lorsque la tasse est remplie.
 - Une fréquence qui augmente au cours du temps, en passant d'environ 600 Hz à 1200 Hz lorsque la tasse est remplie.
 - Des fréquences qui restent stables tout au long du remplissage de la tasse, l'une aux alentours de 600 Hz, et l'autre aux alentours de 2700 Hz.
- Concernant la composante du signal dont la fréquence augmente lors du remplissage, nous pensons pouvoir attribuer cela au fait que la hauteur d'air située entre la surface du liquide et le haut de la tasse devient de plus en plus faible. Cette hauteur jouerait alors le rôle d'une caisse de résonance, en amplifiant les sons dont les fréquences seraient de plus en plus élevées lors du remplissage, du fait que la longueur de la caisse de résonance deviendrait de plus en plus faible.

Comme il s'établirait alors des ondes stationnaires dans cette caisse de résonance qui aurait alors un côté fermé, et un côté ouvert (figure 3), la longueur d'onde λ du mode fondamental de cette caisse de résonance serait alors telle que :

$$\lambda = 4L$$

D'où la fréquence du mode fondamental :

$$F = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$$

Nous pouvons vérifier cette hypothèse en calculant la fréquence théorique qui doit être amplifiée lorsque la tasse est vide, puis en traçant l'évolution théorique de cette fréquence lors du remplissage de la tasse, et enfin en comparant la

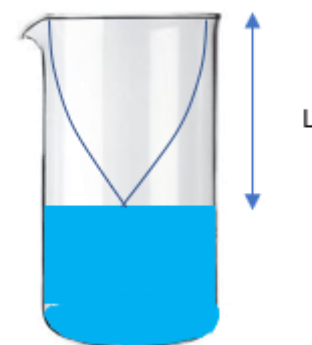


Figure 3 : Mode fondamental de la vibration de la colonne d'air au-dessus du liquide

courbe obtenue à l'évolution de la composante dont la fréquence augmente dans le spectrogramme.

La fréquence théorique du mode de vibration fondamental de la tasse, de hauteur H , contenant une hauteur d'eau h ,

$$F_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4 \times (H - h)}$$

La colonne d'air de hauteur $(H-h)$ peut aussi en théorie vibrer selon les harmoniques supérieures répondant à la relation

$$F_n = (2n - 1)F_1$$

Ainsi, par exemple, les trois premières harmoniques d'une colonne d'air doivent suivre les fréquences suivantes en fonction de la longueur de la colonne d'air : figure 4

Comparons alors ces évolutions théoriques aux évolutions des fréquences des différentes composantes sonores apparaissant dans les spectrogrammes, on obtient le diagramme suivant : Figure 5

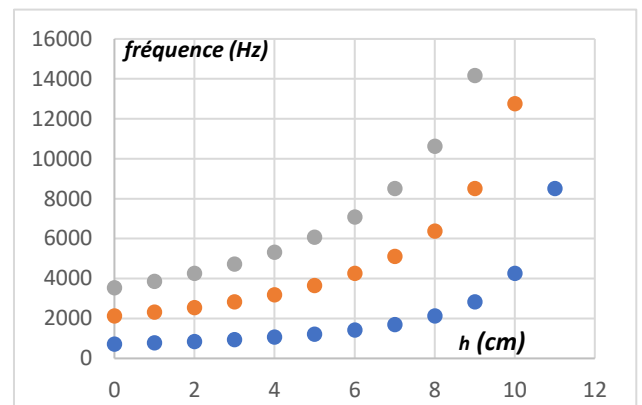


Figure 4 : évolution de des trois premiers modes propres théorique d'une colonne d'air fermée à une extrémité et ouverte à l'autre

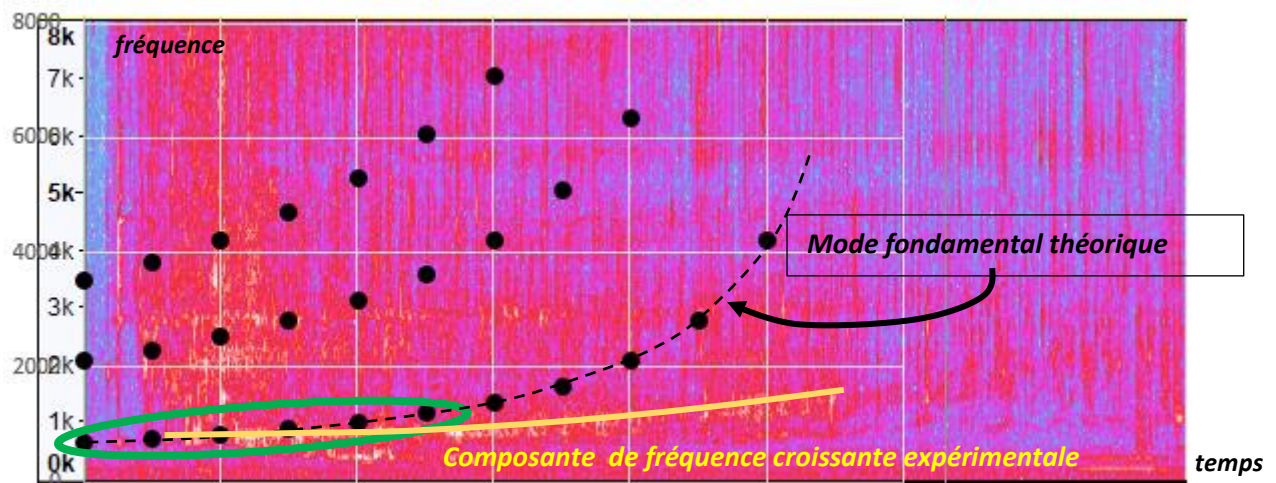


Figure 5 : comparaison du spectrogramme aux modes théoriques de vibration de la colonne d'air

Concernant le mode fondamental de vibration : on remarque que si, dans la toute première partie du remplissage de la tasse, cette courbe semble cohérente avec celle montrant l'évolution de la composante sonore dont la fréquence croît dans le spectrogramme (dans l'ovale en vert sur le diagramme), elle s'en écarte sérieusement dans toute la suite du remplissage.

Peut-on alors réellement attribuer la courbe jaune du spectrogramme à la vibration de la colonne d'air présente dans la tasse ?

Pour le savoir, nous avons mesuré la fréquence de résonance de cette colonne d'air, après remplir la tasse centimètre par centimètre avec de l'eau.

Pour cela, (figure 6) nous avons produit un son sinusoïdal, grâce à un haut-parleur placé au-dessus du b cher, et nous avons recher   pour quelle fréquence du signal le son était alors amplifié par la tasse. Nous avons

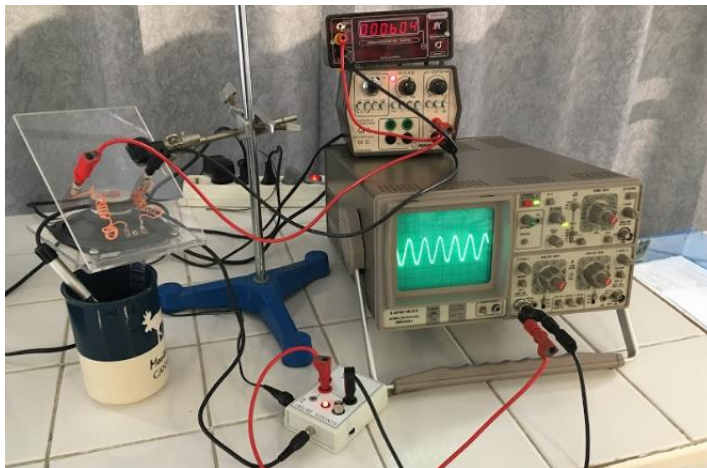


Figure 6 : dispositif expérimental permettant de mesurer les modes propres de vibration de la colonne d'air de la tasse

L'expérience révèle alors plusieurs modes de vibration de l'air, pour différentes fréquences. Certaines fréquences étaient faciles à suivre au cours du remplissage de la tasse. C'est le cas du premier mode propre de vibration, pour lequel on voit à quel point sur la figure 7 la résonance est bien marquée.

D'autres modes de vibration étaient plus difficiles à repérer, comme celui sur le graphique, en bleu figure 8, qui n'apparaît qu'à partir d'un remplissage de 7 cm de la tasse. Voici les résultats obtenus : figure 8

Superposons alors le spectrogramme aux courbes de résonance de la colonne d'air obtenues expérimentalement : figure 9

fait cela après chaque ajout d'eau. La fréquence est ajustée grâce à un GBF, et le signal est capté par un microphone, et visualisé sur un oscilloscope pour mesurer l'amplitude du son et repérer les amplitudes maximales de vibration. Cette expérience nous permet donc de mesurer la fréquence de résonance de la colonne d'air.

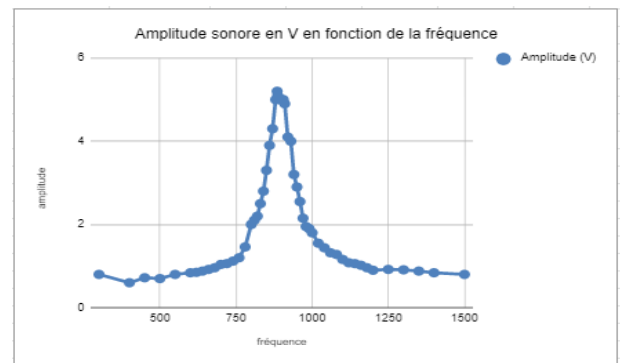


Figure 7 : Mesure d'une fréquence de résonance, en faisant varier la fréquence du haut-parleur autour de la fréquence du mode fondamental pour une hauteur d'eau fixée dans la tasse.

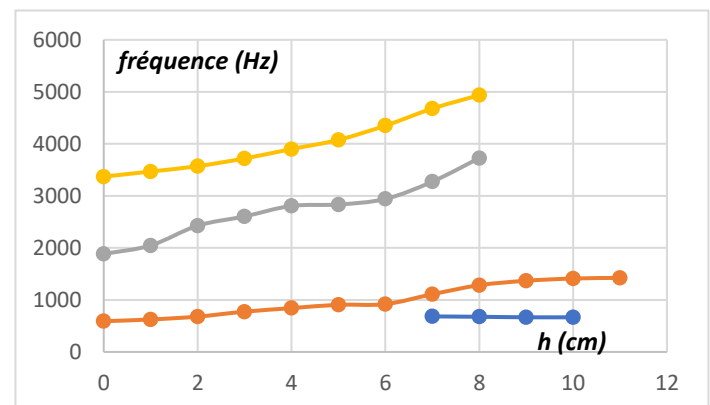


Figure 8 : Modes propres de vibration de la colonne d'air contenu dans la tasse en fonction de la hauteur d'eau.

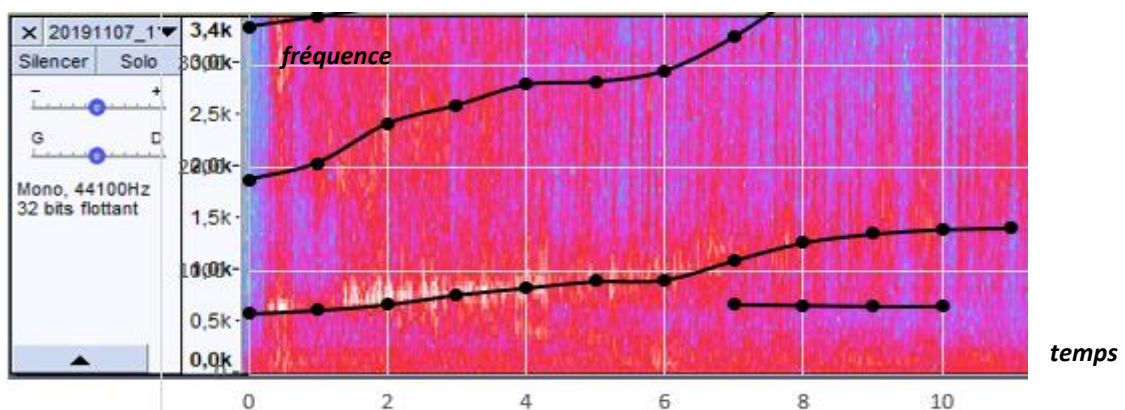


Figure 9 : Comparaison des modes propres de vibration de la colonne d'air avec les composantes sonores révélées par le spectrogramme

La superposition de l'évolution de la fréquence de la composante de fréquence ascendante dans le spectrogramme à celle du premier mode de vibration de la colonne d'air confirme finalement que cette composante est bien issue de la vibration de la colonne d'air. Les harmoniques supérieures de la colonne d'air ne semblent par contre pas présentes dans le spectrogramme.

- Concernant la fréquence qui diminue dans le spectrogramme, de 680 à environ 200 Hz, nous pensons pouvoir attribuer ce son à la vibration de la tasse. En effet, le son est issu d'une oscillation d'un système vibrant. On pourrait d'ailleurs faire une analogie entre la tasse et un système solide ressort (figure 10), dont la fréquence propre d'oscillation répond à la relation :

$$F = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Ce système vibrant serait ici la tasse et l'eau qu'elle contient. Ainsi, au cours de son remplissage, le système devient de plus en plus lourd et doit alors osciller à une fréquence de plus en plus faible, de même que ce que l'on observerait en augmentant la masse accrochée à un ressort, compte tenu de la relation écrite ci-dessus.

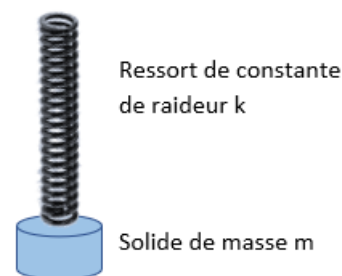
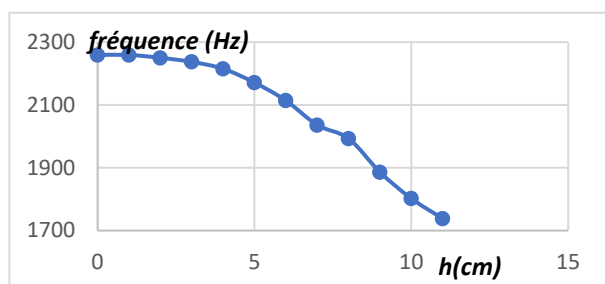


Figure 10



Pour vérifier cette hypothèse, nous avons rempli la tasse, centimètre par centimètre, et nous avons après chaque ajout d'eau, tapé sur la tasse pour la faire vibrer. Nous avons relevé alors les fréquences des sons produits, au moyen d'une application nommée FFT spectrum analyser (Figure 11)

Figure 11 : Evolution de la fréquence de vibration de la tasse en fonction de la hauteur d'eau qu'elle contient

La fréquence de la vibration de la tasse diminue donc bien au fur et à mesure du remplissage. Mais on remarque que la fréquence passe d'environ 2300 Hz, à environ 1750 Hz. Ces valeurs montrent alors que la composante du son, dont la fréquence diminue de 680 à environ 200 Hz dans le spectrogramme, n'est pas dû à la vibration de la tasse.

Si ce n'est ni la vibration de l'air, ni la vibration de la tasse, qui produit ce son dont la fréquence diminue, c'est qu'il s'agit de la vibration du seul élément que nous n'avons pas encore analysé : l'eau.

3 – Des vibrations dans l'eau

Nous avons cherché à voir ce qui se passe au niveau de l'eau. Nous avons alors versé de l'eau dans un bécher, et nous avons constaté les faits suivants :

Lorsqu'on verse l'eau, il se forme un tas de bulles dans l'eau (figure 12b). Si le filet d'eau est fin et tombe de façon très régulière dans l'eau (figure 12a), sans qu'il ne se forme alors de bulle, on n'observe alors pas de son.

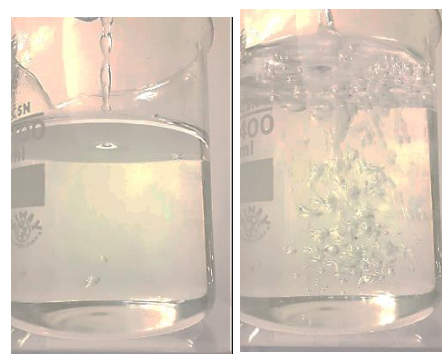


Figure 12a – filet d'eau ne formant pas de bulles – Figure 12b – Filet d'eau pus chaotique, formant des bulles dans l'eau

Les bulles semblent donc être à l'origine du son que l'on entend. Est-ce qu'alors, la composante du son qui diminue en fréquence dans les spectrogrammes peut être attribuée aux bulles ?

Cela est possible. En effet, on peut suivre le lien entre les bulles formées et le spectrogramme avec la figure 13, au début du remplissage, la faible quantité d'eau qui se trouve dans le bécher limite la quantité de bulles formées. Quand on continue de verser de l'eau dans la tasse, la hauteur d'eau augmentant dans la tasse, la quantité de bulles formées peut alors être plus importante si on verse l'eau avec un débit qui reste relativement constant. C'est durant cette phase que la fréquence du son diminue le plus rapidement. Si on continue de remplir la tasse, il arrive un moment où le tas de bulles formées par unité de temps reste constant. La fréquence se stabilise alors à sa valeur minimale. Et pour finir, en fin de remplissage, le débit

diminue fortement jusqu'à devenir nul, et la fréquence du son augmente alors brusquement. L'évolution de la fréquence observée dans le spectrogramme est en parfaite adéquation avec ce scénario.

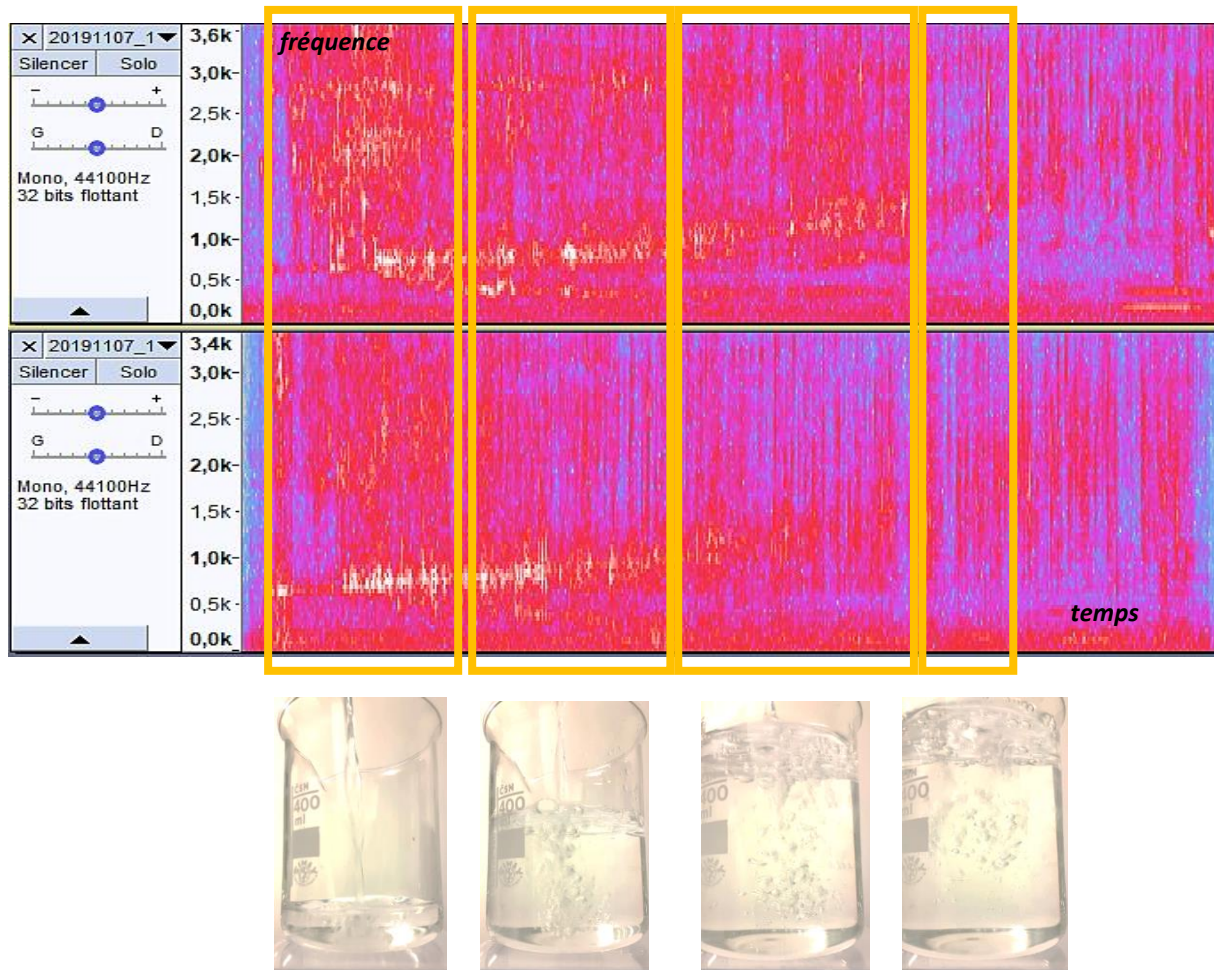


Figure 13 – Comparaison entre le tas de bulles formées au cours du remplissage, et la composante sonore dont la fréquence décroît dans le spectrogramme

Si cette hypothèse est la vraie, La fréquence du son que l'on peut associer aux bulles doit diminuer dès que l'on commence à remplir la tasse, jusqu'à ce que la quantité de bulles formées par unité de temps reste constante. Cela signifierait alors que la composante du son dans le spectrogramme ne commencerait pas aux alentours de 600 Hz, comme on le pensait initialement, mais commencerait avec une plus haute fréquence lorsqu'on commence à remplir la tasse : figure 14.

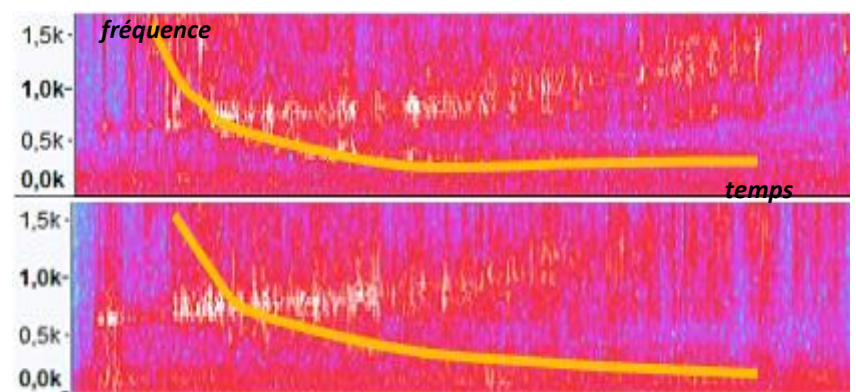


Figure 14 – Evolution probable de la fréquence de la composante sonore dont la fréquence décroît lors du remplissage

Comme nous ne pouvons pas nous contenter d'émettre des hypothèses sans les mettre à l'épreuve scientifiquement, nous avons alors voulu vérifier que les bulles formées pouvaient effectivement produire un son.

Nous avons pour cela fait tomber des gouttes d'eau une à une dans de l'eau. Suite à l'impact de la goutte sur la surface de l'eau, une bulle d'air apparaît et surnage à la surface de l'eau. En filmant de côté la scène, il s'avère que le son est créé après l'impact, lors de la formation d'une bulle d'air. Une fois formée, la bulle ne fait plus de bruit. On voit sur la figure 15 que l'impact de la goutte d'eau a eu déjà eu lieu (on observe le cratère créé à la surface de l'eau). Par contre, sur la bande sonore, le son n'arrive que 4 centièmes de seconde après l'impact.

Nous nous sommes amusés à mesurer la fréquence de vibration des sons issues alors de la formation des bulles, et nous avons trouvé des fréquences comprises entre 1000 et 2000 Hz. Ces valeurs nous ont conduit à faire les remarques suivantes :

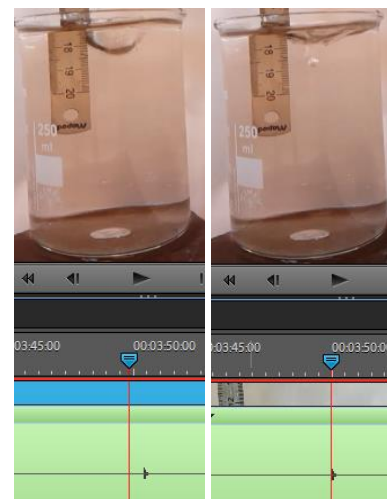


Figure 15 – Enregistrement du son produit par une bulle créée par l'impact d'une goutte dans

- Comme le son est issu d'ondes stationnaires qui s'établissent dans le système vibrant, il est clair que ce n'est pas l'air dans la bulle qui vibre et qui génère le son. En effet, si on assimile la bulle à une colonne d'air fermée à ses deux extrémités, une bulle de l'ordre de $D = 2\text{mm}$ de diamètre devrait produire des sons de fréquence

$$F = \frac{C}{2D} = 85000 \text{ Hz}$$

Du coup, si ce n'est pas l'air qui vibre, ce ne peut-être que l'enveloppe de la bulle, c'est-à-dire l'interface air-eau. Et cela est particulièrement intéressant de savoir cela, comme nous allons le voir par la suite.

- La deuxième remarque est de dire que vu que les bulles génèrent des sons généralement compris entre 1000 et 2000 Hz, une bulle a elle seule ne peut être responsable des sons d'environ 200 Hz dont on cherche à comprendre la cause. (il faudrait pour cela des bulles de 80 cm de diamètre !). Il est alors possible que ce son ne soit pas produit par une seule bulle, mais par l'ensemble des bulles présentes dans la tasse. Est-ce que c'est bien le cas ?

Oui, pas tout à fait comme nous le pensions : en fait, nous avons pu voir qu'en 2015, dans notre lycée, nos prédécesseurs avaient réalisé un projet dans lequel ils expliquaient que la présence des bulles dans un liquide contenu dans une tasse était en mesure de modifier la fréquence de vibration de l'ensemble « tasse + liquide qu'elle contient ».

Et effectivement, nous avons versé de l'eau (peu importe sa température) dans une tasse. En fonction du débit avec lequel on verse l'eau, on crée alors une certaine quantité de bulles. Pendant ce temps-là, on tape alors dans le fond de la tasse avec une cuillère. On constate alors bien un son d'autant plus grave que la quantité de bulles formées est grande.

Le projet expliquait alors que la présence des bulles dans le liquide rendait le liquide plus malléable. Et en reprenant alors l'analogie entre le système « tasse + liquide » et le système « solide ressort », on pouvait alors comprendre que le liquide plus malléable conduisait à un système avec une constante de raideur analogue k plus faible, ce qui diminuait donc la fréquence propre de vibration du système.

Pour finir avec ce paragraphe, nous avons tout de même aller jusqu'au bout de notre étude, en mesurant les fréquences des sons obtenus en tapant dans le fond de la tasse durant son remplissage. Nous avons représenté sur le **graphique l'évolution** de la fréquence lors du remplissage : La courbe obtenue est complètement cohérente avec la composante sonore dont la fréquence décroît sur les spectrogrammes. Nous pouvons donc conclure de tout cela que la composante du son dont la fréquence décroît dans les spectrogrammes ne provient pas directement des bulles, mais provient de la vibration de la tasse, vibrations créées lors du remplissage, qui est modifiée par la quantité de bulles présentes dans l'eau lorsque l'on verse l'eau dans la tasse.

En fait, on s'est rendu compte que les bulles sont présentes dans tous les sons que l'on entend :

- Elles vibrent et produisent en ensemble de sons, et certaines fréquences vont être amplifiées par la colonne d'air située dans la tasse au-dessus du liquide, et
- Elles modifient l'élasticité du liquide, donc l'élasticité du dispositif « tasse + liquide », conduisant à des fréquences propres de vibration différentes de ce système.

Nous avons donc fait le tour des différentes source sonores qui apportent plus ou moins leur contribution au son que l'on entend lorsqu'on verse de l'eau dans une tasse. Il reste maintenant à savoir si un au moins de ces sons peut être modifié selon que l'eau versée dans la tasse est froide ou chaude.

II – En quoi la température de l'eau versée peut modifier la fréquence des sons décrits ?

Avant d'explorer les différentes hypothèses que nous allons présenter, il faut avoir en tête la chose suivante :

Le fait que le son paraisse plus sourd lorsqu'on verse de l'eau chaude par rapport à l'eau froide peut venir

- Soit du fait qu'un élément vibre à une fréquence plus grave avec l'eau chaude qu'avec l'eau froide.
- Mais cela peut aussi être dû au fait que les amplitudes de vibration des composantes sonores sont modifiées lors qu'on verse de l'eau chaude ou froide. On peut par exemple penser qu'avec l'eau chaude, les fréquences les plus aiguës produites lorsqu'on verse de l'eau froide sont atténuées, rendant alors le son globalement plus sourd avec l'eau chaude. Ceci sans pour autant que les valeurs des fréquences des sons des différentes composantes soient modifiées.
- Soit les fréquences et les amplitudes sont modifiées

Bref, si cela est possible, nous cherchons maintenant des différences aussi bien en termes de fréquences que d'amplitude des différents sons générés en versant de l'eau froide, ou chaude dans la tasse. Et nous devons faire cette recherche au niveau de :

- la vibration de la tasse
- la vibration de la colonne d'air
- la vibration de l'interface air-eau

A – Vibration de la tasse

1) Est-ce que la fréquence de vibration de la tasse à vide est sensible à la température de la tasse ?

La question mérite d'être posée. En effet, le fait de verser de l'eau chaude dans la tasse augmente la température de la tasse, ce qui en modifie les caractéristiques mécaniques. Il se peut alors qu'elle vibre à d'autres fréquences que lorsque la tasse est froide.

Nous avons alors chauffé une tasse jusqu'à une température de 100 °C, puis nous avons tapé sur la tasse vide et nous avons enregistré et analysé le son produit. Nous avons laissé la tasse refroidir jusqu'à température ambiante et nous avons à nouveau tapé sur la tasse vide. Voici les spectres des sons obtenus : figure 16

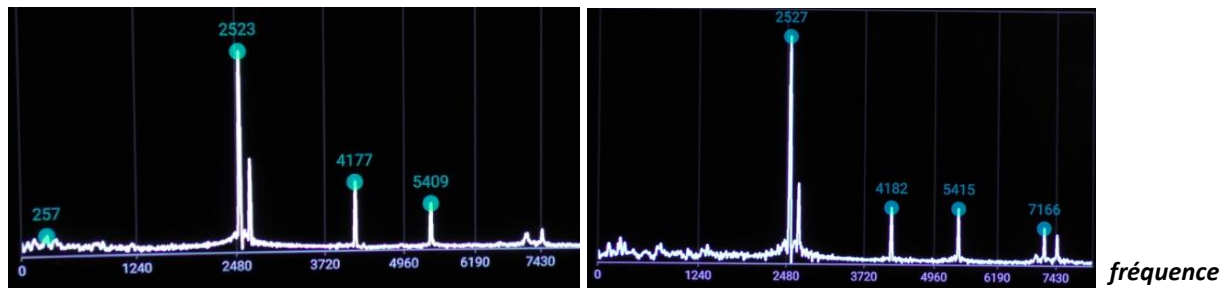


Figure 16 – A gauche : spectre sonore obtenu avec la tasse froide – A droite : spectre obtenu avec la tasse chaude

La comparaison des spectres permet de dire que la fréquence de vibration de la tasse elle-même est indépendante de la température. Les amplitudes relatives des différents modes propres de vibration de la tasse sont également trop peu différentes pour conduire à une modification sensible du timbre. D'ailleurs, lorsqu'on écoute ces deux sons, on n'entend effectivement pas de différence.

2) Est-ce que la différence de densité de l'eau chaude et froide peut modifier la fréquence de vibration de la tasse ?

L'eau chaude à 100°C a une densité de 0,96, soit environ 4% moins grande que la densité à 20°C (figure 17). On pourrait alors dire qu'une même masse d'eau chaude occuperait un volume 4% plus grand que l'eau froide, ou de même, que pour un même volume d'eau versé dans la tasse, la masse de l'eau chaude est plus faible de 4% de celle de l'eau froide.

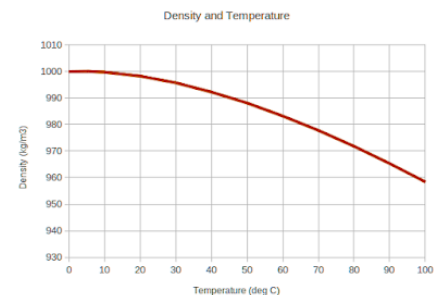


Figure 17 – Densité de l'eau en fonction de la température

- Est-ce que cette différence de masse va générer un son de plus faible fréquence ? Non, au contraire, puisqu'en augmentant la masse d'eau, on a vu précédemment que cela diminuait la fréquence de vibration de la tasse.
- Est-ce que cette différence de densité va modifier les amplitudes de vibration des différents modes de vibration de la tasse ?

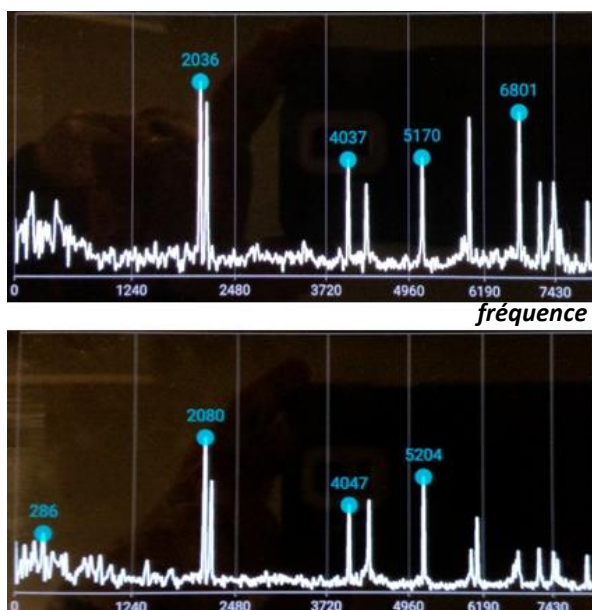


Figure 18 – au dessus : spectre de la tasse pleine d'eau froide - Au dessous : spectre de la tasse pleine d'eau chaude

Pour le savoir, nous devons comparer avec précision les amplitudes de vibration de la tasse remplie d'eau chaude, puis d'eau froide.

Voici les spectres des sons obtenus en tapant sur la tasse (spectres obtenus avec l'application FT spectrum analyser) : Figure 18

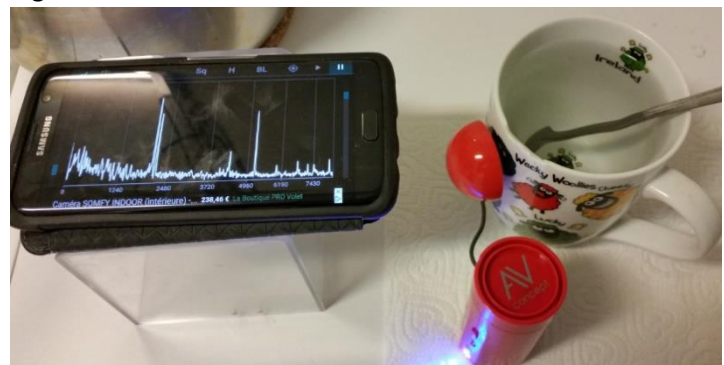


Figure 19 – Utilisation d'une membrane vibrante pour faire vibrer la tasse.

Il semble donc qu'il y ait des différences, mais elles semblent faibles. Afin de confirmer ou pas ces différences de façon plus précise, nous avons cherché à faire vibrer la tasse au moyen d'une membrane vibrante (figure 19) que nous collons sur la tasse et dont nous pouvons choisir la fréquence de vibration.

L'avantage est alors que nous sommes certains d'exciter la tasse de la même manière lorsqu'on passe de la tasse remplie d'eau froide, à la tasse remplie d'eau chaude.

Nous avons réalisé un balayage en fréquence de 200 Hz à 6000 Hz. Voici les résultats obtenus : figure 20

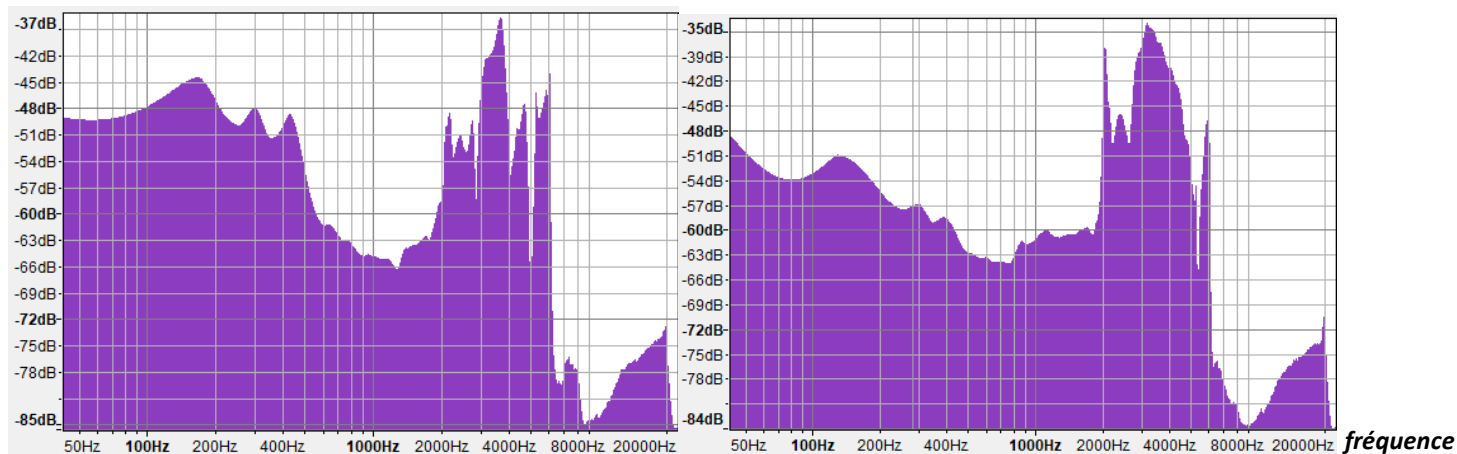


Figure 20 : Spectre obtenu avec la tasse pleine d'eau froide (à gauche) et d'eau chaude (à droite)

Le spectre obtenu avec l'eau chaude, et celui obtenu avec l'eau froide, sont presque identiques, confirmant les résultats obtenus avec l'application précédente. La densité de l'eau ne semble donc pas jouer un rôle particulier dans le phénomène que l'on souhaite expliquer.

B – Vibration de la colonne d'air

La colonne d'air est capable de vibrer selon ses modes propres de vibration, donc les longueurs d'onde sont fixées par les caractéristiques géométriques de la colonne d'air. Or la longueur d'onde de ces ondes stationnaires, la célérité et la fréquence sont reliées par la relation :

$$c = \lambda \times F$$

Du coup, si le fait de verser de l'eau chaude par rapport à de l'eau froide modifie le milieu dans lequel s'établissent les ondes stationnaires, la célérité peut être modifiée, ce qui conduirait à une modification de la fréquence de vibration de la colonne d'air. Nous avons alors identifié deux choses qui sont modifiées dans la colonne d'air lorsqu'on verse de l'eau chaude par rapport à verser de l'eau froide :

1) Est-ce que la température de l'air peut amener la colonne d'air à vibrer différemment, selon qu'on verse de l'eau chaude ou froide dans la tasse ?

Il est vrai que la température de la colonne d'air doit rapidement être modifiée du fait de la température de l'eau. Or nous avons vu que la célérité des ondes sonores dépend de la température selon la relation :

$$c = 20,05\sqrt{T}$$

Donc plus la température augmente, et plus la célérité du son est grande. Comme on sait que $c = \lambda \times F$ et que λ est fixée, cela doit conduire à une fréquence qui augmente.

Une augmentation de la température de l'air conduit alors à une augmentation de la fréquence de résonance, ce qui ne peut donc pas expliquer le phénomène observé puisqu'il va à l'encontre de cette observation.

2) Est-ce que l'humidité de la colonne d'air, obtenue en versant l'eau chaude, modifie la façon dont l'air vibre ?

On voit clairement lorsqu'on verse de l'eau chaude, une épaisse couche de microgouttes en suspension dans l'air au-dessus de la tasse. L'air au-dessus de l'eau chaude est donc saturée en vapeur d'eau.

Peut-être que l'humidité de l'air, ou bien les microscopiques gouttelettes issues de la condensation de la vapeur d'eau dans l'air de la tasse, seraient capables d'atténuer les hautes fréquences, un peu à la manière des bouchons d'oreille ?

Pour le savoir nous avons cherché à savoir si des ondes acoustiques de fréquences différentes subissaient une atténuation différente. Nous espérons lors de cette expérience, voir une atténuation des hautes fréquences en présence d'humidité ou des microgouttelettes d'eau, ce qui expliquerait la sensation de son sourd ou étouffé que l'on entend.

Pour cela, (figure 21) nous avons pris un tuyau de longueur 50,7 cm. Nous avons, à l'une de ses extrémités, généré un son sinusoïdal dont nous avons fait varier la fréquence en continu, de 200 à 3000 Hz durant 10s. A l'autre extrémité du tuyau, nous avons disposé un microphone. Nous avons alors réalisé une acquisition durant tout le balayage en fréquence, puis nous avons fait une analyse spectrale du signal enregistré. Nous avons ensuite, sans rien toucher au dispositif expérimental, rempli le tuyau d'humidité, par le biais d'un tuyau acheminant la vapeur d'eau vers le tube en question (tout le dispositif pour générer la vapeur était déjà présent lors de la mesure sans vapeur de façon à ne pas modifier la façon dont les ondes remplissent le tube). Nous avons alors procédé à une nouvelle mesure avec une nouvelle analyse spectrale pour comparer à la fois les fréquences propres de vibration du tube, ainsi que les amplitudes des différents modes propres de vibration.

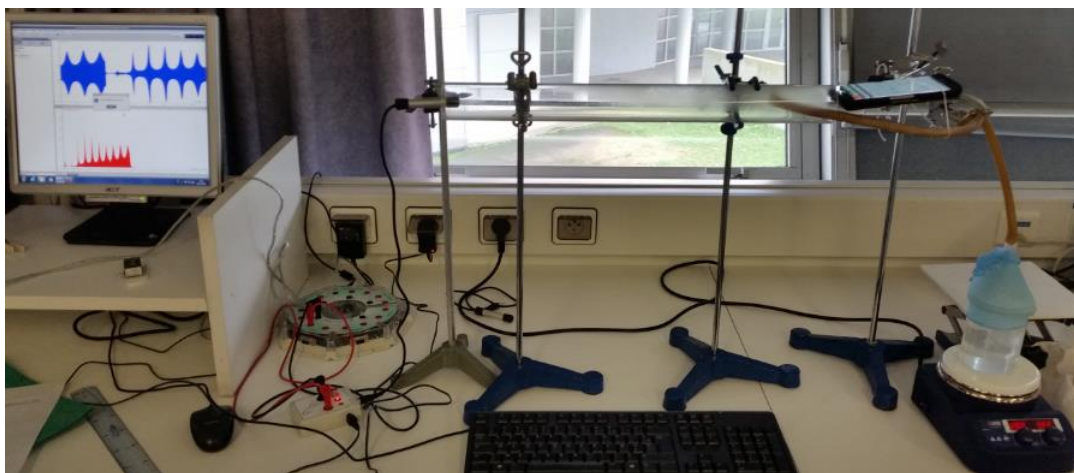


Figure 21 : dispositif permettant la mesure des modes propres de vibration de la colonne d'air sans, et avec une saturation en vapeur d'eau

Voici alors les résultats obtenus : figure 22

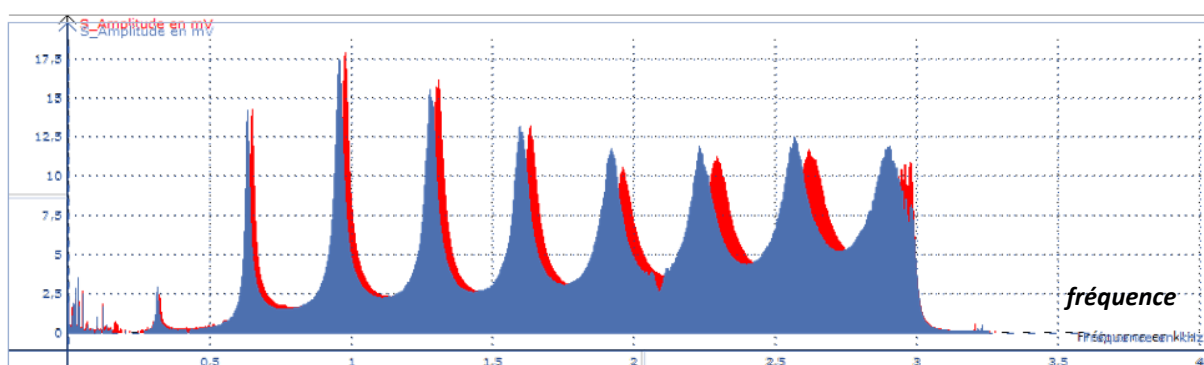


Figure 22 : comparaison des modes propres de vibration de la colonne d'air sec et d'air saturé en vapeur d'eau.

On constate que les fréquences des différentes harmoniques sont légèrement plus faibles dans le tube sans vapeur par rapport au tube avec vapeur. Ceci est peut-être dû au fait que la température est plus élevée dans le tube avec vapeur, comme nous l'expliquions dans le paragraphe précédent. Par ailleurs, on constate également qu'alors que les 5 premières harmoniques ont des amplitudes similaires, les harmoniques suivantes présentent des amplitudes plus grandes avec l'eau froide qu'avec l'eau chaude. Cela dit, est-ce que les faibles différences, de l'ordre de 10% entre les amplitudes des harmoniques, peut expliquer un son plus sourd avec l'eau chaude ? Pas du tout ! Nous avons évalué, en termes de décibel, ce que de telles différences d'amplitudes engendraient : seulement 0,5 dB. Or la sensibilité de l'oreille n'est pas capable de percevoir une telle différence.

C – L'interface eau/air peut-elle vibrer à une fréquence différente selon la température de l'eau ?

1) Viscosité :

Nous savons que les liquides sont d'autant moins visqueux que leur température est grande. C'est du moins ce que l'on peut constater lorsque l'on fait chauffer de l'huile dans une poêle : elle s'étale davantage lorsqu'elle est chaude. Il peut alors être intéressant de savoir si la viscosité de l'eau varie, et si oui, celle-ci peut-elle être significative au point d'engendrer les différences de sons observés ?

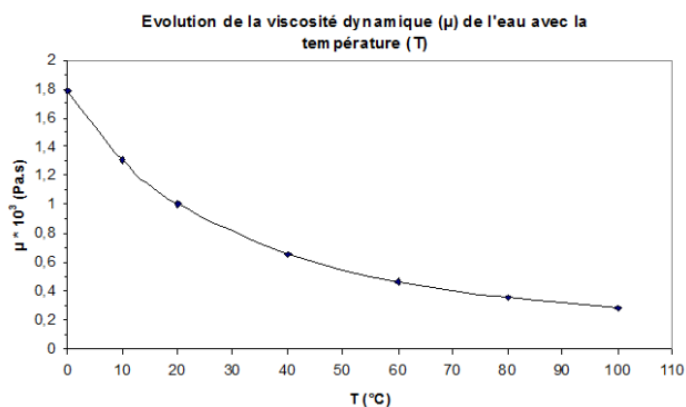


Figure 23 : Evolution de la viscosité de l'eau en fonction de la température

Quelques recherches nous ont permis de voir qu'effectivement, la viscosité de l'eau varie de façon importante avec la température, puisqu'entre 20°C et 90°C, qui sont à peu près les températures auxquelles nous travaillons lorsque nous versons respectivement de l'eau froide et chaude dans la tasse, la viscosité est multipliée par un coefficient environ égal à 7 !

La question est maintenant de savoir si la viscosité est capable de modifier la fréquence de vibration d'un système mécanique...

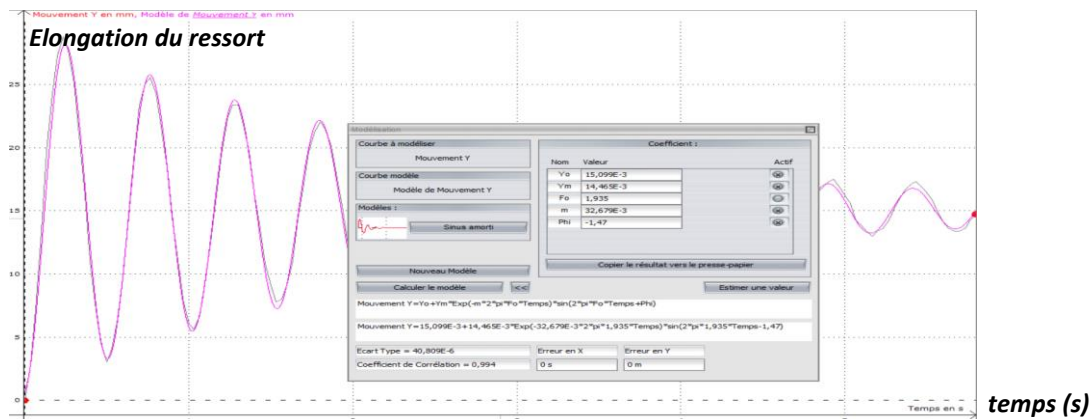
Pour cela, nous avons comparé la fréquence d'oscillation d'un dispositif solide ressort (figure 24) lorsque la masse plongeait dans l'air, dans l'eau froide, puis dans l'eau chaude : L'expérience a été filmée, puis analysée à l'aide du logiciel Latispro

Résultats : figure 25

Oscillation dans l'eau froide :



Figure 24 : oscillation d'une masse dans l'eau froide et dans l'eau



Oscillation dans l'eau chaude :



Figure 25 : au-dessus : oscillation dans l'eau froide – au dessous, oscillation dans l'eau chaude

Exploitation :

La fréquence est sensiblement identique que ce soit pour l'oscillation dans l'eau froide que dans l'eau chaude. Par contre, l'amplitude décroît plus rapidement dans l'eau froide que dans l'eau chaude. La modélisation permet d'ailleurs d'accéder au coefficient d'atténuation qui est de $32,7 \cdot 10^{-3}$ dans l'eau froide, et $27,6 \cdot 10^{-3}$ dans l'eau chaude. Le coefficient décroît donc d'environ 16% dans l'eau chaude par rapport à la valeur du coefficient dans l'eau froide, ce qui paraît cohérent puisque la viscosité engendre des forces de frottements qui dissipent de l'énergie.

Conclusion :

Il est difficile finalement de conclure à propos de cette expérience. En effet, le fait que la vibration du système à l'origine des sons dure plus longtemps dans l'eau chaude que dans l'eau froide n'est pas facilement fiable au fait que le son paraisse plus étouffé en versant l'eau chaude dans une tasse.

D'autre part, les systèmes vibrants que nous avons rencontrés dans la tasse vibrent entre 200 Hz et quelques milliers de Hertz. Est-ce qu'alors, la viscosité n'aura toujours aucune influence sur la fréquence de vibration du système ? Nous pensons que oui. En effet, nous avons rempli une tasse d'eau, puis d'huile, et nous avons tapé sur la tasse pour différentes hauteurs de remplissage. Nous avons alors obtenu des très faibles différences de fréquence, cohérente par rapport au fait que les masses volumiques des deux liquides étaient légèrement différentes. La vibration de la tasse ne semble donc pas impactée par la viscosité.

Mais pour autant, nous ne devons pas écarter trop rapidement la viscosité pour expliquer le phénomène observé : il se peut aussi que la viscosité soit à l'origine d'autres phénomènes. Par exemple, la viscosité peut jouer un rôle lors de l'impact de l'eau sur la surface de l'eau. Au cours de cet impact, de l'air entre dans l'eau et va conduire à la formation de la bulle. Pour se rendre compte de l'influence de la viscosité sur la quantité

d'air qui entre dans l'eau au moment de l'impact, on a fait couler de l'huile dans une tasse. On a vu alors que même pour un débit important d'huile versée, très peu de bulles apparaissent dans l'huile, signe que l'air ne rentre pas dans l'huile lorsque l'huile, plus visqueuse que l'eau, est versée dans l'huile. Ceci semble provenir du fait que la viscosité permet au filet d'huile, à débit égal, d'avoir une forme moins chaotique que le filet d'eau.

Un autre paramètre, qui caractérise l'interface air-liquide, joue un rôle important dans la forme et le comportement des interfaces gaz/liquides. Il s'agit de la tension superficielle. Or, dans notre hypothèse que nous avons formulée, à savoir qu'il est possible que le son qui est modifié lorsqu'on verse de l'eau chaude froide ou chaude dans une tasse, peut provenir des bulles formées lors du remplissage de la tasse, nous parlons de bulles, donc justement d'interfaces air/eau. Il faut donc à tout pris savoir si la tension superficielle varie avec la température, et quelles conséquences cela pourraient avoir.

2) Tension superficielle :

La tension superficielle de l'eau traduit l'élasticité de l'interface air/eau. Plus la tension superficielle est élevée, plus la surface se comporte comme une membrane élastique rigide. Si nous reprenons le modèle du système solide ressort, cela revient à dire que la tension superficielle est analogue à la constante de raideur du ressort. Ainsi, l'interface vibre à une fréquence plus ou moins grande selon que la tension superficielle de l'eau est plus ou moins grande. Nous devons alors savoir si la tension superficielle de l'eau dépend de sa température. Cela expliquerait ainsi les différences de sons observés.

Entre 0°C, et 100°C, la tension superficielle de l'interface air eau passe de 0,76 N/m à 0,59 N/m (figure 26). Cette évolution va dans le bon sens pour expliquer le phénomène observé. En effet, plus la température de l'eau est élevée, moins l'interface air/eau est rigide, et plus elle doit vibrer à une plus faible fréquence. On peut donc prévoir que des bulles de tailles identiques vont produire des sons de fréquences plus faibles dans l'eau chaude que dans l'eau froide.

Nous avons alors cherché à vérifier cela : nous avons fait tomber des gouttes identiques dans l'eau froide et dans l'eau chaude, et nous avons tracé l'évolution de la fréquence en fonction du rayon des bulles pour les deux températures.

Nous avons rencontré des problèmes pour faire les mesures avec l'eau chaude. En effet, nous avons remarqué que les bulles disparaissaient beaucoup plus rapidement de la surface de l'eau dans l'eau chaude que dans l'eau froide. Du coup, il nous a fallu mesurer la dimension des bulles non pas à la surface de l'eau, mais sous la surface de l'eau, afin de les mesurer avant qu'elles ne disparaissent à la surface.

Nous avons recherché 2 choses :

- Est-ce qu'effectivement, il y a une (grande) différence de fréquence de vibration entre une bulle formée dans l'eau chaude, et une autre de même dimension formée dans l'eau froide ?
- Est-ce que la taille moyenne des bulles formées dans l'eau chaude est la même que celle formée dans l'eau froide ?

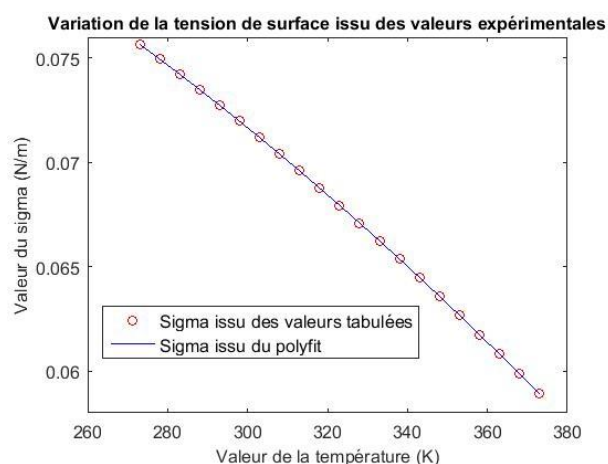
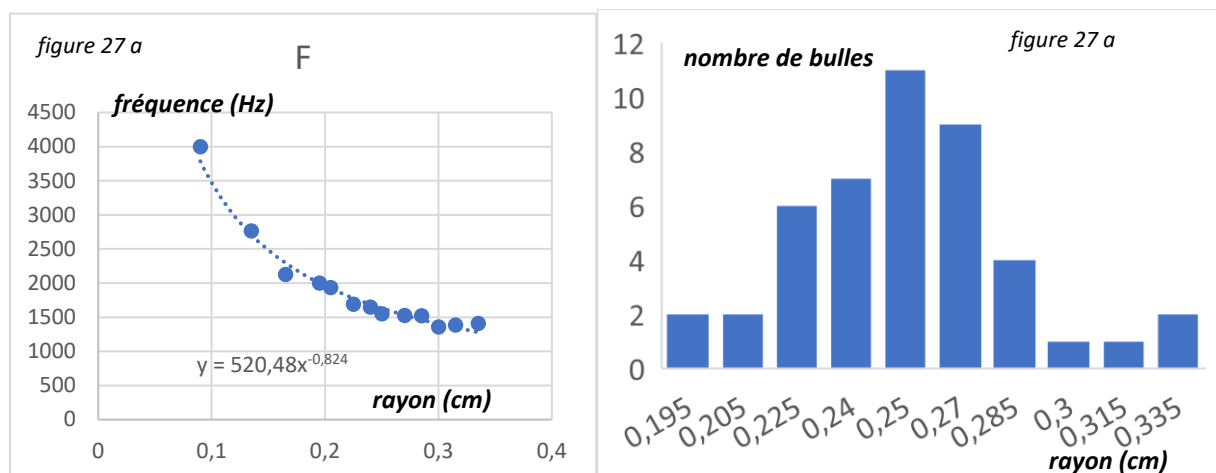


Figure 26 : Variation de la tension superficielle de l'eau en fonction de sa température

Pour le savoir, nous avons fait tomber 100 gouttes dans l'eau froide, puis 100 gouttes dans l'eau chaude. Nous avons alors dressé un histogramme pour les 2 températures, dans lesquels on peut voir le nombre de bulles formées en fonction de leur dimension.

Voici les résultats obtenus figure 27:

Dans l'eau froide :



Dans l'eau chaude :

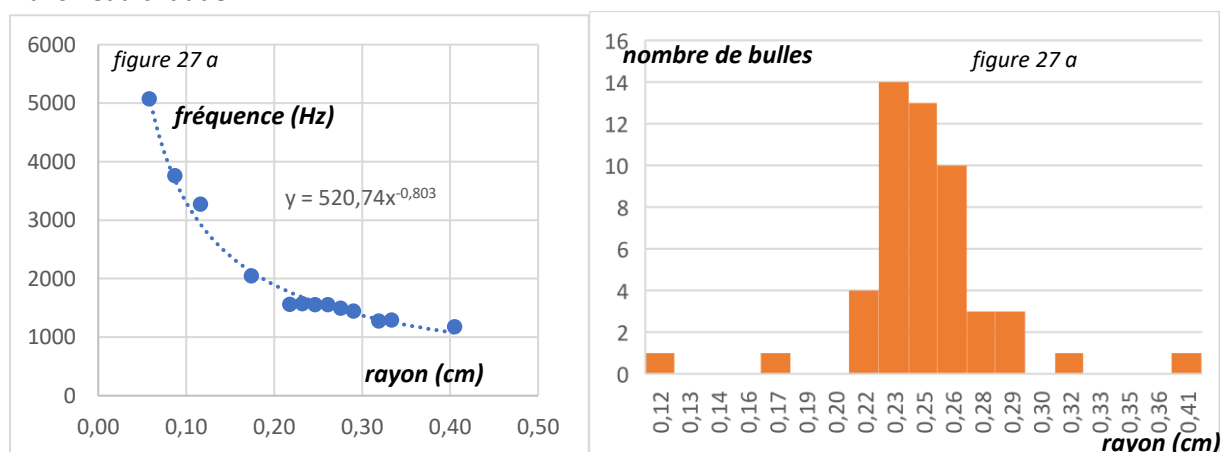


Figure 27 : a : Evolution de la fréquence de vibration des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau froide – b : Distribution des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau froide – c : Evolution de la fréquence de vibration des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau chaude – d : Distribution des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau chaude

Les résultats montrent que deux bulles de même rayon vibrent à la même fréquence dans l'eau chaude et dans l'eau froide.

Par ailleurs, la distribution des rayons des bulles est centrée sur une valeur très légèrement plus faible dans le cas des bulles formées dans l'eau chaude que dans l'eau froide. Mais cette faible différence se fait autour d'un rayon de bulle de 0,24 cm. Or on remarque sur les courbes montrant $F(r)$, que la fréquence varie lentement pour une variation de r autour d'un rayon 0,24 cm. Cette différence de distribution des rayons n'est donc pas suffisamment significative pour expliquer le phénomène étudié. On peut donc dire que la tension superficielle ne semble pas suffisamment avoir varié entre l'eau chaude et l'eau froide pour conduire à un effet audible.

Remarque : nous pouvons suite à cette expérience, confirmer que la viscosité ne modifie pas non plus la fréquence de vibration des bulles.

Que faire ? Essayer de trouver d'autres indices, et poursuivre les analyses des expériences déjà menées... Car nous avons rencontrés, au cours de notre travail, des résultats étonnants.

III – Des résultats étonnants et d’autres champs d’investigation :

1) Durée de vibration d’une bulle

Lorsque nous avons analysé les sons issus des bulles tombées une à une dans l’eau chaude et dans l’eau froide, nous avons constaté que le signal était généralement beaucoup plus régulier, et durait plus longtemps lorsque les gouttes tombent dans l’eau froide que dans l’eau chaude. Et cela va à l’encontre de ce que l’on a dit à propos de la viscosité.

Voici par exemple, figure 28, 2 signaux en question, que nous avons choisis de façon à ce qu’ils soient représentatifs de ce que nous avons observé généralement :

La base de temps, en seconde, se trouve dans le bandeau au-dessus du signal.

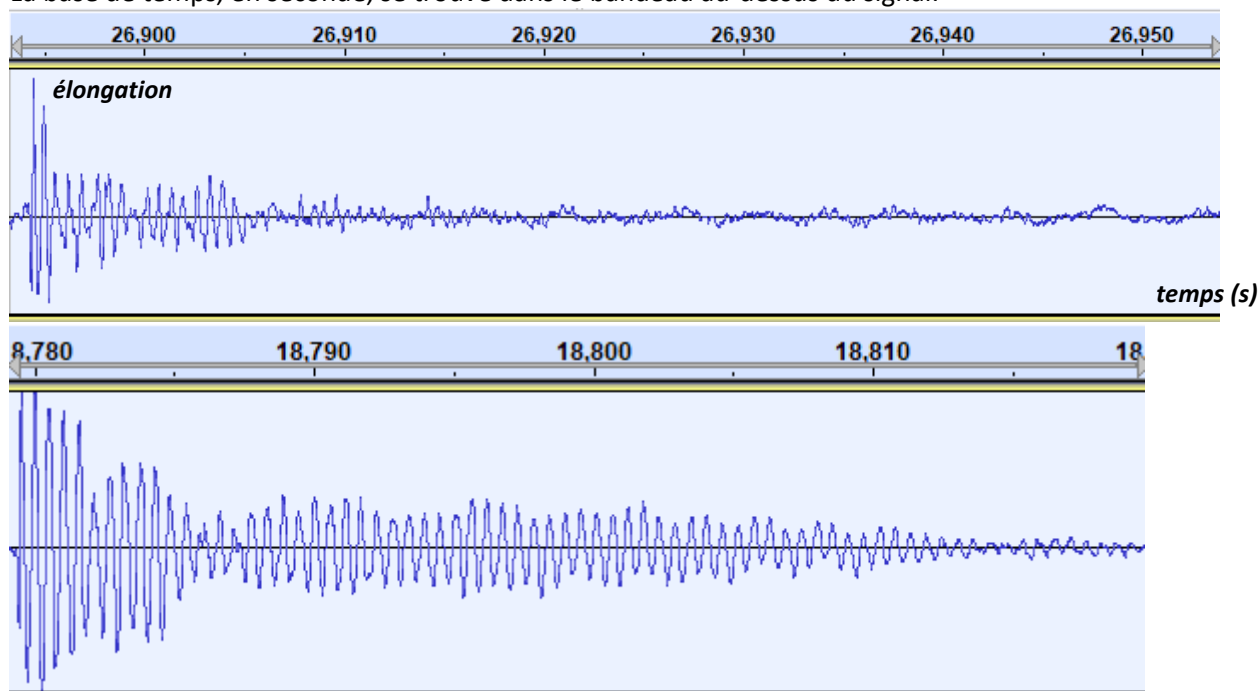


Figure 28 : Amplitude et durée de vibration d’une goutte dans l’eau chaude (en haut) et dans l’eau froide (en bas)

Il est possible que la durée de vibration donne une sensation de son étouffé, mais cela reste à confirmer.

2) Dynamique dans l’eau chaude et dans l’eau froide :

a – Dynamique d’un tas de bulles dans l’eau chaude et dans l’eau froide :

Il y a tout de même encore une direction dans laquelle nous pouvons faire nos recherches et qui concerne toujours les bulles. Nous avons jusqu’à présent fait des mesures sur des bulles créées les unes après les autres. Mais lorsqu’on verse de l’eau en filet et non goutte à goutte, c’est un ensemble de bulles très important qui se forme, et qui parfois se regroupent en une plus grosse. On a vu dans les résultats précédents, que les bulles, même si elles vibrent à la même fréquence lorsqu’elles ont la même taille, vibrent de façon plus désordonnée dans l’eau chaude que dans l’eau froide, et que leur amplitude de vibration ne décroît pas de la même manière. On peut alors penser que d’autres mécanismes dont on n’a pas parlé jusqu’à présent, comme par exemple la nucléation des bulles sous l’eau, peuvent être affectés par la température de l’eau. Et peut-être que le fait alors d’avoir des grosses bulles rendrait engendrerait des sons plus graves. Cette idée, qui fait à nouveau intervenir la notion de tension superficielle, est une piste intéressante, car si on compare bien les spectrogrammes montrés dans la première partie, on peut voir que la fréquence de la composante sonore qui décroît, diminue plus dans le cas de l’eau chaude versée dans la tasse que dans le cas de l’eau froide.

b – Dynamique du filet d'eau

Il y a encore autre chose qui est influencée par la tension superficielle et la viscosité, et donc peut être par la température. Il s'agit du filet d'eau lui-même que l'on verse. On en a pris conscience lorsque nous avons, au cours d'une expérience, versé de l'huile dans une tasse. Le filet d'huile forme un tube bien cylindrique, et ce, quelle que soit sa température. La conséquence est que le filet d'huile ne crée pas de son en remplissant la tasse. Or l'huile est non seulement visqueuse, mais possède une tension superficielle plus faible que l'eau. C'est ce qui permet d'avoir le filet d'huile cylindrique. L'eau, au contraire, présente un filet avec des boursoufflures. Ces boursoufflures doivent permettre de faire entrer plus d'air dans l'eau. Or c'est la tension superficielle de l'eau, qui en voulant transformer le filet en goutte, provoque ces boursoufflures. Il est possible alors que la variation de température de l'eau engendre un filet comportant des boursoufflures plus ou moins grosses, ce qui ferait entrer plus ou moins d'air dans l'eau, conduisant alors à la différence de son observé en remplissant la tasse d'eau chaude ou d'eau froide. Nous devons donc encore étudier ce point-là.

Mais avant cela, nous allons parler de quelque chose qui nous a étonné...

3) Une expérience troublante...

A force de multiplier les expériences, nous en avons réalisé une qui nous a beaucoup intrigué : nous avons versé de l'eau froide, puis de l'eau chaude, dans l'évier en céramique du laboratoire. La différence du son produit est alors spectaculaire. **Le son produit en versant de l'eau chaude est nettement** plus grave que celui obtenu en versant l'eau froide. Notre première réaction fut d'attribuer cette différence très distincte au fait que l'évier ayant de très grandes dimensions par rapport à une tasse, va alors se comporter comme une caisse de résonance amplifiant les basses fréquences. On ne pense donc pas que le phénomène est plus présent dans l'évier que dans une tasse, mais on peut plus facilement distinguer le fait que verser de l'eau chaude sur une surface génère des plus basses fréquences que verser de l'eau froide sur une surface.

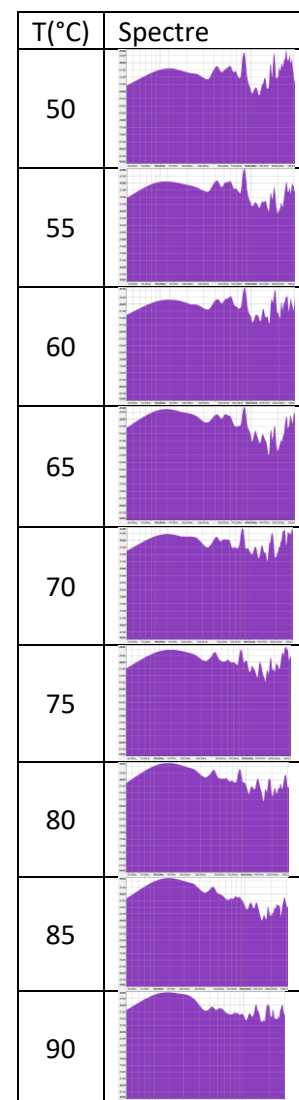
D'ailleurs, pour vérifier cela, nous avons verser de l'eau chaude puis de l'eau froide sur une table recouverte de grands carreaux en céramique, et le son produit était alors identique dans les deux cas, c'est-à-dire un son qui ne contient pas de basses fréquences.

Voici la vidéo de ces expériences qualitatives pour que vous vous rendiez compte de tout cela (il est important d'écouter la bande son avec un appareil qui restitue convenablement les basses fréquences) :

Vous vous dites alors que jusque-là, il n'y a rien d'intrigant, rien d'incohérent... Si ce n'est tout de même qu'on ne forme pas une quantité phénoménale de bulles lors de cette expérience, puisque l'eau s'évacue au fur et à mesure qu'on la verse....

Il faut qu'on étudie de plus près ce qui se passe lors des premiers instants du remplissage. Pour cela, nous avons versé de l'eau en faisant varier la température de l'eau de 50 à 100 °C, dans l'évier non fermé. Nous avons alors enregistré et analysé les sons : figure 29 ci-contre

Nous pouvons voir dans le spectre qu'une fréquence voit son amplitude diminuer par rapport aux autres, pour devenir absente pour une température aux alentours de 80 °C. Autrement dit, le fait de modifier la température de l'eau ne modifie pas une fréquence existante, mais modifie l'amplitude relative des fréquences émises. Et lors de cette expérience, on peut de façon certaine faire le lien entre le son que l'on perçoit et cette variation des amplitudes relatives.



D'autre part, on constate que généralement, les hautes fréquences ont davantage diminué que les basses fréquences. On a donc ici un résultat expérimental qui illustre parfaitement la perception que l'on a du son lorsqu'on verse de l'eau chaude ou de l'eau froide... mais pas dans une tasse, mais dans un évier...

Cette expérience nous amène à nous poser des questions : la première d'entre elles est de savoir si cela constitue le même phénomène que celui que l'on entend lorsqu'on verse de l'eau dans une tasse ? Ou s'agit-il d'un autre phénomène ? Et dans l'évier, qu'est ce qui vibre ? Nous voyons que des bulles se forment sur la surface de l'évier. Ces bulles modifient-elles la façon dont l'évier vibre ? Ou bien, est ce que c'est l'interface air eau qui vibre, mais pas celui des bulles ?

Nous sentons qu'il y a parmi ces questions de quoi nous rapprocher de l'explication du phénomène.

Nous nous sommes amusés à verser de l'huile froide à 20°C et de l'huile chaude à 110°C dans l'évier. A l'oreille, nous n'avons pas constaté de différences de son : le son semble identique à celui entendu lorsqu'on verse de l'eau froide.

Alors il est clair que cela confirme que :

- La température du récipient n'a rien à voir avec le phénomène étudié.
- L'huile coule sans faire de bulles dans l'évier. Donc les bulles restent une explication possible pour le phénomène étudié. Mais comme les bulles ne se forment que dans une fine couche de liquide, est ce que ces bulles jouent bien un rôle ? en quelque sorte, les bulles ont-elles une interaction avec les parois du récipient ? Nous avons par exemple remarqué que lorsque des petites bulles sont accrochées à la surface d'un bécher, le bécher vibre avec un son très court dans le temps, et le signal est plus chaotique que lorsqu'aucune bulle n'est accrochée sur la paroi du récipient. Et la différence est alors énorme. Quelques bulles sont ainsi capables de modifier de façon vraiment significative la façon dont la paroi contenant le liquide peut vibrer.
- Il faut étudier la façon dont un liquide s'écroule sur une autre surface. Il se pourrait que cela engendre une vibration de l'interface air-liquide, et pas forcément uniquement celui des bulles. L'expérience réalisée avec l'huile dans l'évier montrerait par exemple que du fait de la viscosité de l'huile, ce qui se passe au moment de l'impact de l'huile sur l'évier ne permet pas une vibration de l'interface air huile.

Conclusion

Pour conclure, nous commencerons par dire que cette quête est passionnante ! Cela vient entre autres de la complexité de ce qui se passe lorsqu'on remplit une tasse. Le récipient vibre, mais cette vibration dépend du liquide qu'il contient. Mais si le liquide contient des bulles, l'action du les parois du récipient s'en trouve modifiée, changeant alors la fréquence de vibration. Et la quantité de bulles formées lorsqu'on verse le liquide dans la tasse dépend de la viscosité et de la tension superficielle, donc de la température. Ce dernier point est à creuser particulièrement.

Lors de ce projet, nous nous sommes vite rendus compte qu'il fallait procéder avec méthode, sans quoi, les conclusions d'une expérience n'ont que peu de crédibilité. Ainsi, comme nous devons comparer sans cesse les résultats obtenus avec de l'eau chaude et de l'eau froide, nous avons veillé à ne pas modifier les dispositifs expérimentaux lorsque nous changions la température. Nous avons veillé à ce que tout se passe sans changer par exemple le débit de l'eau versée. La démarche d'investigation que nous avons mise en place nous a permis d'avancer dans la compréhension de la physique qui intervient lors du remplissage de la tasse par de l'eau. Nous avons des pistes très sérieuses à explorer pour mieux cerner la ou les différences que l'on perçoit lorsque l'eau est chaude ou froide. Eliminer des hypothèses après avoir raisonné et expérimenté nous permet finalement de progresser. Et il est clair que, vu tout ce que nous avons pu faire depuis mi-septembre pour avancer dans ce projet, nous allons continuer à aller de l'avant pour nous approcher encore plus près de la solution.