



OLYMPIADES
DE PHYSIQUE FRANCE

Chaud...froid...Ecoute les indices



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 colonne d'air**
- B – Vibration de la tasse**
- 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 – Dynamique dans l'eau froide et dans l'eau chaude**
- 2 – Durée de vibration d'une bulle**

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 le temps, vous aussi, 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. Nous avons enregistré le son et nous l'avons déposé ici : <https://youtu.be/LontRFpmTQw>

Le son n'est pas identique lorsqu'on verse de l'eau chaude que lorsqu'on verse de l'eau froide dans la tasse.

En cherchant à mettre un qualificatif pour décrire notre observation, nous nous sommes confrontés à une difficulté : celle de faire correspondre une sensation émotionnelle à un phénomène scientifique. Si on s'en tient à une perception émotionnelle, les mots qui nous viennent pour décrire le son obtenu en versant de l'eau chaude sont : étouffé, sourd, manque de profondeur, sec.... Les mots que nous utiliserions par ailleurs pour décrire le son obtenu en versant de l'eau froide seraient : cristallin, un son plus aigu, plus ample.

Cette façon de décrire la différence observée étant très subjective, nous avons voulu la mettre en évidence et la décrire plus scientifiquement, en enregistrant puis en analysant le son produit. Il pourra être intéressant ensuite de savoir si les mots du domaine émotionnel arrivent à traduire les observations scientifiques.

Nous avons donc recommencé à remplir une tasse d'eau froide, puis d'eau chaude en faisant très attention aux points suivants :

Comme notre but était de comparer le plus précisément possible les sons, 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. Le son a été enregistré via le micro d'un téléphone.

Pour éviter de toucher aux éléments du montage lorsque nous sommes passés de l'eau froide à l'eau chaude, nous avons vidé la tasse en utilisant un siphon. Une fois les sons enregistrés, nous les avons analysés. Nous avons en particulier obtenu les spectrogrammes suivants : figure 2



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

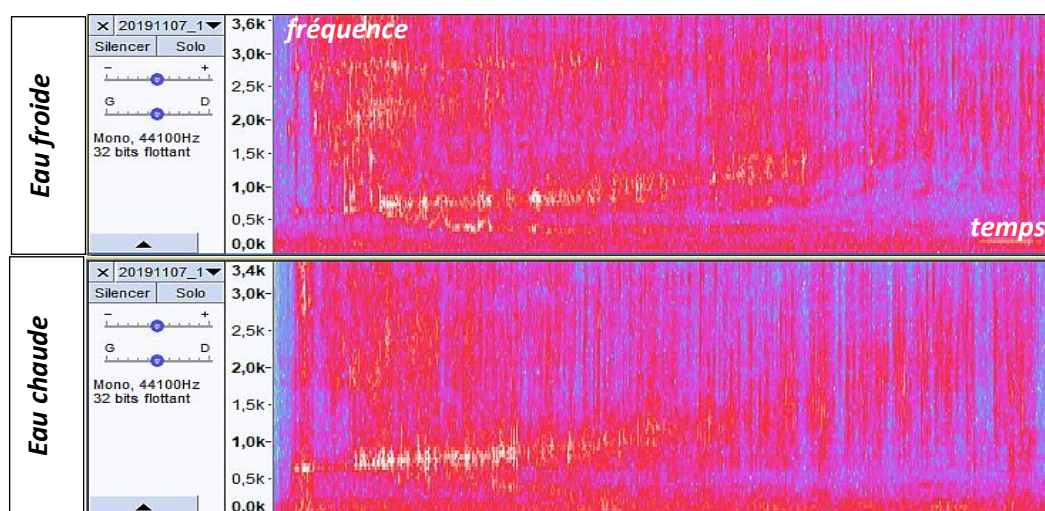


Figure 2 : spectrogramme du son obtenu en versant l'eau froide (au-dessus) et l'eau chaude (en-dessous)

Nous n'avons pas réussi à trouver la légende permettant d'attribuer les couleurs présentes dans le spectrogramme à un niveau sonore en décibel. Voici cela dit la façon dont se lit le spectrogramme : La couleur bleue représente un niveau sonore nul. Le rouge, un niveau sonore non nul. Plus le rouge est intense, plus le niveau sonore est fort. La couleur blanche traduit un niveau sonore maximal.

Ces spectrogrammes présentent des similitudes : On voit nettement dans chacun d'entre eux une composante sonore qui croît d'environ 600 Hz à environ 2000 Hz, ainsi qu'une composante sonore qui décroît d'environ 600 à 100 Hz. Et en réécoutant attentivement les bandes sonores, on peut effectivement entendre ces deux composantes sonores, qui, bien entendu, ne sont des harmoniques, mais deux signaux différents provenant forcément de deux phénomènes physiques différents. Cela dit, et c'est d'ailleurs ce que montre les spectrogrammes, on entend surtout la composante sonore dont la fréquence croît, car elle est produite avec une intensité sonore plus grande, mais aussi car la sensibilité de l'oreille est plus forte pour des fréquences comprises entre 500 et 1500 Hz que pour des fréquences inférieures à 500 Hz (figure 2 – bis)

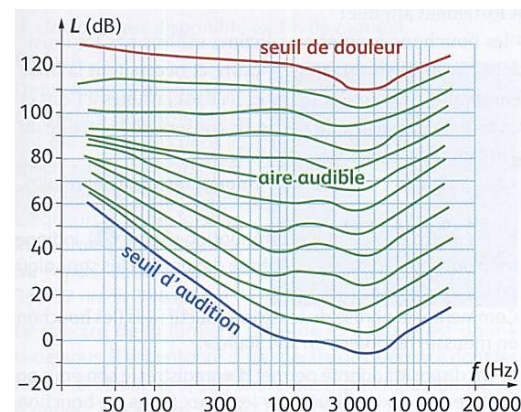


Figure 2 bis : courbes montrant la sensibilité de l'oreille en fonction de la fréquence : chaque courbe représente une sensation de niveau sonore identique. La courbe bleue représente un son perçu à 0 dB par l'oreille, alors que la courbe rouge représente un son perçu à 120 dB

Mais dans ces spectrogrammes, on constate également des différences. En effet, le fait de verser de l'eau froide dans une tasse génère des sons avec des niveaux sonores globalement plus intenses pour des fréquences supérieures à environ 1000 Hz, comparé à ce que l'on observe en versant de l'eau chaude. Ces fréquences plus aiguës dans le cas de l'eau froide sont-elles associées à des composantes sonores qui ne sont pas générées en versant de l'eau chaude ? 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, on distingue nettement une composante sonore qui commence aux alentours de 2800 Hz dans le cas de l'eau froide, et qui semble être complètement absente du spectrogramme obtenu avec l'eau chaude.

Pour compléter cette analyse, nous avons comparé de façon plus précise les spectres des deux bandes son à 3 instants identiques : figure 2-ter

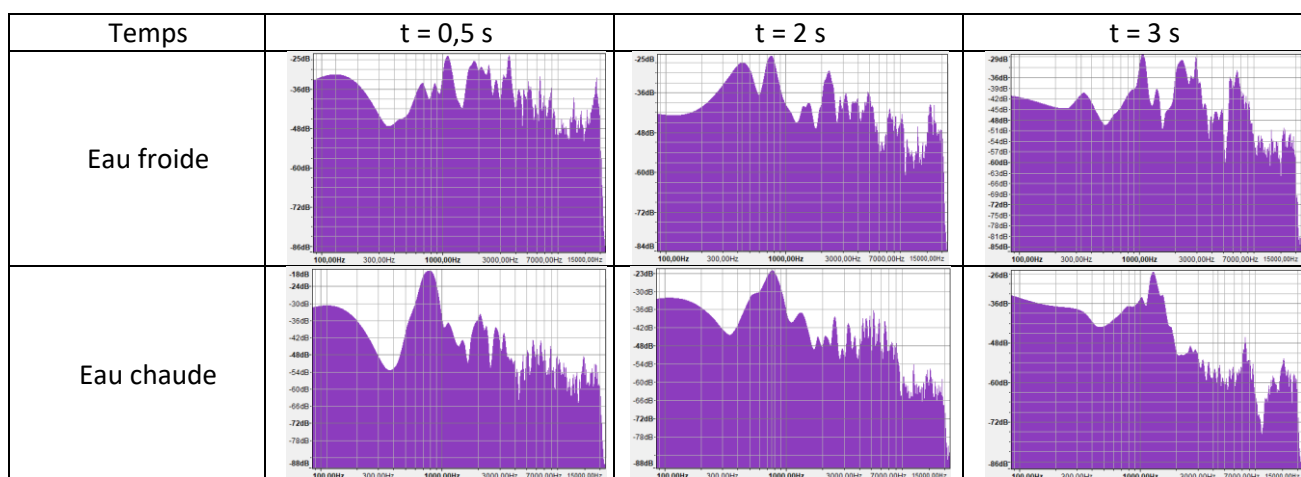


Figure 2 ter : Comparaison des fréquences sonores des bandes son en versant l'eau froide et l'eau chaude, à trois instants lors du remplissage de la tasse : 0,5 s (début du remplissage) – 2 s (moment où on commence à distinguer les 2 principales composantes sonores sur les spectrogramme croissante et décroissante – 3 s (lorsque la tasse est à moitié remplie)

Vu l'ensemble de ces résultats, nous pouvons affirmer de façon objective que les sons générés sont des sons complexes, contenant un grand nombre de composantes sonores qui ne semblent pas avoir de lien entre elles. Et globalement, les composantes sonores sont plus nombreuses lorsqu'on verse de l'eau froide que de l'eau chaude dans une tasse. On remarque en particulier que, à un même instant du remplissage de la tasse, les intensités des

composantes sonores de fréquences élevées émises en versant l'eau chaude, sont plus faibles que celle obtenues en versant l'eau froide.

A nous maintenant de savoir d'où proviennent ces différences.

Comme un son provient d'une vibration, nous avons cherché à savoir si parmi tout ce qui peut vibrer lorsqu'on verse de l'eau dans une tasse, la vibration de l'un des systèmes vibrants est modifiée lorsqu'on verse de l'eau froide plutôt que de l'eau chaude. **Mais pour répondre à cette question, il était donc indispensable, dans un premier temps, d'expliquer l'origine physique des composantes sonores que nous avons identifiées dans les spectrogrammes.**

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

a – Origine physique de la composante sonore dont la fréquence croît :

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 fondamentale :

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

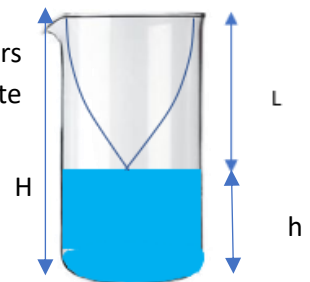


Figure 3 : Mode fondamental de la vibration de la colonne d'air au-dessus du liquide

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 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

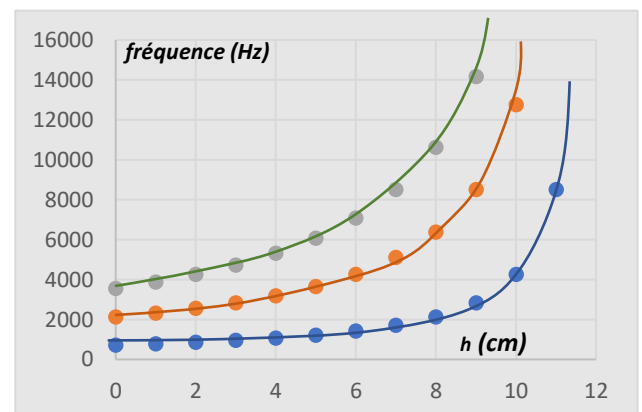


Figure 4 : évolution de des trois premiers modes propres théorique d'une colonne d'air fermée à une extrémité et ouverte à l'autre

Pour comparer les évolutions des fréquences des trois premières harmoniques en fonction de la hauteur d'eau versée dans la tasse, aux évolutions de fréquence de la composante sonore dont la fréquence augmente au cours du remplissage, nous avons dû verser l'eau avec un débit constant.

Cela permettait ainsi de connaître la hauteur d'eau dans la tasse à chaque instant du remplissage, et de pouvoir ainsi superposer les courbes de la figure 4 au spectrogramme. Pour verser l'eau avec un débit constant, nous avons réalisé un vase de Mariotte (figure 5).

En utilisant ce dispositif pour remplir la tasse d'eau froide, puis d'eau chaude, nous avons obtenus les spectrogrammes (figure 6). La tasse étant remplie jusqu'à une hauteur de 11,5 cm d'eau, durant une durée de 11,5 secondes, nous en avons déduit que la tasse se remplit à raison de 1cm d'eau par seconde, d'où la superposition du spectrogramme avec la figure 4 (voir figure 6, dans laquelle on a uniquement superposé la figure 4 avec le spectrogramme obtenu en versant l'eau froide) :



Figure 5 : vase de Mariotte réalisé avec un bidon, sous lequel l'eau peut s'écouler à débit constant

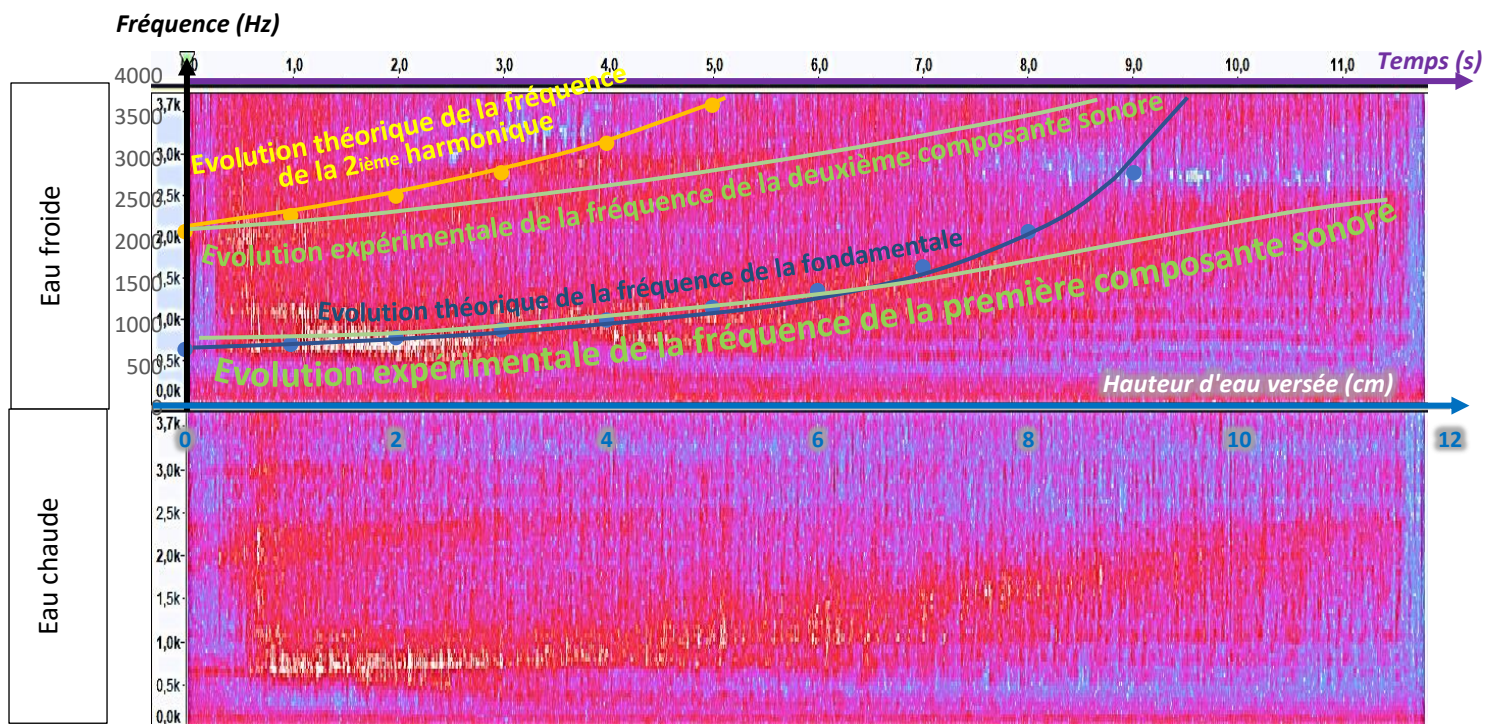


Figure 6 : comparaison du spectrogramme aux modes théoriques de vibration de la colonne d'air

Concernant le mode fondamental théorique de vibration : on remarque que si, dans la première partie du remplissage de la tasse, cette courbe théorique semble cohérente avec celle montrant l'évolution de la première composante sonore, elle s'en écarte sérieusement à partir d'un remplissage d'environ 7 cm de hauteur. La deuxième harmonique théorique quant à elle ne semble se superposer que jusqu'à 1 cm de hauteur d'eau dans la tasse avec la deuxième composante sonore. Peut-on alors réellement attribuer les composantes sonores modélisées par les courbes vert clair du spectrogramme, à la vibration de la colonne d'air présente dans la tasse ?

Pour le savoir, nous avons mesuré, après ajout d'eau centimètre par centimètre d'eau dans la tasse, la fréquence de résonance de cette colonne d'air expérimentalement au lieu de la calculer théoriquement. Pour cela, (figure 7) 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 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.

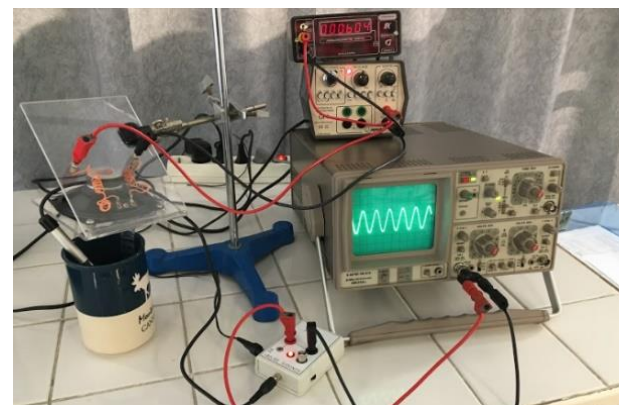


Figure 7 : dispositif expérimental permettant de mesurer les modes propres de vibration de la colonne d'air de la tasse

Cette expérience nous permet donc de mesurer expérimentalement la fréquence de résonance de la colonne d'air. L'expérience révèle alors plusieurs modes de vibration de l'air, pour différentes hauteurs. Voici les résultats obtenus : figure 8

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

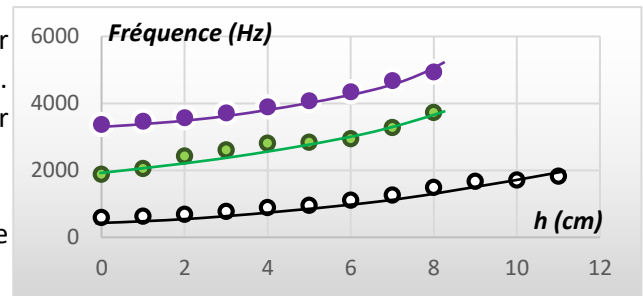


Figure 8 : 3 premiers modes propres de vibration de la colonne d'air contenu dans la tasse en fonction de la hauteur d'eau.

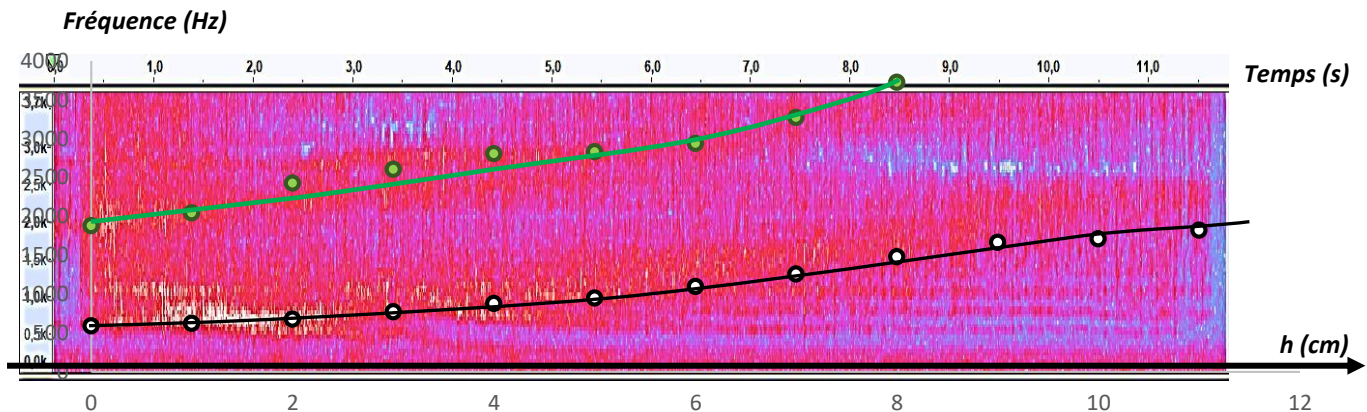


Figure 9 : Comparaison des modes propres de vibration de la colonne d'air avec les composantes sonores révélées par le spectrogramme

La figure 9 montre que les deux premiers modes de vibration expérimentaux de la colonne d'air se superposent relativement bien aux 2 composantes sonores dont les fréquences croissent au cours du remplissage. Cela confirme que les composantes sonores dont les fréquences augmentent lors du remplissage de la tasse sont bien issues de la vibration de la colonne d'air.

b – Origine physique de la composante sonore dont la fréquence décroît :

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.

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)

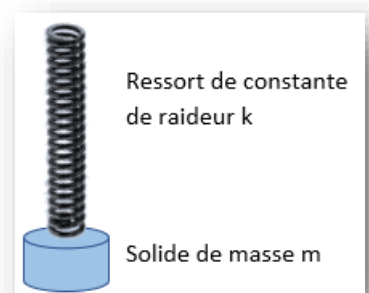


Figure 10

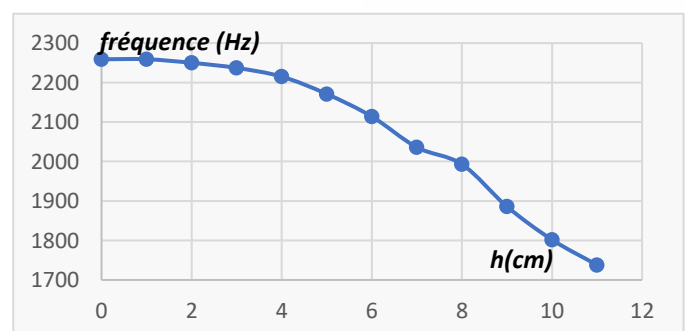


Figure 11 : Evolution de la fréquence de vibration de la tasse en fonction de la hauteur d'eau qu'elle contient

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'entend alors pas de son. On peut dire en quelque sorte qu'il n'existe pas de bruit d'impact lorsque de l'eau tombe dans l'eau.



Figure 12a – filet d'eau ne formant pas de bulles –

Figure 12b – Filet d'eau moins cylindrique, formant des bulles dans l'eau

Les bulles sont donc peut-être à l'origine d'un 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, l'évolution de la fréquence de la composante sonore dont la fréquence décroît au cours du remplissage semble suivre l'évolution du nombre de bulles dans la tasse : voir figure 13 ci-dessous.

- Au début du remplissage, le volume d'eau dans la tasse augmente, ce qui permet aux bulles d'être présente en quantité croissante. La fréquence décroît alors fortement.
- Comme les bulles se forment selon une certaine profondeur d'eau dans la tasse, une fois que la hauteur d'eau versée dans la tasse dépasse cette valeur, la quantité de bulles se stabilise et la fréquence diminue alors beaucoup moins rapidement, mais continue de décroître tout de même, probablement dû au fait que le volume d'eau dans la tasse augmente. Le phénomène décrit au paragraphe précédent 1 – 2) b) devient alors responsable de la diminution lente de la fréquence.
- Et pour finir, si au cours du remplissage, on diminue fortement le débit de l'eau, on remarque alors que la fréquence du son augmente alors brusquement, ce qui prouve qu'indépendamment de la hauteur d'eau dans la tasse, les bulles jouent un rôle dans la fréquence du son émis.



Augmentation de la quantité de bulles

Stabilisation de la quantité de bulles formées

Diminution brutale de la quantité de bulles en diminuant le débit de l'eau versée

Figure 13 : Evolution du nombre de bulles dans l'eau au cours du remplissage de la tasse

L'évolution de la fréquence observée dans le spectrogramme est en adéquation avec la quantité de bulles présentes dans l'eau. Mais comment les bulles peuvent-elles induire ou influencer un son ? Et bien nous avons pu identifier 2 phénomènes complètement différents, générés par les bulles :

a – Premier phénomène : les bulles vibrent et émettent des sons :

Nous avons 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 14 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 une première remarque :

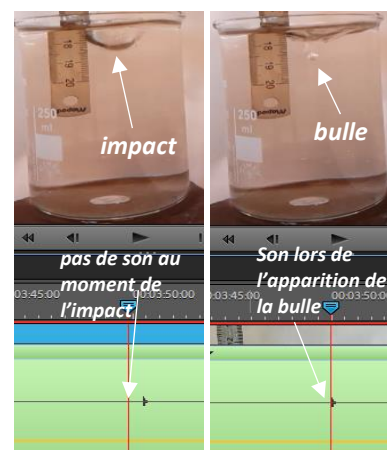


Figure 14 – Enregistrement du son produit par une bulle créée par l'impact d'une goutte dans l'eau

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 (ordre de grandeur moyen des bulles observées) devrait produire des sons de fréquence

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

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

b – Deuxième phénomène lié aux bulles : les bulles modifient la fréquence de vibration de la tasse.

Ce deuxième phénomène est venu à nous après la réflexion suivante : Vu que les bulles génèrent des sons généralement compris entre 1000 et 2000 Hz, une bulle à elle seule ne peut être responsable des sons d'environ 200 Hz dont on cherche à comprendre la cause. 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, mais pas tout à fait comme nous le pensions : en fait, nous avons pu voir qu'en 2017, 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, si on tape alors dans le fond de la tasse avec une cuillère, on entend 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, moins rigide. Et en reprenant alors l'analogie entre le système « tasse + liquide » et le système « solide ressort », on pouvait alors comprendre que le liquide moins rigide 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 sommes allés jusqu'au bout de notre étude, en mesurant les fréquences des sons obtenus en tapant sur la tasse durant son remplissage, toutes les secondes. Nous avons superposé sur le graphique l'évolution (figure 15) de la fréquence lors du remplissage et le spectrogramme de la figure 9 : La courbe obtenue est complètement cohérente avec la composante sonore dont la fréquence décroît sur les spectrogrammes.

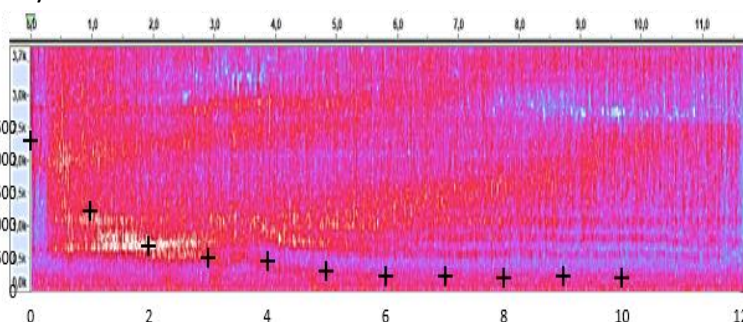


Figure 15 – Comparaison entre la fréquence de vibration de la tasse produite en tapant dessus toute les secondes durant son remplissage à débit constant, et la composante sonore dont la fréquence décroît dans le spectrogramme

Et au passage, le début de cette composante doit finalement partir d'une fréquence plus grande que 680 Hz comme on le pensait initialement.

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, vibration créée 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 : Les différences entre les sons produits en versant de l'eau chaude par rapport à l'eau froide peut venir :

- Soit qu'un système (ou plusieurs) vibre à des fréquences différentes lorsqu'on verse de l'eau froide ou de l'eau chaude dans la tasse,
- Soit que les fréquences de vibration ne sont pas modifiées, mais les amplitudes des différentes composantes sonores sont modifiées lorsqu'on verse de l'eau chaude ou de l'eau froide,
- 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 tous les systèmes vibrants que nous avons recensés lors de la première partie :

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

A – Vibration de la colonne d'air

La colonne d'air est capable de vibrer selon ses modes propres de vibration, dont 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 au fait de 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 puisque la célérité des ondes sonores dans l'air est alors 342 m/s à 20°C, et 387 m/s à 100°C.

Une augmentation de la température de l'air conduit alors à une augmentation de la fréquence de vibration, mais cela n'explique pas le phénomène étudié dans ce projet, puisque celui-ci semble résulter d'une plus grande richesse de composantes sonores de fréquences aiguës lorsqu'on verse de l'eau froide dans la tasse.

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 de microgouttelette d'eau.

Pour cela, (figure 16) nous avons pris un tube 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 5s. 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 tube 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.

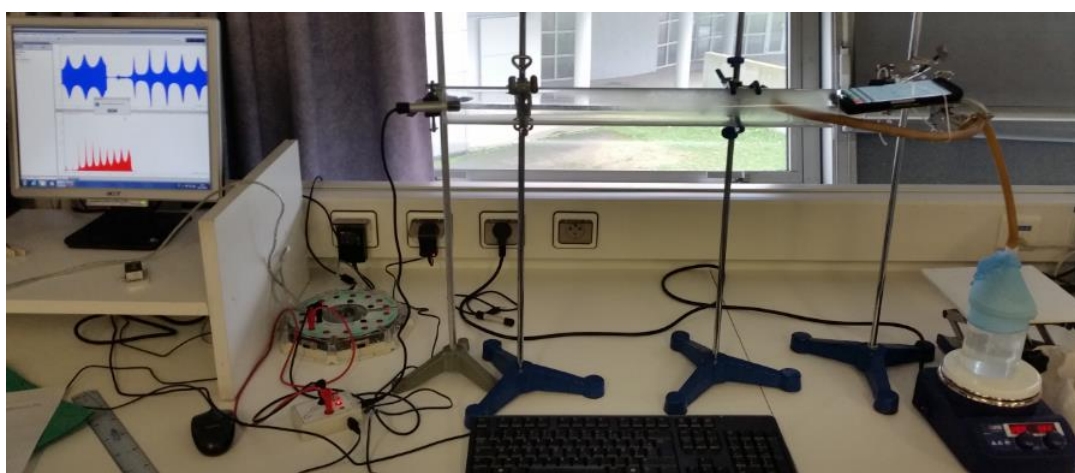


Figure 16 : dispositif permettant la mesure des modes propres de vibration de la colonne d'air sans, et avec une saturation en vapeur d'eau

Voici alors les résultats obtenus : figure 17

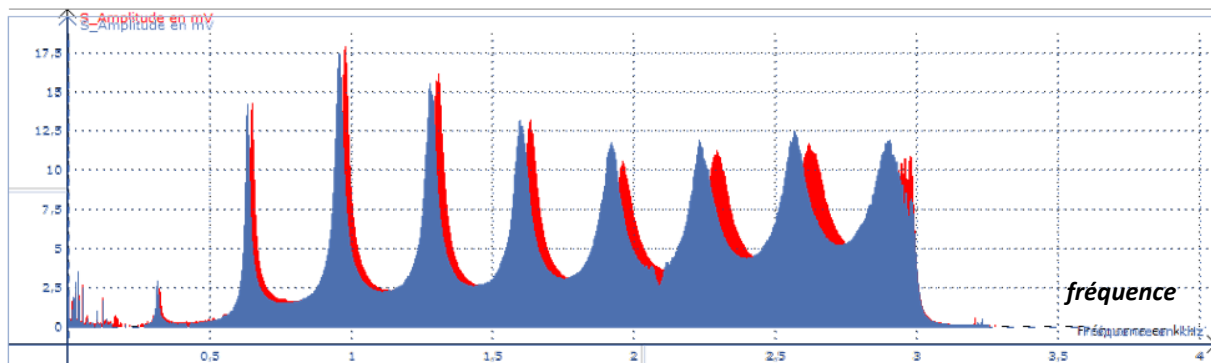


Figure 17 : comparaison des modes propres de vibration de la colonne d'air sec et d'air saturé en vapeur d'eau.

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.

B – 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 18

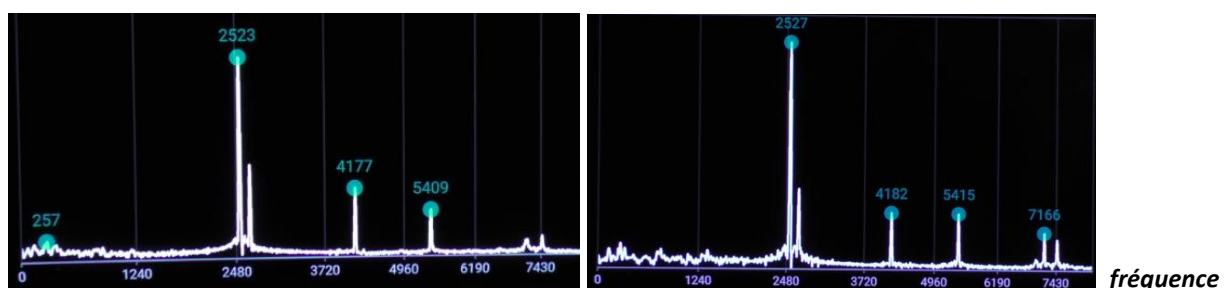


Figure 18 – A gauche : spectre sonore obtenu avec la tasse froide – A droite : spectre obtenu avec la tasse chaude

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 tasse vibre différemment une fois remplie d'eau chaude ou d'eau froide ?

a – Etude expérimentale

Pour le savoir, nous avons rempli la tasse d'eau froide, nous avons tapé dessus et nous avons fait de même après l'avoir remplie d'eau chaude. La réponse est alors clairement oui : alors que le son semble sortir d'un instrument du type carillon lorsqu'on tape une tasse remplie d'eau froide, il est beaucoup moins harmonieux dans le cas d'une tasse remplie d'eau chaude.

Il suffit pour s'en convaincre, de l'entendre sur la vidéo suivante :

Nous avons dans un premier temps essayé de traduire physiquement la façon dont nous percevons ces sons. Nous avons alors recommencé cette expérience, en enregistrant et en analysant les sons produits. Voici alors les signaux que nous avons obtenus : Figure 19

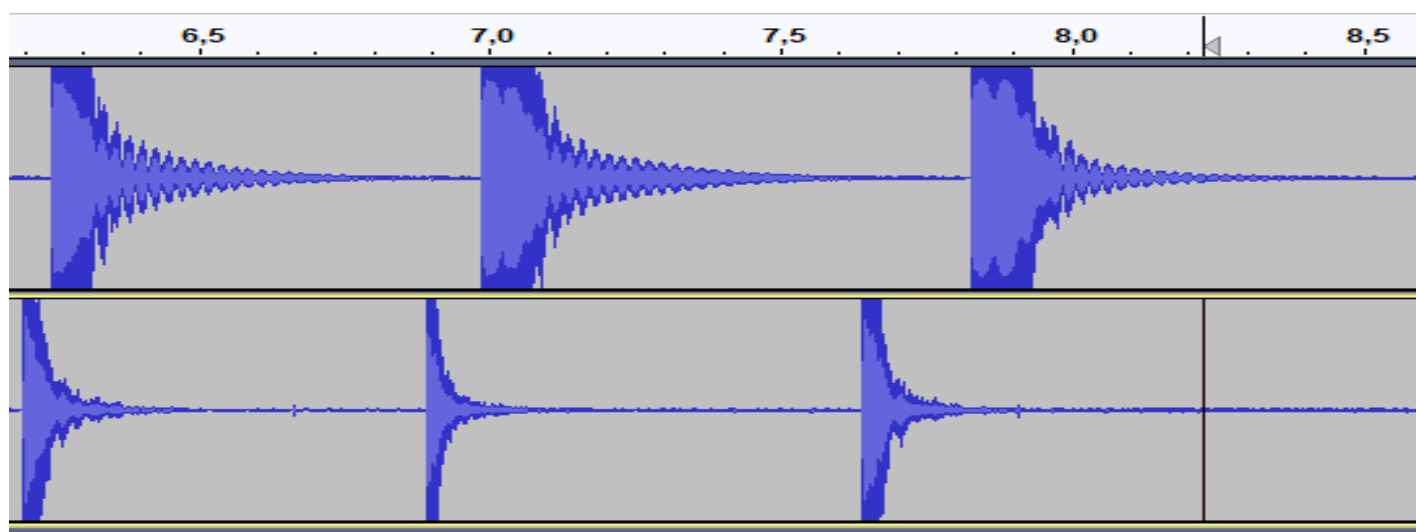


Figure 19 : image du dessus : 3 signaux issus de 3 coups donnés sur la tasse remplie d'eau froide – image du dessous : 3 signaux issus de 3 coups donnés sur la tasse remplie d'eau chaude

Le premier constat que nous pouvons faire concerne alors la durée du signal sonore produit : il perdure beaucoup plus longtemps dans le cas de la tasse remplie d'eau froide que dans le cas de la tasse remplie d'eau chaude.

Nous pouvons aussi remarquer la présence de battements dans le cas de la tasse remplie d'eau froide.

Enfin, nous avons voulu savoir si des différences récurrentes pouvaient être observées entre ces signaux en faisant des analyses spectrales.

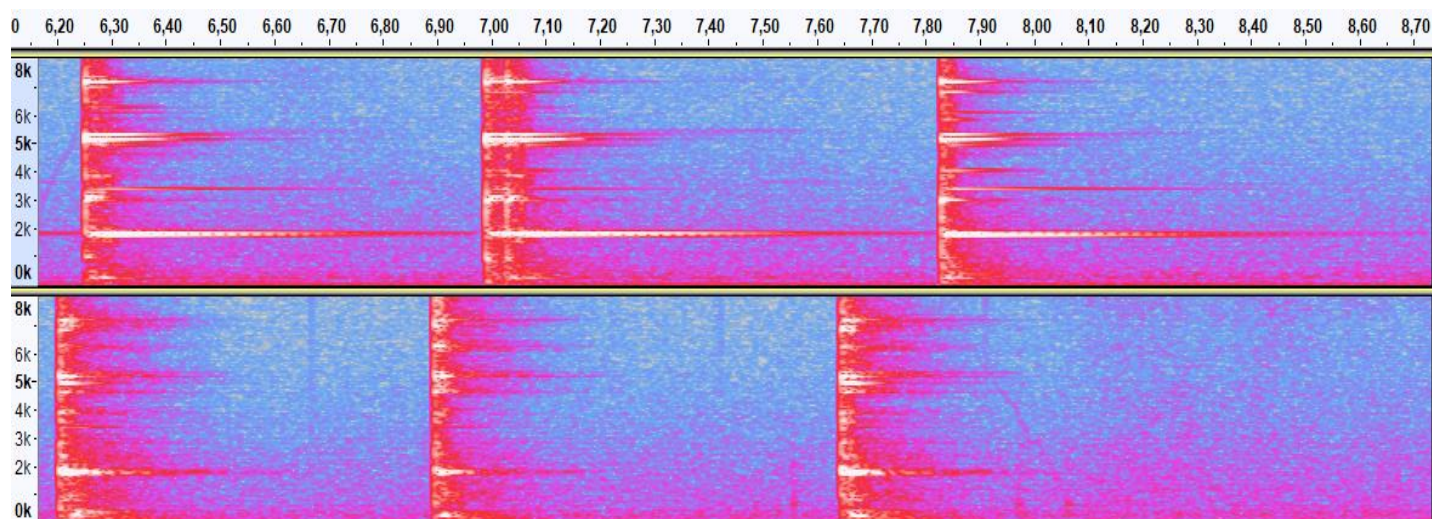
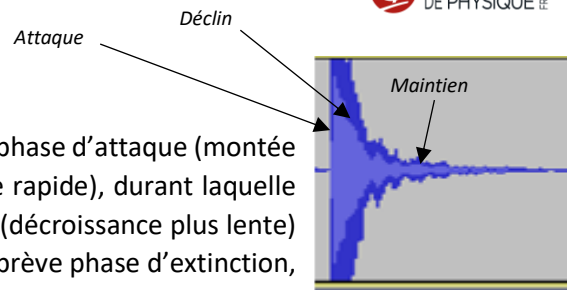


Figure 20 : image du dessus : spectrogramme obtenu des 3 signaux issus de 3 coups donnés sur la tasse remplie d'eau froide – image du dessous : spectrogramme obtenu des 3 signaux issus de 3 coups donnés sur la tasse remplie d'eau chaude



Si on décompose les signaux sonores obtenus dans la figure 21 en une phase d'attaque (montée très brève de l'amplitude), suivie d'une phase de déclin (décroissance rapide), durant laquelle l'amplitude du signal décroît rapidement, puis une phase de maintien (décroissance plus lente) (longue dans le cas de la tasse remplie d'eau froide), et pour finir, une brève phase d'extinction, alors on peut faire la remarque suivante :

Figure 21 : Schéma général de l'évolution de l'amplitude du son à l'issue d'un coup donné sur la tasse

Durant la phase d'attaque et de déclin, il ne semble pas y avoir de différences notoires entre les signaux produits en tapant la tasse d'eau chaude ou d'eau froide. Par contre, durant la phase de maintien, alors que dans le cas de la tasse remplie d'eau chaude, de nombreuses fréquences sont encore présentes dans le signal sonore sans que l'une d'entre elles soit plus importante en amplitude, le signal sonore produit en tapant la tasse remplie d'eau froide ne contient que 3 ou 4 fréquences qui se dégagent clairement d'un bruit de fond. On peut davantage le voir sur la figure suivante (figure 22) dans laquelle on a fait des analyses spectrales à trois instants différents pour les deux sons obtenus avec l'eau froide et avec l'eau chaude.

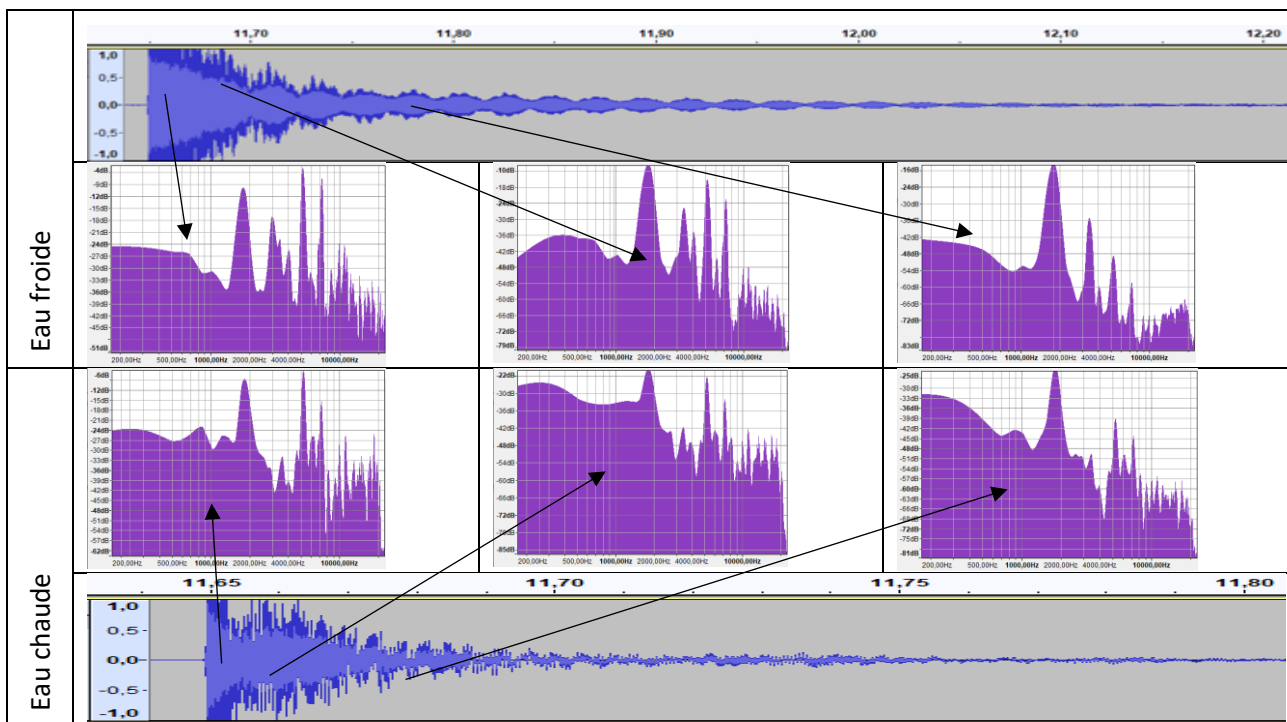


Figure 22 : Analyse spectrale du son issu d'un coup donné sur la tasse remplie d'eau froide (en haut) et d'eau chaude (en bas) à trois moments différents des sons obtenus

Etant donné que, lorsqu'on remplit la tasse, cela la fait vibrer, il est alors possible que les différences que nous venons de souligner soient une des raisons qui font que le son produit en remplissant une tasse d'eau chaude par rapport à celui obtenu lorsqu'on la remplit d'eau froide.

Mais comment physiquement expliquer la différence de vibration de la tasse en fonction de la température de l'eau qu'elle contient, lorsqu'on lui tape dessus ?

Et bien nous avons pensé à deux choses : la densité, et la viscosité. Il s'agit là en effet de deux grandeurs physiques qui varient en fonction de la température de l'eau.

b – La densité ou la viscosité peuvent-elles expliquer les différences observées ?

- Commençons par la densité :

L'eau chaude à 100°C a une densité de 0,96, soit environ 3,8 % moins grande que la densité à 20°C (figure 23). On pourrait alors dire qu'une même masse d'eau chaude occuperait un volume 3,8 % plus grand que l'eau froide, ou de même, que pour un même

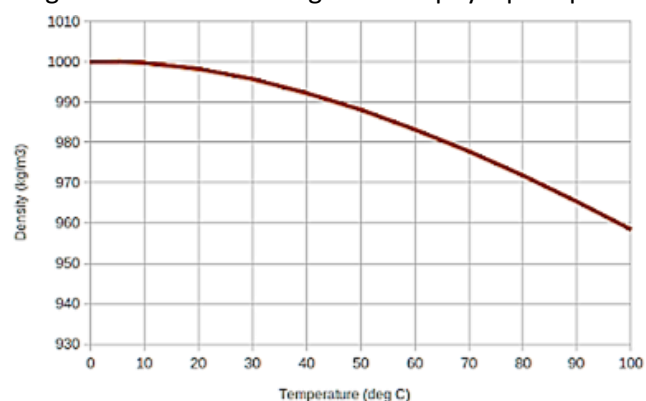


Figure 23 – Densité de l'eau en fonction de la température

volume d'eau versé dans la tasse, la masse de l'eau chaude est plus faible de 3,8% de celle de l'eau froide.

L'influence de la densité devrait donc être de générer des sons de fréquences plus élevées avec l'eau chaude puisque pour un même volume d'eau versée, la masse d'eau chaude sera inférieure à celle de l'eau froide.

Mais cette très faible différence de densité ne peut conduire qu'à une très faible différence de fréquence de vibration. Et surtout, il est peu probable que cette variation de densité soit en mesure d'être responsable de la grande différence de durée de vibration observée.

- Qu'en est-il de la viscosité ? Est-ce que la viscosité peut modifier la fréquence de vibration de la tasse :

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 ?

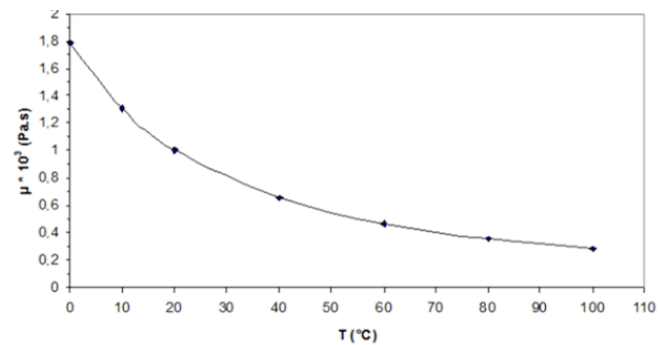


Figure 24 : Evolution de la viscosité de l'eau en fonction de la température

Quelques recherches (figure 24) 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 3 !

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

Pour savoir cela, nous avons suspendu une masse à l'extrémité d'un ressort disposé verticalement (figure 25). Nous avons disposé une éprouvette de sorte que la masse se situe dans l'eau. Nous avons alors écarté la masse de sa position d'équilibre et nous l'avons laissée osciller librement dans l'eau froide, puis dans l'eau chaude. Nous avons filmé l'expérience pour pouvoir mesurer précisément et comparer les fréquences d'oscillation de la masse dans l'eau chaude et dans l'eau froide grâce au logiciel Latispro.

Les résultats sont alors visibles sur la figure 25.

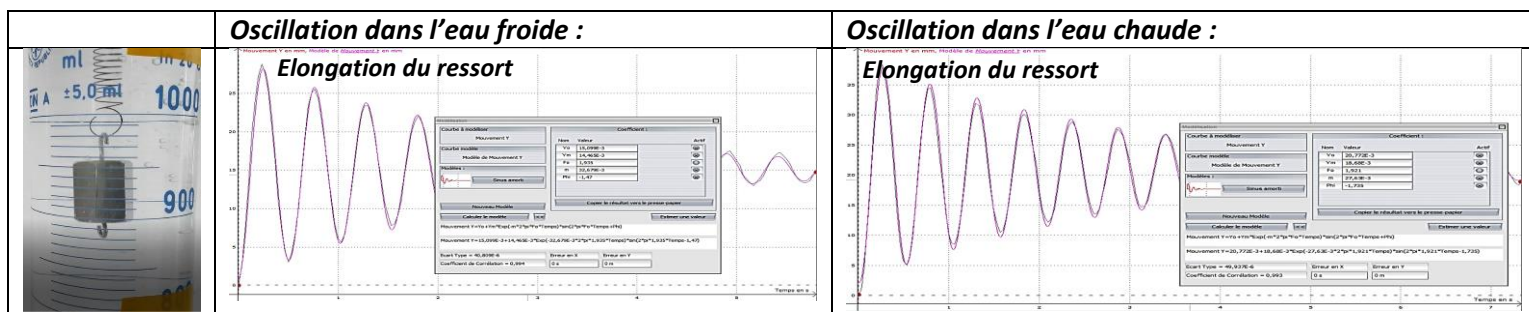


Figure 25 : Oscillation d'une masse suspendue à un ressort, dans l'eau chaude et dans l'eau froide

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 :

Commençons par parler de la fréquence des oscillations en milieu visqueux : L'expérience semble a priori confirmer que les valeurs de viscosité de l'eau chaude ou de l'eau froide n'influencent pas la fréquence des oscillations, comme nous le montrait la figure Cela dit, cette remarque que nous faisons ici sur l'influence de la viscosité sur la fréquence d'oscillation est issue d'une étude réalisée avec des vibrations mécaniques de fréquences d'environ 2Hz, alors que les sons que l'on entend en versant de l'eau dans une tasse sont issus de vibrations à des fréquences de l'ordre de plusieurs centaines de Hertz. Il faudrait que nous trouvions un moyen de vérifier si notre conclusion reste valable alors pour des fréquences de vibration plus grandes.

Parlons maintenant de l'amplitude des oscillations : L'expérience montre que plus le milieu est visqueux, et plus l'amplitude des oscillations va s'atténuer rapidement en fonction du temps, ce qui est tout à fait normal. Ce qui paraît très étrange alors est de voir que dans le cas de la vibration de la tasse remplie d'eau chaude, le son produit en faisant vibrer la tasse s'atténue beaucoup plus vite que celui produit en tapant la tasse remplie d'eau froide. On s'attendait à ce que ce soit l'inverse, car l'eau chaude étant plus visqueuse que l'eau froide, les vibrations de la tasse devraient s'atténuer plus vite dans l'eau froide.

Mais c'est tout le contraire que l'on observe ! Dans le cas de la tasse remplie d'eau froide, donc plus visqueuse, il persiste un son presque harmonique 0,5 s après le coup donné sur la tasse.

Se peut-il que la viscosité de l'eau plus forte dans l'eau froide, engendre une contrainte sur la tasse, qui favoriserait un mode de vibration, et que ce mode aurait la particularité de vibrer plus longuement parce qu'il se couplerait avec un autre mode de vibration voisin ? On ne sait pas, mais les battements que l'on observe et dont on parle ci-dessous font penser à cela.... Quoi qu'il en soit, on cherche encore une explication à cela.

On observe également que, durant la phase de maintien du son, il y a de forts battements dans le cas de la vibration de la tasse dans l'eau froide, mais pas avec l'eau chaude. Etant donné que cette observation est quasiment systématique, elle traduit un comportement différent de la vibration de la tasse lorsqu'elle est remplie d'eau chaude ou d'eau froide. Nous avons voulu exploiter ce battement. En particulier, nous avons recherché les valeurs des fréquences qui en étaient responsables en zoomant sur les battements (figure 26).

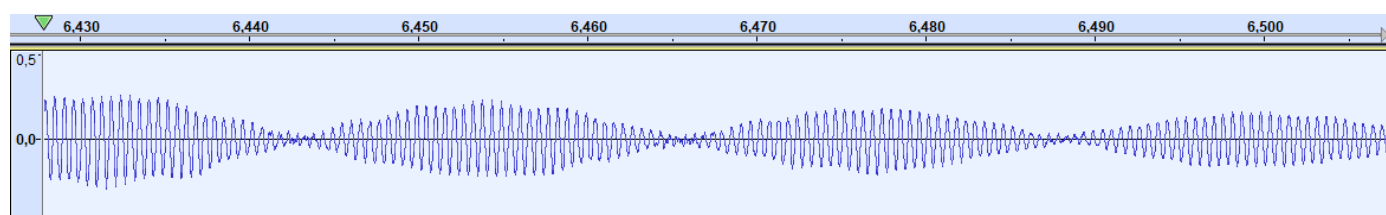


Figure 26 : zoom sur les battements issus du signal sonore obtenu en tapant la tasse remplie d'eau froide

Nous avons trouvé qu'il s'agit de 2 fréquences de valeurs 1764 Hz et 1808 Hz. Il s'agit de 2 modes de vibrations qui sont quasiment confondus dans les spectres. Nous ne savons pas encore comment relier cette constatation au fait que la tasse est remplie d'eau froide ou d'eau chaude, mais nous espérons avoir la réponse pour vous la présenter.

Quoi qu'il en soit, nous avons là une première différence mesurable qui peut expliquer la différence perçue lorsqu'on verse de l'eau froide ou chaude dans une tasse. Mais nous devons poursuivre nos investigations, car cela peut être un élément de réponse, mais il peut aussi y avoir d'autres phénomènes qui se passent. Nous n'avons en particulier pas encore parlé de la différence de vibration possible de l'interface air/eau en fonction de la température de l'eau...

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

C'est très possible. Nous avons vu dans la première partie de ce mémoire que le son que l'on entend lorsqu'on verse de l'eau dans une tasse provient en grande partie des bulles qui en se formant sous la surface de l'eau, vibrent et émettent ainsi un son à la fréquence de leur vibration. C'est donc bien l'interface eau/air de la bulle qui vibre.

Nous avons alors voulu savoir si cette surface pouvait vibrer de façon différente en fonction de la température. Autrement dit, existe-t-il une caractéristique de l'eau qui, en fonction de la température, engendrerait des modifications en ce qui concerne la fréquence de vibration de l'interface air/eau ?

En nous documentant sur cela, nous avons vu qu'effectivement, l'interface air/eau a une certaine élasticité, qui peut se déduire de la tension superficielle de l'eau. 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.

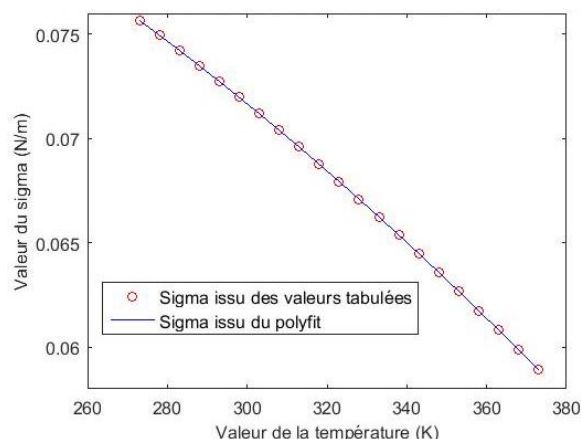


Figure 27 : Variation de la tension superficielle de l'eau en fonction de sa température

Entre 0°C, et 100°C, la tension superficielle de l'interface air eau passe de 0,076 N/m à 0,059 N/m (figure 27). 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 ?
- 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 28:

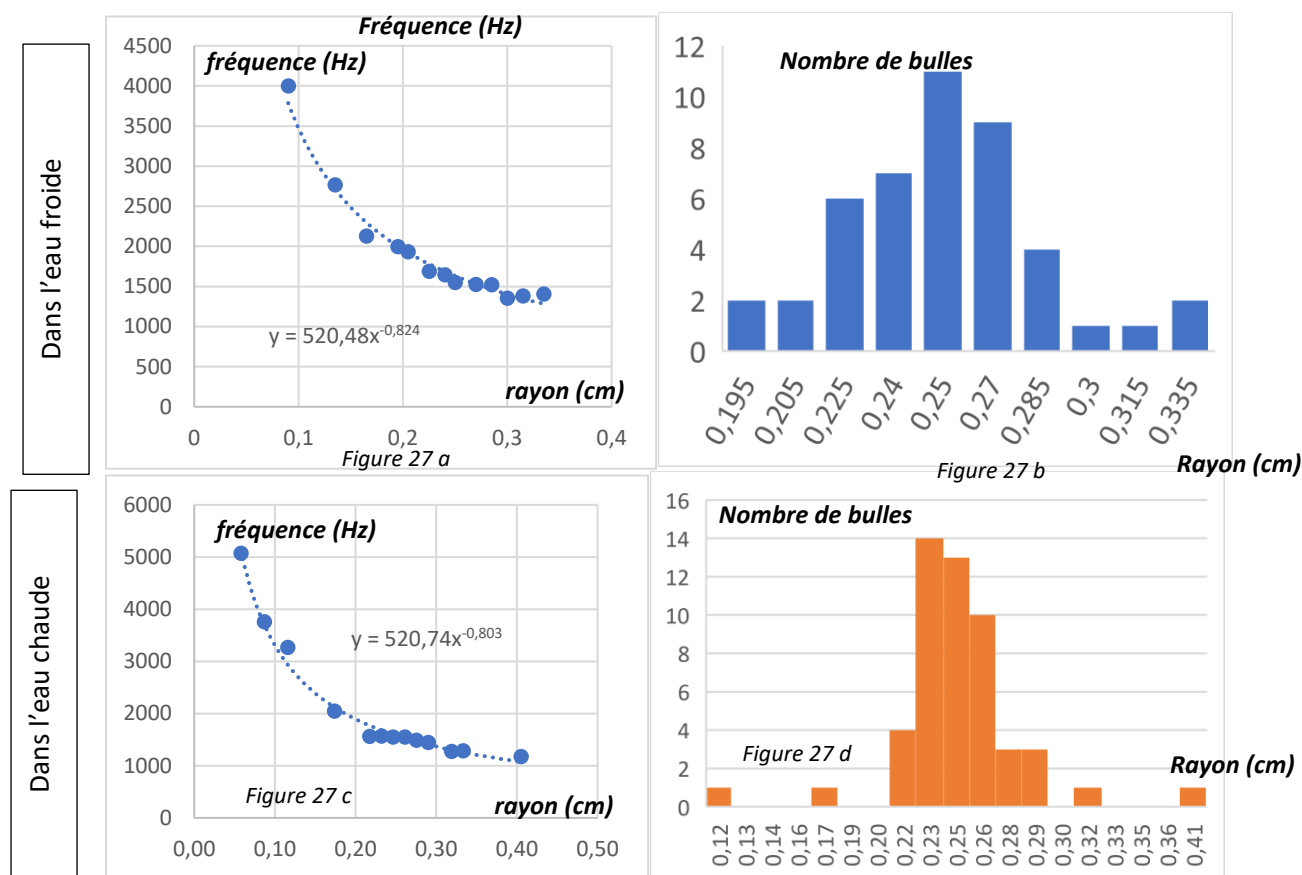


Figure 28 : a : Evolution de la fréquence de vibration des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau froide – b : Distribution des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau froide – c : Evolution de la fréquence de vibration des bulles en fonction de leurs rayons dans l'eau chaude – d : Distribution 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.

Et en effet, après des recherches sur internet, nous avons vu que Smith F. D., en 1935, a fait des recherches concernant la vibration d'une bulle dans un liquide, et a alors, grâce à des considérations énergétiques, montré que cette vibration suivait la relation :

$$F = \frac{1}{2\pi R} \sqrt{\frac{3\gamma \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R}\right)}{\rho}}$$

Où R représente le rayon de la bulle, γ le rapport des capacités calorifiques de l'air (1,4), P_0 la pression dans l'eau ($\sim 10^5$ Pa), σ la tension superficielle de l'eau (de 0,076 N/m à 0,059 N/m entre 20°C et 100°C), ρ la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³). La relation montre que la tension superficielle aura un effet d'autant plus fort que le rayon de la bulle est petit. Mais avec de telles valeurs, pour une bulle de 1mm de rayon, on trouve que la fréquence d'oscillation théorique d'une bulle de 1mm de rayon dans l'eau froide à 20°C est 3264 Hz, et qu'elle vaut 3263 Hz dans l'eau à 100°C. Soit 1 Hz seulement de différence. Cette différence devient égale à 19 Hz pour des bulles de rayon 0,15 mm, c'est-à-dire pour des bulles vibrant à la limite du spectre audible. Les bulles qui se forment dans la tasse sont bien plus grosses, et cela confirme alors que la tension superficielle n'a pas d'influence perceptible au niveau de la vibration des bulles formées lorsqu'on remplit la tasse. Nous finissons ici par une remarque : en mesurant la fréquence de vibration des bulles, nous nous sommes rendu compte que l'oscillation des bulles dans l'eau froide était généralement plus longue et plus régulière que dans l'eau chaude, comme on peut le voir par exemple sur les sons enregistrés suivants (figure 29) : La base de temps, en seconde, se trouve dans le bandeau au-dessus du signal.

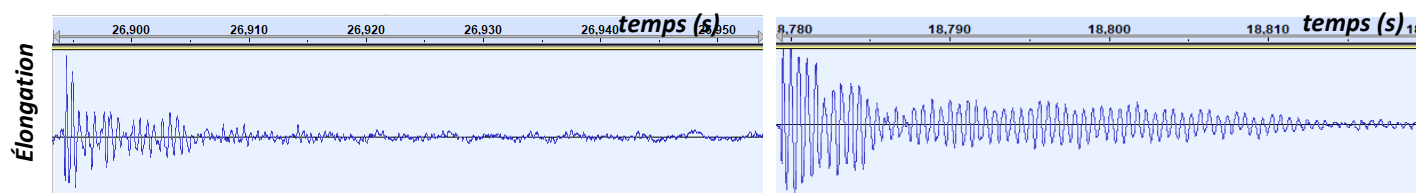


Figure 29 : Amplitude et durée de vibration d'une goutte dans l'eau chaude (à gauche) et dans l'eau froide (à droite)

Là encore, on pouvait s'attendre à ce que ce soit le contraire, étant donné que la viscosité plus forte dans l'eau froide devrait engendrer une diminution de l'amplitude de vibration plus rapide que dans l'eau chaude. Nous pensons alors que le fait que la tension superficielle soit plus faible dans l'eau chaude rend l'interface air/eau moins rigide et de ce fait, la bulle est plus facilement déformable. L'agitation du milieu lorsque la goutte tombe peut alors engendrer une déformation de la bulle formée de façon aléatoire, ce qui ne permet pas à la bulle de vibrer régulièrement au cours du temps. Il s'agit là d'une hypothèse que nous aurons toutefois du mal à valider expérimentalement.

Mais dans tous les cas, ce constat, là encore, représente bien une différence que l'on observe entre le fait de verser de l'eau froide ou de l'eau chaude dans une tasse, et en ce sens, cela peut constituer un élément de réponse pour expliquer le phénomène étudié.

III – D'autres champs d'investigation et une expérience troublante :

1) Dynamique dans l'eau chaude et dans l'eau froide :

a – Coalescence d'un tas de bulles dans l'eau chaude et dans l'eau froide :

Il y a 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 peut alors penser que d'autres mécanismes dont on n'a pas parlé jusqu'à présent, comme par exemple la coalescence des bulles sous l'eau, peuvent être affectés par la température de l'eau.

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. C'est la viscosité de l'huile qui permet d'avoir ce filet cylindrique. L'eau, au contraire, présente un filet avec des boursofflures, du fait de la gravité qui attire l'eau vers le bas, et probablement des forces de tension superficielles qui tendent à transformer les interfaces planes en interfaces sphériques. On pense que ces boursofflures doivent permettre de faire entrer plus d'air dans l'eau au moment de l'impact du filet d'eau dans l'eau. Il est possible alors que la variation de température de l'eau engendre un filet comportant des boursofflures 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.

2) 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.

Voici la vidéo de ces expériences qualitatives pour que vous vous rendiez compte de tout cela : https://youtu.be/Ej5tG4_Q08k (il est important d'écouter la bande son avec un appareil qui restitue convenablement les basses fréquences) : 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 dans l'évier 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 versé 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, du fait qu'aucune caisse de résonance n'amplifie cette fois-ci les basses fréquences.

La variation de fréquence est tellement grande, que nous avons pu faire une étude du son en fonction de la température de l'eau versée dans l'évier. 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 bouché. Nous avons alors enregistré et analysé les sons : figure 30 .

Nous pouvons alors voir dans le spectre qu'une fréquence d'environ 850 Hz voit son amplitude diminuer par rapport aux autres, pour devenir carrément absente pour une température aux alentours de 80 °C. Autrement dit, deux façons de voir les choses : on peut dire que le fait de verser de l'eau froide plutôt que de l'eau chaude permet au système vibrant de vibrer selon un mode de vibration à 850 Hz, ou bien on peut dire que le fait de verser de l'eau chaude empêche le système vibrant de vibrer à 850 Hz. En tout cas, une chose est certaine : on distingue clairement une modification du son pour la température d'environ 80°C ! Mais il se peut que la fréquence à 850 Hz ne soit pas la seule responsable de cette modification, car on constate aussi que généralement, les hautes fréquences ont davantage diminué que les basses fréquences. Cela est très intéressant car en filtrant ainsi les hautes fréquences lorsqu'on verse de l'eau chaude dans l'évier, on peut légitimement justifier le fait que le son perçu paraisse plus grave qu'en versant de l'eau froide.

Et dans cette expérience, comme l'eau est évacuée au fur et à mesure qu'on la verse, une fine couche d'eau de maximum 0,5 cm recouvre le fond de l'évier. Et cela semble suffisant pour que le système obtenu vibre à des fréquences différentes pour des températures d'eau différentes.

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.

Ces expériences dans l'évier nous amènent à nous poser des questions, et apportent aussi des confirmations :

- Vu le constat fait avec l'huile, on peut confirmer que la température du récipient n'a rien à voir avec le phénomène étudié.
- La première question est de nous demander si finalement, il n'y aurait pas quelque chose de particulier qui se forme à l'interface eau/évier et par conséquent, à l'interface eau/tasse lorsque l'on remplit une tasse ? Cela est bien possible ! Par exemple, nous avons constaté que si on laisse un bécier contenant de l'eau pendant plusieurs minutes, il se forme quelques microbulles sur la surface du verre qui modifie de façon très significative la vibration du verre lorsqu'on lui tape dessus. Ce phénomène de formation des microbulles sur la surface du verre pourrait être beaucoup plus rapide avec de l'eau chaude.
- La deuxième question est aussi de savoir si le phénomène qui se passe au début du remplissage de la tasse est le même phénomène qui se passe au cours de son remplissage ?
- 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.

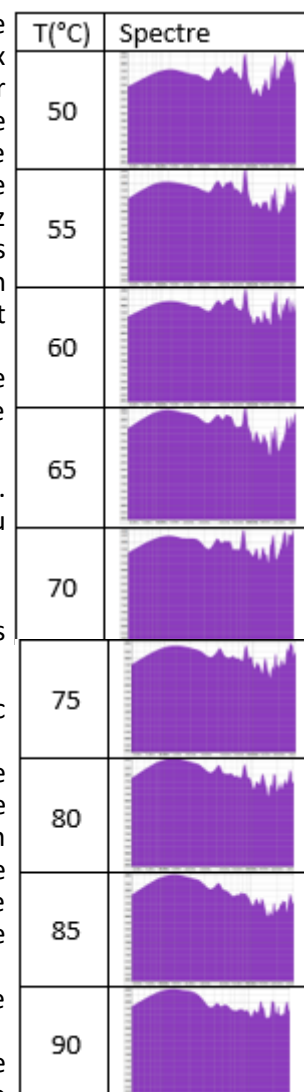


Figure 30 : évolution du spectre obtenu en versant de l'eau de température comprise entre 50 et 100°C dans un évier

Mais ce qui nous a surtout troublé dans cette expérience, ce n'est pas tout cela, qui finalement semble plutôt bienvenu. Si vous écoutez bien la bande son de l'eau froide et chaude versée dans l'évier, vous pouvez entendre d'une part un fond continu dont la fréquence est plus grave dans le cas de l'eau chaude versée dans l'évier par rapport à l'eau froide, mais d'autre part, vous pouvez aussi entendre des cliquetis très discontinus. Ces cliquetis semblent venir de bulles qui se forment, même si la quantité d'eau dans l'évier est très faible. Ce qui est surprenant, c'est que ces cliquetis sont aussi à des fréquences plus graves lorsque l'eau versée est chaude. Donc soit ces cliquetis, en réalité, ne proviennent pas de la vibration de bulles, soit il y a encore un processus qui se passe dont on n'a pas encore parlé. Ou peut-être que le fait de travailler dans une fine couche d'eau modifie aussi les processus que nous avons déjà expliqués.

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. Il a alors fallu savoir si la viscosité, la présence de bulles, la tension superficielle modifiaient cette vibration...

Lors de ce projet, nous nous sommes vite rendus compte qu'il fallait procéder avec méthode au niveau des protocoles expérimentaux, sans quoi, les conclusions d'une expérience n'auraient eu que peu de crédibilité. Il fallait en particulier veiller à ce que les conditions expérimentales soient identiques lorsqu'on passait du remplissage par de l'eau froide, au remplissage par de l'eau chaude. 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 pu éliminer des hypothèses, en confirmer d'autres, et c'est cet ensemble qui nous rapproche de la solution. Nous avons donc déjà obtenu des réponses crédibles, et nous avons encore des pistes très sérieuses à explorer pour mieux cerner la ou les différences que l'on perçoit lorsque l'eau versée est chaude ou froide.