



# Les Mystères de la Tasse



## Projet présenté par :

- Emma ROBIN
- Solène DUMAS-GROLLIER
- Géralda HAJRULLA

## Avec le soutien de nos partenaires :





# Résumé

Une tasse de lait peut avoir des comportements étranges quand on lui tape dessus, surtout si après l'avoir fait chauffer, on y ajoute du chocolat en poudre. La fréquence du son produit augmente alors à chaque coup donné !

Nous nous sommes alors attaqués physiquement à ce breuvage, et pas seulement au petit déjeuner, pour chercher à expliquer la fréquence des sons émis par la tasse lorsqu'on tape dessus de façon pacifique. Pour mener à bien cette démarche, il a fallu formuler des hypothèses, imaginer des expériences pour les valider ou pas, renchérir sur de nouvelles hypothèses, et ainsi de suite.

Et ce qui nous apparaissait au début comme une question relativement simple s'est avéré beaucoup plus complexe que nous l'imaginions, et de ce fait, beaucoup plus passionnant aussi.

Le projet « Les mystères de la tasse » tente ainsi d'expliquer en détail l'origine des sons que peut émettre une tasse, et surtout, les paramètres dont dépend la fréquence de ces sons.

# Sommaire

## Introduction

I – De quoi dépend le son émis en tapant sur une tasse contenant un liquide ?

II – Un phénomène plus curieux :

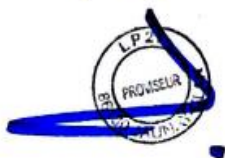
III - Retour sur la façon dont vibre une tasse

IV – Conclusion

**Vidéo de 5 minutes illustrant le projet visible en suivant le lien :**

<http://www.dailymotion.com/video/x5dvg69>

le 06/03/2017





# Introduction

Une tasse sait se faire entendre. Mais elle ne le fait pas de façon spontanée. Il faut lui donner un coup de main... ou plutôt un petit coup de cuillère, et elle répond en produisant un son. Ce son n'est pas un simple bruit, puisqu'on peut facilement lui associer une note. Il s'avère d'autre part que ce son produit dépend de certains paramètres. On peut s'en rendre compte dans la vie de tous les jours en tapant sur un verre ou une tasse contenant de l'eau ou du lait par exemple. Le son que l'on entend n'est pas le même en fonction de la hauteur de liquide dans le récipient. **Mais ce qui nous a interpellés davantage, c'est ce qui se passe lorsqu'on rajoute du chocolat en poudre dans le lait chaud. Le son qu'est alors capable d'émettre la tasse lorsqu'on lui tape dessus montre une évolution dont nous avons voulu comprendre l'origine.** Ce mémoire présente alors nos observations, nos hypothèses, les expériences que nous avons menées pour tenter d'y répondre, nos conclusions, bref, toute notre démarche que nous avons suivie lors de ce travail.

## I – De quels paramètres dépend la fréquence du son émis en tapant sur une tasse contenant un liquide ?

Notre premier réflexe fut d'explorer l'influence de la hauteur sur la fréquence de ce son. Mais avant de se lancer dans une série d'expériences, nous avons voulu choisir le matériel et les logiciels que nous aurons à utiliser.

### 1) Choix du système d'acquisition :

Pour déterminer la fréquence du son, nous avons pu utiliser trois logiciels différents : Latis Pro, Audacity, et une application « FFT Spectrum Analyser » avec un smartphone (figure 1). L'application FFT Spectrum Analyser a l'avantage d'afficher le spectre du signal instantanément.

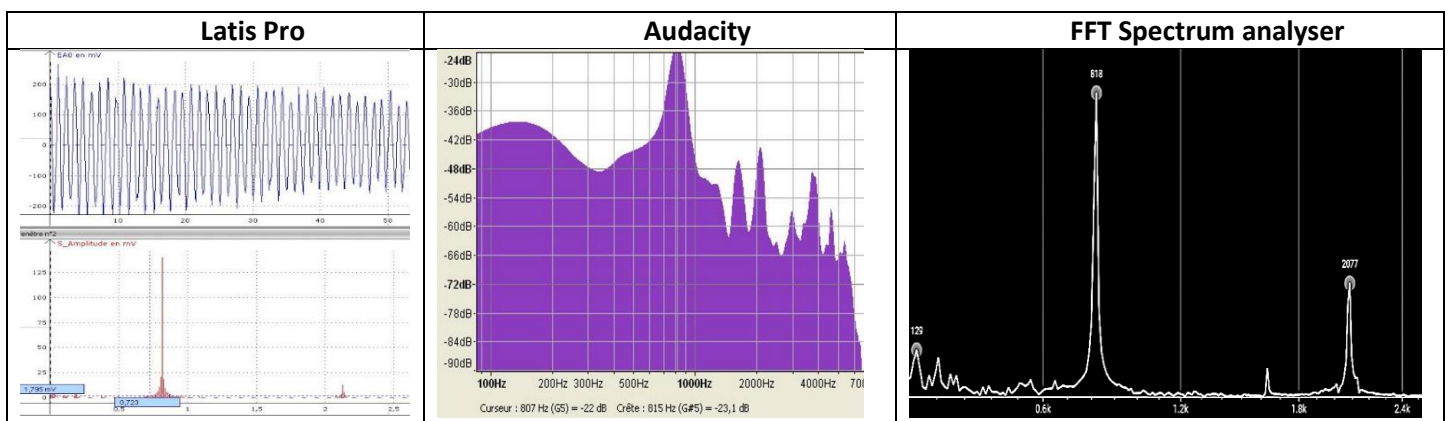


Figure 1 – Comparaison entre les différents logiciels d'acquisition et d'analyse spectrale

Des expériences préliminaires ont montré que la façon de taper sur la tasse ne modifie pas sensiblement le son. Le choix du logiciel et des conditions expérimentales étant fait, nous pouvons entrer dans le vif du sujet : quel lien existe-t-il entre la hauteur d'eau dans la tasse et la fréquence du son produit ?



## 2 ) Influence de la hauteur du liquide :

Pour cette étude, nous avons utilisé dans un premier temps un béccher de 400 mL, que nous avons rempli d'eau, millilitre par millilitre. Après chaque versement, nous avons tapé sur le béccher avec un agitateur en verre.

L'analyse spectrale du son obtenu fait ressortir plusieurs pics de fréquence, ce qui signifie qu'a priori, la tasse possède plusieurs modes de vibration. Nous avons alors tracé l'évolution des fréquences de ces modes de vibration en fonction de la hauteur d'eau dans le béccher, et voici les résultats obtenus (figure 2) : les composantes des 3ième (courbe verte) et 4ième modes (courbe violette) du signal devaient avoir des amplitudes trop faibles pour des hauteurs de liquide faibles, car nous n'avons pas réussi à les voir ou les distinguer du reste du signal.

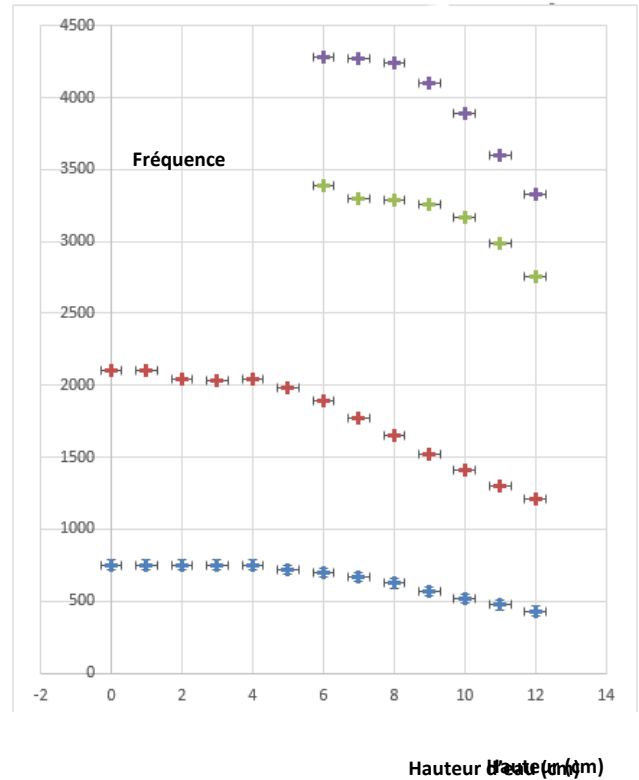


Figure 2 : Evolution des modes propres de vibration de la tasse d'eau en fonction de la hauteur d'eau

Vu l'allure des courbes, nous pouvons distinguer deux zones différentes : pour les faibles hauteurs d'eau, les fréquences restent constantes. Le système vibre donc comme si la tasse ne contenait pas d'eau. Les vibrations ne sont donc que des vibrations de la tasse, et l'eau n'a aucune importance. A partir d'une certaine fréquence, on remarque que les fréquences évoluent de façon linéaire par rapport à la hauteur d'eau (figure 3), ce qui montre que le système qui vibre tient compte de l'eau.

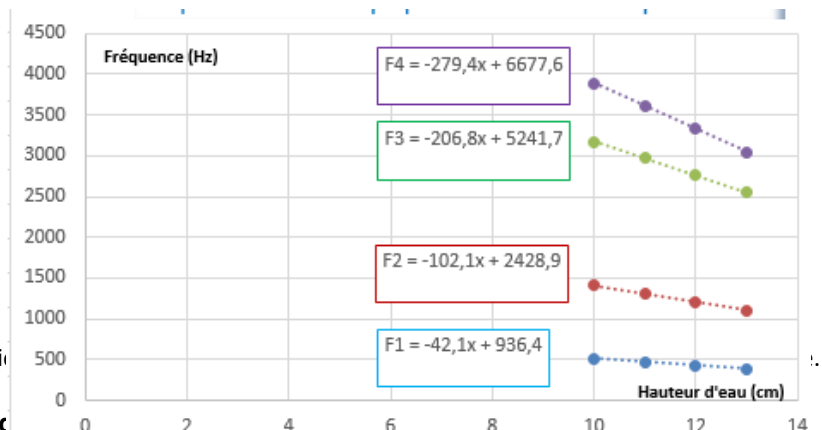


Figure 3 : Evolution des modes propres de vibration de la tasse d'eau en fonction de la hauteur d'eau

**C'est cette deuxième partie de la courbe qui nous intéresse. C'est cette deuxième partie de la courbe où le système vibre, nous avons cherché à le comparer à d'autres systèmes vibrants.**

Peut-on alors comparer la tasse d'eau avec une corde de guitare ?

La question est légitime : comme une corde de guitare, le son produit lorsqu'on tape la tasse n'est pas un bruit, mais bien un son auquel on peut associer une note, donc une fréquence. Et le fait qu'il y ait plusieurs modes de vibration laisse à penser que ce son résulte donc d'ondes stationnaires, que ce soit avec la tasse ou la corde de guitare. D'autre part, comme dans le cas de la guitare, pour laquelle la fréquence du son est d'autant plus grave que la corde a une

grande longueur (L), comme le rappelle la relation  $f_1 = \frac{v}{2L}$  (avec  $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  où v est la célérité des ondes, T est

la force de tension appliquée à la corde, et  $\mu$  est la masse linéique de la corde, plus la hauteur d'eau est grande, plus la fréquence du son est faible.



Mais dans le cas de la corde de guitare, la relation entre  $f_1$  et  $L$  n'est pas linéaire, alors que la relation entre  $f_1$  et  $h$  l'est à partir d'une certaine hauteur d'eau dans la tasse.

D'autre part, la longueur de la corde et la hauteur d'eau dans la tasse ne peuvent pas jouer le même rôle dans l'évolution de la fréquence du son. En effet, on sait que dans le cas d'une corde fixée à ses 2 extrémités, la longueur d'onde du mode fondamental est  $\lambda = 2L$ . Si on dit que la hauteur d'eau  $h$  est similaire à  $L$ , on aurait alors une longueur d'onde  $\lambda = 2h$  dans le cas de la tasse d'eau. Pour une hauteur d'eau  $h = 10$  cm dans la tasse, on en déduit alors la fréquence de l'onde correspondante, sachant que l'onde acoustique se propage avec une célérité de 1500 m/s dans l'eau :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2h} = \frac{1500}{2 \times 0,1} = 7500 \text{ Hz}, \text{ ce qui n'est pas du tout l'ordre de grandeur des fréquences que l'on mesure}$$

lorsque l'on tape sur la tasse.

Par contre, une autre similitude est remarquable : la corde de guitare possède plusieurs modes propres de vibration, et il en est de même dans le cas de la tasse d'eau. Jusqu'où cette analogie va-t-elle ?

Les fréquences des modes propres de vibration d'une corde de guitare suivent la relation  $f_n = \frac{nv}{2L}$  où  $n$  est le

numéro du mode propre,  $v$  la célérité des ondes. Si on note  $f_1 = \frac{v}{2L}$  le mode fondamental, alors le  $n^{\text{ième}}$  mode propre de vibration de la corde a donc une fréquence  $f_n = nf_1$ .

Dans le cas de la tasse d'eau, connaissant les expressions des fréquences des 4 premiers modes de vibration, on peut en déduire les expressions des fréquences des modes propres en fonction de la fréquence du premier mode de vibration :

Fréquence en fonction de $h$	$F_n$ en fonction de $F_1$
$F_1 = -42,1h + 936,4$	$F_2 = 2,43F_1 + 158$
$F_2 = -102h + 2429$	$F_3 = 4,90F_1 + 642$
$F_3 = -207h + 5242$	$F_4 = 6,64F_1 + 463$
$F_4 = -279h + 6677,6$	

Il n'y a donc pas une relation mathématique simple, du type  $f_n = nf_1$ , qui permette de retrouver les différentes fréquences des  $n$  modes propres de vibration de la tasse d'eau en fonction de  $n$  et de  $f_1$ .

### **Conclusion de cette étude :**

Cette première étude montre alors finalement que :

- Une tasse vibre selon plusieurs modes possibles.
- La relation entre ces modes de vibration n'est pas évidente.
- Et bien sûr, nous avons pu quantifier la dépendance qu'il existe entre la hauteur de liquide dans la tasse et la fréquence de vibration de la tasse d'eau.

Mais finalement, peut-on réellement conclure que c'est la hauteur de liquide qui s'avère être le paramètre responsable de cette variation de fréquence ? Se peut-il que ce soit plutôt une histoire de masse ? Car après tout, en changeant la hauteur d'eau, on a également changé la masse...

Quel son produit alors la tasse lorsqu'on lui tape dessus, en fonction de la masse et en s'assurant que la hauteur de liquide reste constante dans un premier temps, puis en fonction de la hauteur de liquide, en s'assurant que la masse reste constante dans un deuxième temps ?



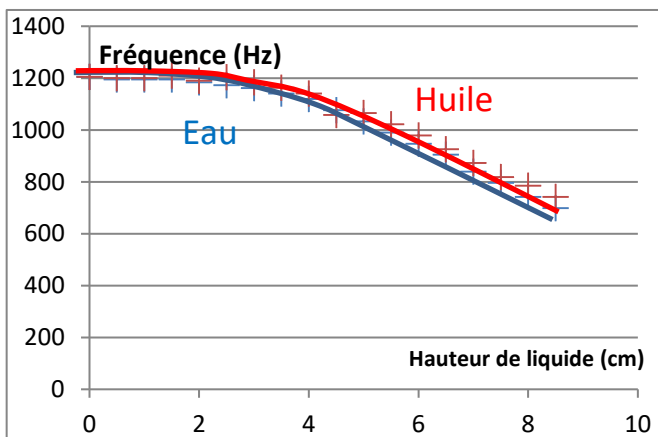
### 3 ) Influence de la masse :

#### a - Une première expérience avec de l'huile

Nous avons fait les expériences similaires aux précédentes en utilisant de l'huile, de masse volumique 920 kg/m<sup>3</sup>.

**Remarque 1 :** L'expérience a été réalisée dans un béccher de plus faible volume que celui utilisé dans le paragraphe précédent. Nous pouvons changer de bécchers d'une expérience à l'autre car nous avons pu vérifier que tous les bécchers possèdent plusieurs modes propres de vibration qui finissent par décroître linéairement en fonction de la hauteur d'eau  $h$ .

**Remarque 2 :** Comme on remarque que la pente est d'autant plus grande que le numéro du mode de vibration est élevé, on en déduit que la fréquence du mode plus élevé est d'autant plus sensible aux variations de  $h$ . De ce fait, comme les masses volumiques de l'eau et de l'huile sont relativement voisines, nous avons tracé, pour que la différence de comportement soit plus visible, l'évolution du deuxième mode de vibration  $F_2$  en fonction de  $h$ , pour l'eau et pour l'huile, sur le graphique suivant (figure 4) :



Cette première expérience avec de l'huile nous amène à conclure que pour une même hauteur de liquide dans la tasse, la fréquence est plus grande avec de l'huile qu'avec de l'eau. Compte tenu des différences de masse volumique entre l'huile et l'eau, nous pouvons donc dire qu'à hauteur de liquide égale dans la tasse, plus la masse du liquide est faible, et plus la fréquence de vibration du système est grande.

Nous avons voulu en savoir davantage sur cette dépendance qu'il existe entre  $F$  et  $m$  avec  $h$  constant.

Figure 4 : Comparaison des évolutions de la fréquence propre de vibration en fonction de la hauteur d'huile et d'eau.

#### b – Evolution de la fréquence en fonction de $m$ avec $h$ constant :

Pour mener à bien cette étude, il a fallu chercher des liquides de densités différentes. Pour avoir des liquides de densités supérieures à 1, nous avons tout simplement ajouté du sel dans de l'eau, en contrôlant la densité grâce à un densimètre. Voici alors les résultats que nous avons obtenus : Nous avons laissé la densité en abscisse, et comme le volume versé de chaque liquide est identique, nous visualisons bien (figure 5) l'évolution de la fréquence en fonction de la masse.

liquide	densité	fréquence $F_2$ (Hz)
White spirit	0,76	1800
Huile	0,92	1690
Eau	1	1636
Eau salée	1,1	1610
Eau salée	1,2	1550

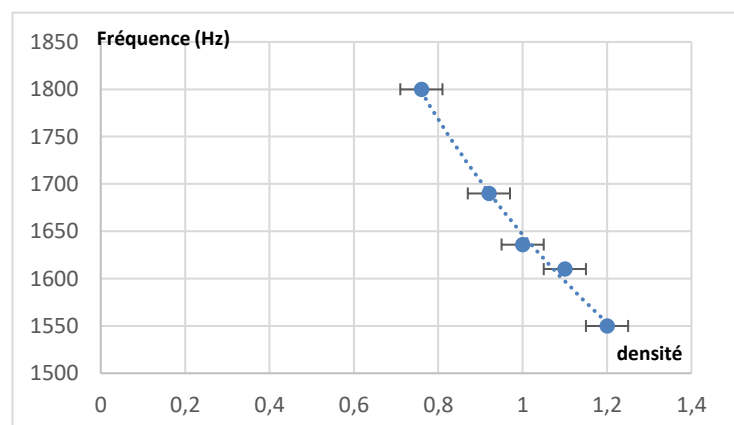


Figure 5 – Evolution de la fréquence propre de vibration en fonction de la masse  $m$  de liquide (de masses volumiques différentes, et avec volume  $V = Sxh$  constant)



Il nous est alors venu une idée : peut-on modéliser la tasse d'eau par un dispositif « solide ressort » ?

Nous savons qu'un tel dispositif vibre à une fréquence propre qui répond à la formule :  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

En traçant  $f$  en fonction de  $1/\sqrt{m}$ , on obtient (figure 6) :

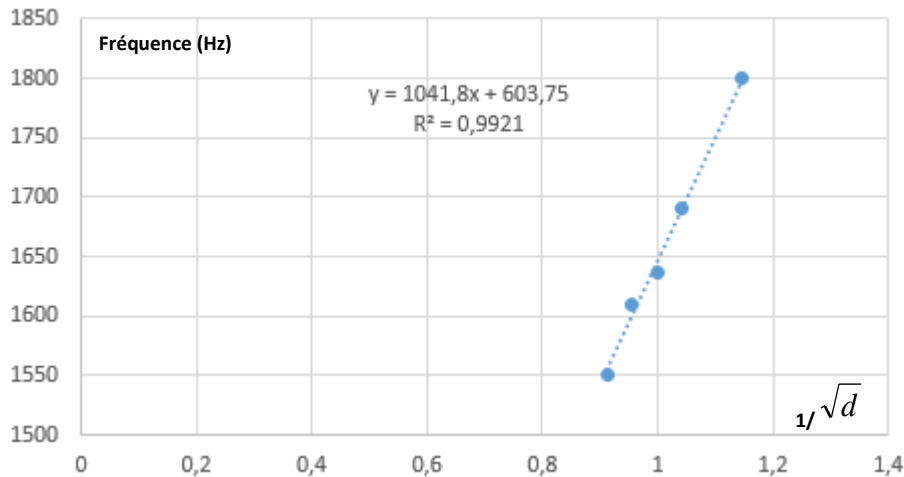


Figure 6 : Evolution de la fréquence propre de vibration en fonction de la masse  $1/m^{1/2}$  de liquide (de masses volumiques différentes, et avec  $h$  constante – Comparaison avec un dispositif solide ressort

Nous remarquons ici que la fréquence de vibration, pour une hauteur de liquide fixée, est quasiment inversement proportionnelle à la racine carrée de la masse du liquide contenu dans la tasse. Cette analogie avec le dispositif solide ressort nous permet d'imaginer en quelque sorte que dans le régime linéaire, la tasse jouerait le rôle du ressort, et l'eau représenterait la masse accrochée à l'extrémité du ressort. Mais l'analogie entre une tasse d'eau et un dispositif solide ressort est limitée, car le dispositif solide ressort ne vibre qu'à une seule fréquence propre alors que la tasse d'eau en possède plusieurs. D'autre part, le dispositif solide ressort ne fait pas intervenir la notion d'ondes stationnaires indispensable à la naissance du son obtenu en tapant sur la tasse.

Enfin, nous n'avons pas un grand choix de liquides de densités différentes et nous ne pouvons alors étudier l'évolution de la fréquence que sur une faible plage de densité, ce qui limite forcément les conclusions que l'on peut tirer de notre modélisation, car d'autres types de courbes peuvent modéliser convenablement nos mesures.

Voyons maintenant comment la fréquence dépend de la hauteur de liquide, tout en maintenant la masse constante.

#### 4 ) Influence de la hauteur sans variation de masse

Reprenons les solutions de densités différentes utilisées lors de la dernière expérience, et versons en un certain volume de sorte que la masse versée soit toujours la même. La hauteur de liquide dans le bécher sera donc différente pour chaque liquide. Tapons ensuite sur la tasse et mesurons la fréquence du son.

Voici les résultats obtenus (figure 7) :

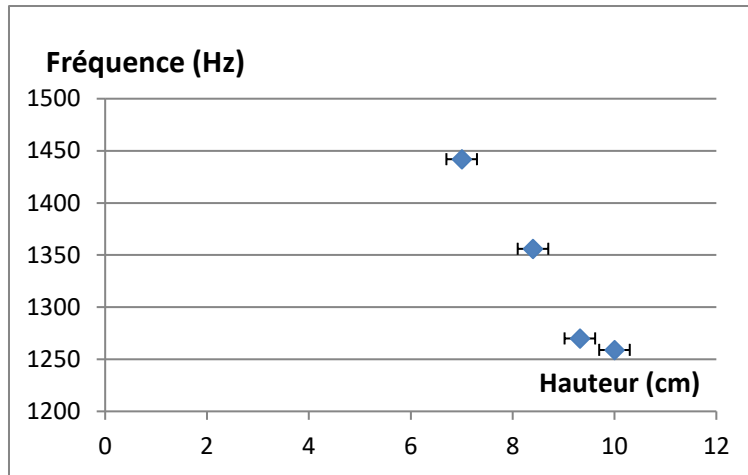


Figure 7 : Fréquence en fonction de la hauteur, avec masse constante

Les résultats expérimentaux tendent à montrer une dépendance de la hauteur de liquide, indépendamment de la masse. Mais cela peut cacher autre chose : en effet, en faisant varier la hauteur pour une masse identique de liquide, nous avons déplacé le centre de gravité du liquide vers le haut. Donc les résultats de la figure 7 peuvent traduire le fait que plus la masse sera proche du bord supérieur du bécher, et plus la fréquence de vibration sera faible. Cela se rapproche d'un comportement que l'on peut observer dans le cas d'un pendule, qui oscille avec une fréquence d'autant plus faible que le fil du pendule est grand, pour une masse accrochée à son extrémité.

## 5 ) Conclusion de la première partie :

La fréquence obtenue en tapant une tasse contenant un liquide semble dépendre non seulement de la masse du liquide, mais également du centre de gravité du liquide.

Une tasse de lait nous paraît dans tous les cas un système vibrant bien plus complexe à étudier qu'un instrument de musique à corde ou à vent. Sa complexité vient sans doute du fait que ce système est composé de deux milieux distincts. Deux analogies permettent cependant d'avancer sur la compréhension du comportement de la tasse de lait : une analogie avec un dispositif solide ressort, ainsi qu'une corde de guitare.

Comme nous avons voulu présenter ce mémoire en respectant l'ordre chronologique de notre travail afin d'en faire ressortir notre démarche, nous terminons ici cette première partie sur les vibrations pour aborder la seconde. Mais dans une troisième partie, nous reviendrons sur la façon dont la tasse de lait vibre, ce qui complètera nos connaissances, et ce qui nous permettra de comprendre les résultats expérimentaux obtenus dans les deux premières parties.

## II – Un phénomène plus curieux :

Puisque le but de ce projet est de tenter d'expliquer les sons que peut produire une tasse, il en est un que nous ne pouvions pas laisser de côté. Et même si dans un premier temps, il semble déconnecté de la première partie de ce mémoire, c'est pourtant un retour sur la compréhension de la vibration de la tasse qui nous aidera à y voir plus clair.

### 1 ) Description du phénomène

Prenons une tasse, versons-y du lait et chauffons le tout au micro-onde de façon à ce que le lait soit tiède. Ajoutons alors une cuillère de chocolat en poudre et remuons quelques secondes. Enfin, tapons à répétition avec la cuillère dans le fond de la tasse (nous avons filmé l'expérience, celle-ci est visible en suivant le lien : [http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g6\\_les-mysteres-de-la-tasse-phenomene-etudie\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g6_les-mysteres-de-la-tasse-phenomene-etudie_school) ) Nous entendons alors une succession de sons dont la fréquence devient de plus en plus aigüe au cours du temps. Nous avons enregistré la bande son avec le logiciel audacity pour pouvoir mesurer les fréquences grâce à des analyses spectrales. Nous avons alors pu tracer l'évolution de la fréquence au cours du temps (figure 8), et voici ce que nous avons obtenu :



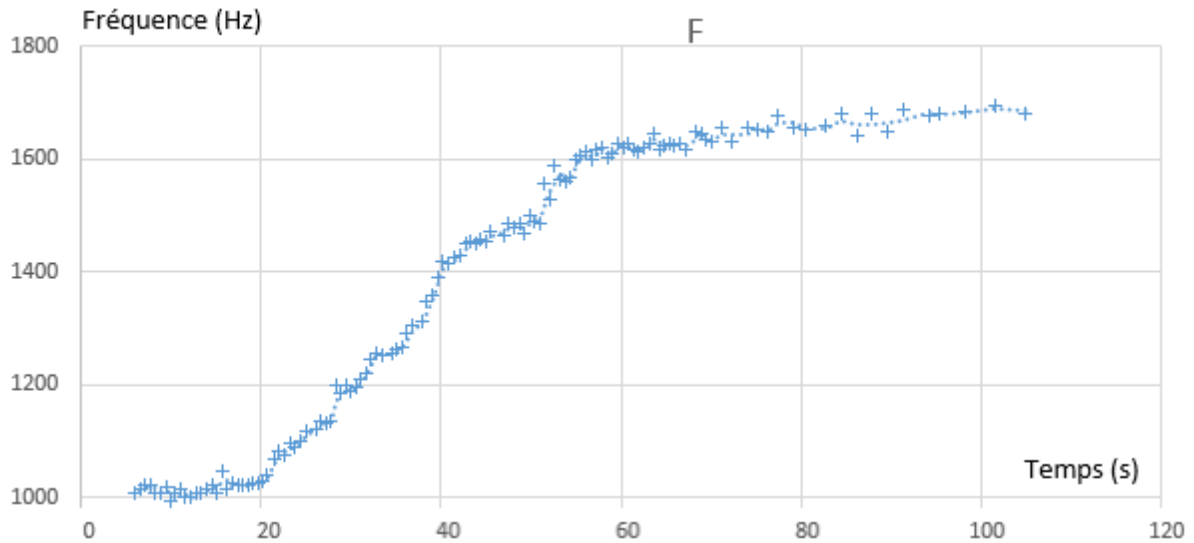


Figure 8 : Evolution de la fréquence de vibration au cours du temps en présence de bulles qui disparaissent.

**Il nous reste donc à expliquer la raison de cette variation de fréquence.**

## **2 ) A quoi est due cette augmentation de la fréquence du son ?**

Puisque la fréquence varie au cours du temps, c'est qu'un autre paramètre varie également. C'est ce paramètre que nous devons chercher pour expliquer l'évolution de la fréquence. Qu'est ce qui peut alors évoluer au cours du temps après avoir fait ce mélange ?

a – Est-ce que c'est dû à la fréquence des coups donnés sur la tasse ?

Non : peu importe la fréquence à laquelle on tape la tasse : que ce soit avec des intervalles de 1, 2, 5, 10 secondes, la fréquence des sons semble évoluer toujours de la même manière.

b – Est-ce que c'est dû à une variation de température ?

Notre première idée a été de s'intéresser à l'évolution de la température, même si en l'espace de quelques minutes, elle ne devait pas beaucoup évoluer. Nous l'avons mesurée, et effectivement nous avons constaté que cette température évoluait relativement peu durant l'évolution de la fréquence. Cette température évolue d'environ 2 degrés durant les deux minutes d'acquisition.

Mais ce n'est pas parce que cet écart de température est faible, qu'il n'engendre pas des conséquences importantes sur l'évolution de la fréquence. Pour savoir si la température était le paramètre responsable de l'évolution de la fréquence  $F$ , nous avons alors voulu comparer l'évolution de la température  $T$  à celle de la fréquence  $F$  pour voir si elles étaient corrélées.

Voici l'évolution de la température  $T$  que nous avons mesurée (figure 9)

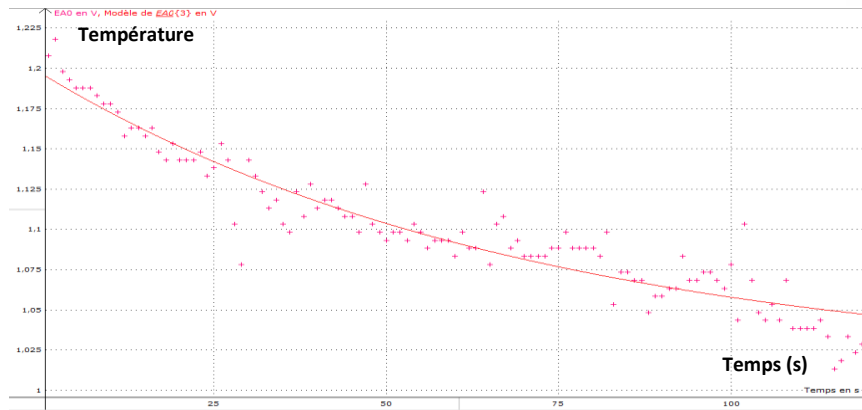


Figure 9 : Evolution de la température de l'eau durant la disparition des bulles

Il est normal de voir cette température diminuer. Cela dit, pour que visuellement, la comparaison entre l'évolution de T et celle de F soit plus aisée, nous avons retourné la courbe de l'évolution de la température par rapport au plan de la feuille. Voici alors ce que donne la superposition des deux courbes (figure 10) :

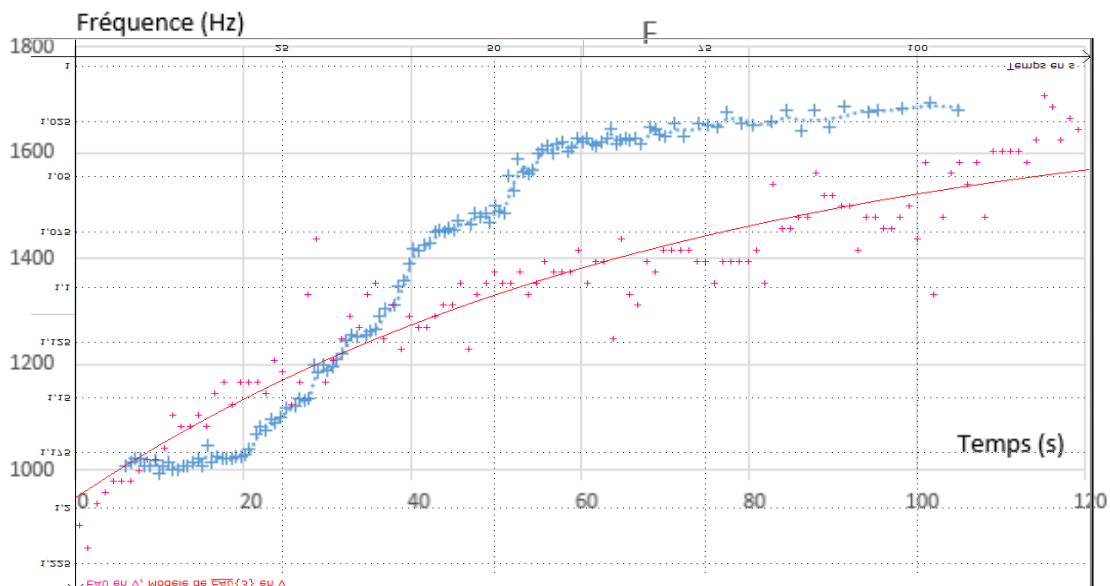


Figure 10 : Comparaison de l'évolution de la température (en rouge) et de la fréquence (en bleu) de vibration de la tasse

Pour que la comparaison soit possible, nous avons simplement veillé à ce que l'échelle des abscisses (le temps) soit la même pour les deux courbes superposées.

On se rend compte alors que l'évolution de la température n'a rien à voir avec celle de la fréquence, ce qui permet de dire que la température n'est pas le paramètre qui va influencer l'évolution de la fréquence que l'on cherche à expliquer.

### c – Le phénomène s'observe-t-il avec d'autres mixtures ?

Quelque chose varie au cours du temps, mais nous ne voyons absolument pas quoi... Nous avons pensé que l'homogénéité du chocolat au lait variait au cours du temps. Alors nous avons refait les mesures en agitant constamment avec un agitateur magnétique le chocolat au lait, et nous obtenons une évolution identique.

Comme nous commençons à être à cours d'idée, nous avons cherché l'inspiration en faisant d'autres expériences, dans lesquelles on a tantôt changé le liquide versé dans la tasse, tantôt changé ce qu'on ajoutait dans le liquide.

Voici alors résumé dans le tableau suivant ce que nous avons observé :



	Lait Chaud	Lait froid	Eau chaude	Eau froide
<b>Chocolat en poudre</b>	positif	négatif	positif	négatif
<b>Sucre</b>	positif	négatif	positif	négatif
<b>Miel</b>	positif	négatif	positif	négatif
<b>Solution de café</b>	positif	négatif	positif	négatif

Dans ce tableau, nous avons constaté que quel que soit le liquide (lait ou eau) dans lequel on ajoutait une substance, le phénomène se produisait à condition que le liquide soit préalablement chauffé. D'autre part, on constate aussi que quelle que soit la substance rajoutée dans le liquide chauffé, le phénomène se produisait. La dernière ligne remplie nous étonnait beaucoup car nous n'avions versé, lors de cette expérience, que quelques millilitres de solution de café dans un verre d'eau chaude, et cela à suffit pour observer le phénomène. Alors nous avons fait un dernier essai : nous avons tout simplement versé un peu d'eau froide dans de l'eau chaude.... Et bien nous avons observé le phénomène. L'évolution de la fréquence au cours du temps était bien plus rapide, mais cela dit, le phénomène était observable ! Et le gros avantage dans cette dernière expérience, c'est que, puisque nous n'utilisons que de l'eau, nous pouvons voir ce qui se passe dans le bécher au cours du temps. Et qu'avons-nous vu ?

Des toutes petites bulles de diamètre très inférieur au millimètre, qui se forment et qui finissent par remonter à la surface. Et ce qui était particulièrement intéressant était alors de constater que l'évolution de la fréquence se déroulait pendant que ces bulles disparaissaient du bécher.

Suite à cette constatation, nous avons versé différents types d'eau gazeuse dans des béchers et nous avons constaté, en tapant sur ces béchers, que le phénomène se produisait, mais que l'évolution de la fréquence était extrêmement rapide. Cela est sûrement dû au fait que les bulles des eaux gazeuses sont relativement grosses et remontent plus rapidement à la surface. Nous avons donc maintenant une piste à explorer : les bulles.

### **3 ) Les bulles sont-elles la clé du mystère ?**

#### a – L'évolution de la fréquence du son est-elle bien liée à la présence des bulles ?

Il nous fallait, pour répondre à cette question, pouvoir comparer l'évolution des bulles et l'évolution de la fréquence. Nous avons alors eu l'idée d'envoyer un faisceau LASER dans le bécher et de suivre l'évolution de l'intensité de la lumière émergeant du bécher. En effet, plus le nombre de bulles est important dans le bécher, et plus la lumière du LASER est diffusée, donc plus l'intensité transmise est faible.

Mais où convient-il de faire traverser le faisceau LASER dans le bécher ? Plutôt horizontalement ? Verticalement ? Dans la partie haute ? Au milieu ? En bas ? Ne voulant pas privilégier un choix arbitraire plutôt qu'un autre, nous avons fait traverser le bécher par un ensemble de faisceaux Laser capables alors de suivre l'évolution de la concentration de bulles selon plusieurs directions en même temps.

#### - Dispositif expérimental

Nous avons utilisé un faisceau Laser horizontal (figure 11), que nous avons envoyé sur un réseau afin de disposer en sortie plusieurs faisceaux laser. Pour que ces faisceaux traversent le bécher horizontalement, nous avons placé ce réseau au foyer focal objet d'une lentille convergente. De l'autre côté du bécher, nous avons positionné des photorésistances permettant de suivre l'évolution de l'intensité lumineuse transmise.

Nous avons également fait traverser le contenu du bécher par un ensemble de faisceaux laser verticaux en utilisant le même type de montage.

D'autre part, pendant cette expérience, nous avons sans cesse tapé sur la tasse afin de mesurer l'évolution de la fréquence du son produit au cours du temps, et de comparer cette évolution aux évolutions des différentes intensités lumineuses des faisceaux laser transmis.

Enfin, nous devons générer des bulles dans l'eau contenue dans le bécher. Pour cela, nous avons eu la chance de posséder un robinet qui délivre de l'eau très chargée en gaz, et dans laquelle de grandes quantités de bulles microscopiques apparaissent aussitôt l'eau versée dans le bécher.

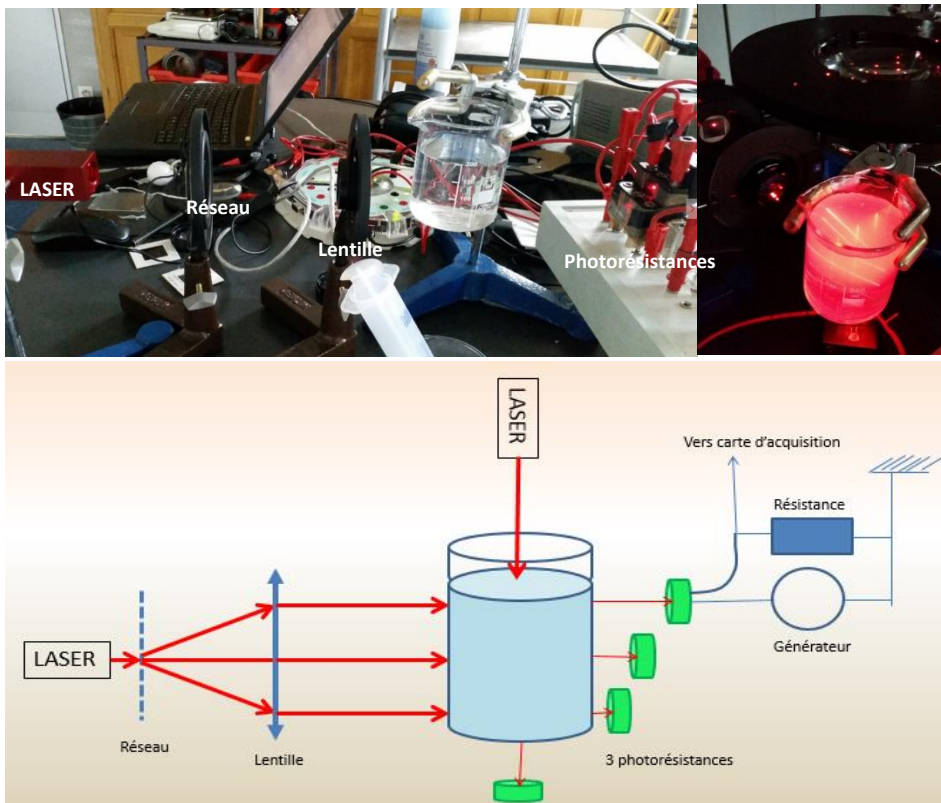


Figure 11 – Dispositif expérimental permettant de suivre l'évolution de la concentration des bulles dans l'eau.

- Résultats et commentaires : La vidéo de l'expérience est visible en suivant le lien suivant : [http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g4\\_influence-des-bulles\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g4_influence-des-bulles_school)
- Voici les résultats obtenus (figure 12). Les courbes sur le graphique montraient une intensité qui augmentait bien avec le temps, mais comme les différents capteurs n'étaient pas éclairés de la même manière par les différents faisceaux, même en l'absence de bulles, les intensités maximales en fin d'expérience n'étaient pas identiques. Nous avons alors normalisé les 4 courbes obtenues. Les 4 courbes évoluent donc de la même manière. Le moment où elles commencent à croître n'est pas le même pour chacune des courbes car les bulles commencent par disparaître par le bas du bécher. Il est donc tout à fait compréhensible que la courbe bleue, qui représente le Laser horizontal passant en bas dans le bécher, soit la première à croître.

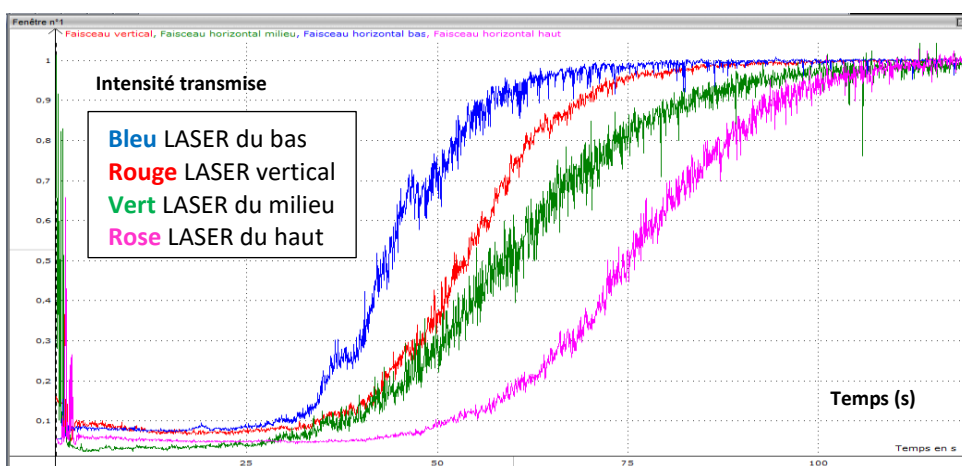


Figure 12 : Evolution de l'intensité de la lumière transmise des lasers après traversée dans l'eau avec les bulles du bécher.

A première vue, les croissances des intensités des faisceaux laser transmis et celle de la fréquence du son sont similaires. Mais pour en être certain, nous devons superposer les courbes correspondantes (figure 13), en s'assurant que l'échelle de temps reste la même pour que cette superposition soit significative.

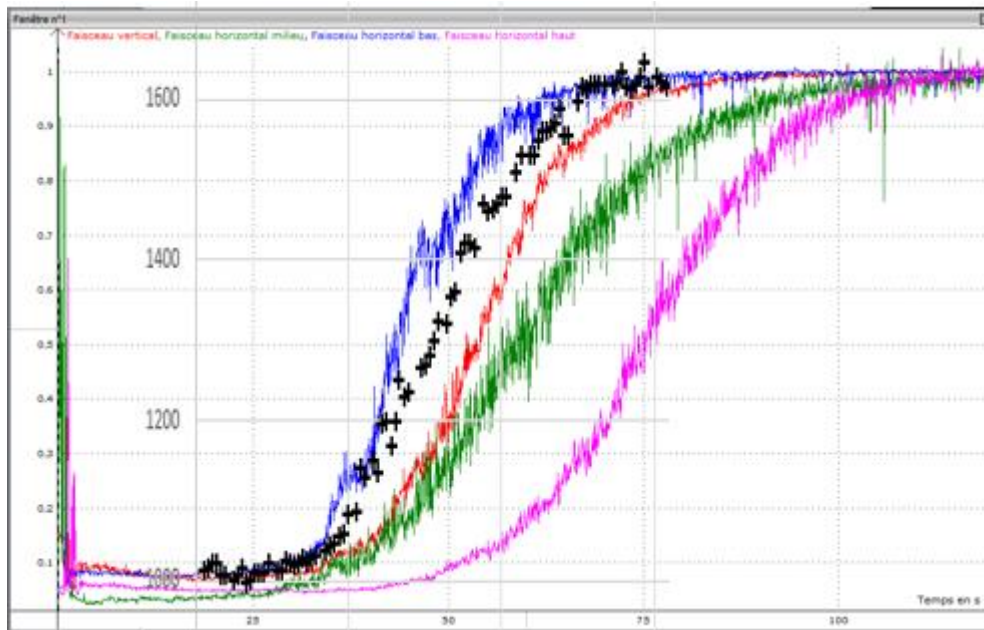


Figure 13 : Comparaison de l'intensité transmise et de l'évolution de la fréquence (en noir) de vibration de la tasse contenant l'eau avec des bulles

Les résultats sont sans équivoques : nous constatons bien que les évolutions sont similaires, et ce, quel que soit le faisceau laser considéré. Il y a certes un décalage entre ces évolutions et l'évolution de la fréquence, qui est simplement dû au fait, comme on l'a déjà dit, que les bulles qui se sont formées remontent du bas, vers la surface. Les pentes des courbes sont également légèrement différentes (mis à part le faisceau rouge qui est le rayon laser vertical), ce qui est sûrement dû au fait que les bulles du bas, en remontant, viennent s'ajouter aux bulles déjà présentes dans les parties supérieures du bécher. Les bulles dans les parties supérieures du bécher peuvent donc mettre globalement plus de temps pour disparaître que les bulles des parties inférieures. L'expérience montre donc que l'évolution de la fréquence du son est bien reliée aux bulles formées dans l'eau.

Mais on peut toutefois chercher à en savoir davantage : est-ce que les bulles influencent la fréquence du son de par leurs concentrations ? Est-ce que leur rayon peut avoir une importance ?

#### b - Influence de la taille des bulles :

Nous avons rencontré des chercheurs de Poitiers avec qui nous avons discuté de notre projet. Ils nous ont alors en particulier expliqué que le phénomène qui engendre une atténuation de l'intensité en présence de bulle est la diffusion de Mie. Nous avons alors cherché des renseignements sur cette diffusion, et nous avons en particulier appris que la lumière diffusée lors de la diffusion de Mie n'est pas isotrope (figure 14). Cette diffusion se fait d'autant plus vers l'avant que les bulles sont de grosses tailles. Le faisceau est alors diffusé dans un cône caractérisé par un angle relié à la taille des bulles. Ceci nous a donné une idée :

En mesurant l'angle de diffusion au cours du temps dans l'eau sortant du robinet, il doit être possible de voir si la taille des bulles évolue. Et en comparant l'évolution de l'angle de diffusion avec l'évolution de la fréquence, on pourra alors en conclure quant à un rôle éventuel de la taille des bulles dans l'évolution de la fréquence du son. Nous avons alors mesuré la variation de l'angle de diffusion au cours du temps (figure 15) et réalisé une vidéo visible en suivant ce lien:

[http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g5\\_influence-taille-des-bulles\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g5_influence-taille-des-bulles_school)

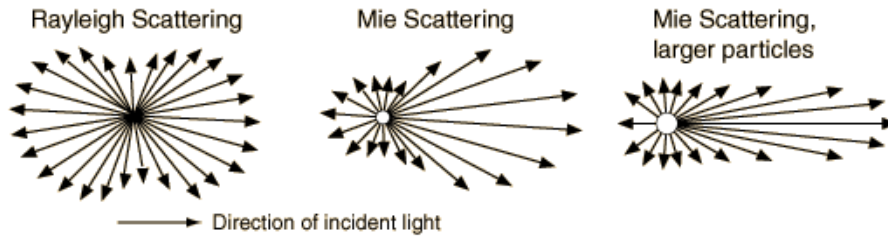


Figure 14 – Diffusion de Rayleigh et de Mie

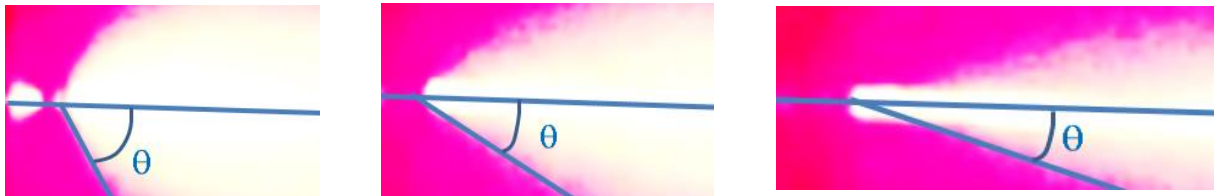


Figure 15 : Quelques valeurs d'angles de diffusion au cours du temps

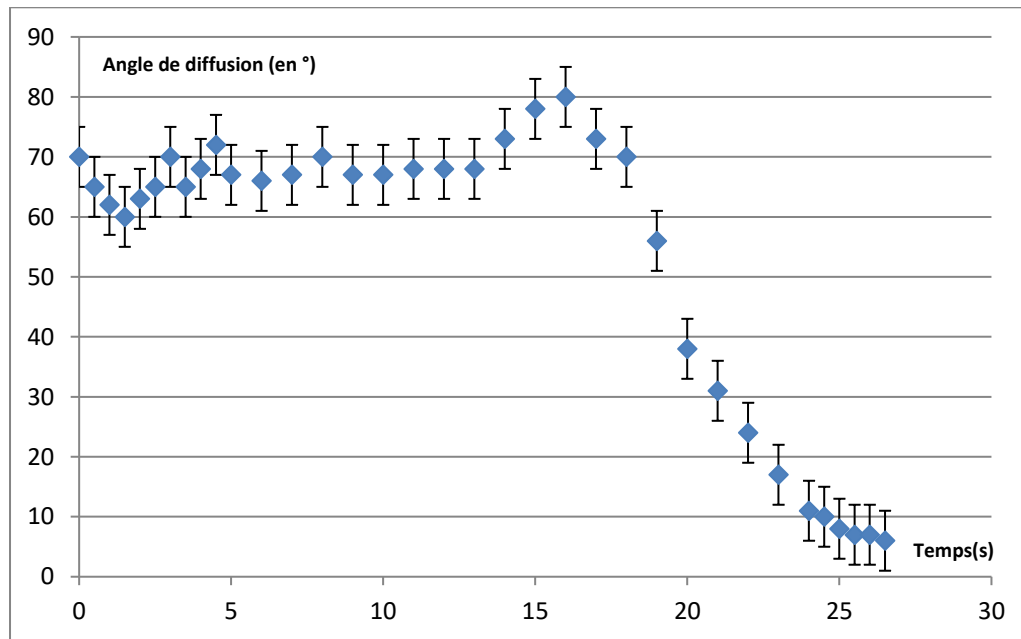


Figure 16 : Evolution de l'angle de diffusion au cours du temps

Comme le montre la courbe (figure 16), l'angle de diffusion est relativement constant, avant de s'écrouler en environ 5 secondes seulement. L'évolution de la fréquence est bien plus lente : on peut voir sur le graphique de la figure 8 qu'elle s'étale sur environ 30 secondes. On peut en conclure que la taille des bulles ne semble pas être le paramètre qui influence le plus l'évolution de la fréquence. La chute brutale de l'angle de diffusion est juste liée au moment où les bulles disparaissent totalement de l'eau.

### c – Ce serait donc la concentration des bulles qui serait le paramètre clé ? Comptage des bulles

Nous savons que l'évolution de la fréquence du son suit parfaitement l'évolution de l'intensité de la lumière transmise des LASER. Il faudrait alors maintenant prouver que l'intensité transmise des LASER est bien reliée à la concentration des bulles dans le récipient. Mais comment faire cela ?

Nous avons tenté une première expérience, qui consistait à placer dans un aquarium, un ensemble de photorésistances éclairées par différents lasers, tel que le parcours des faisceaux laser dans le liquide ait différentes longueurs, mais les résultats obtenus sont inexploitable du fait d'une grande inhomogénéité des bulles dans l'eau du grand aquarium (schéma ci-contre).



Nous avons alors décidé tout simplement de compter les bulles au cours du temps, et de comparer l'évolution du nombre de bulles à celle de l'intensité de la lumière transmise.

Compter les bulles.... Au début, nous n'y pensions pas vraiment et cela ressemblait plus à une plaisanterie. Mais ça, c'était sans compter sur ce dispositif tout simple : une lentille très convergente, et la caméra d'un smartphone (figure 17)

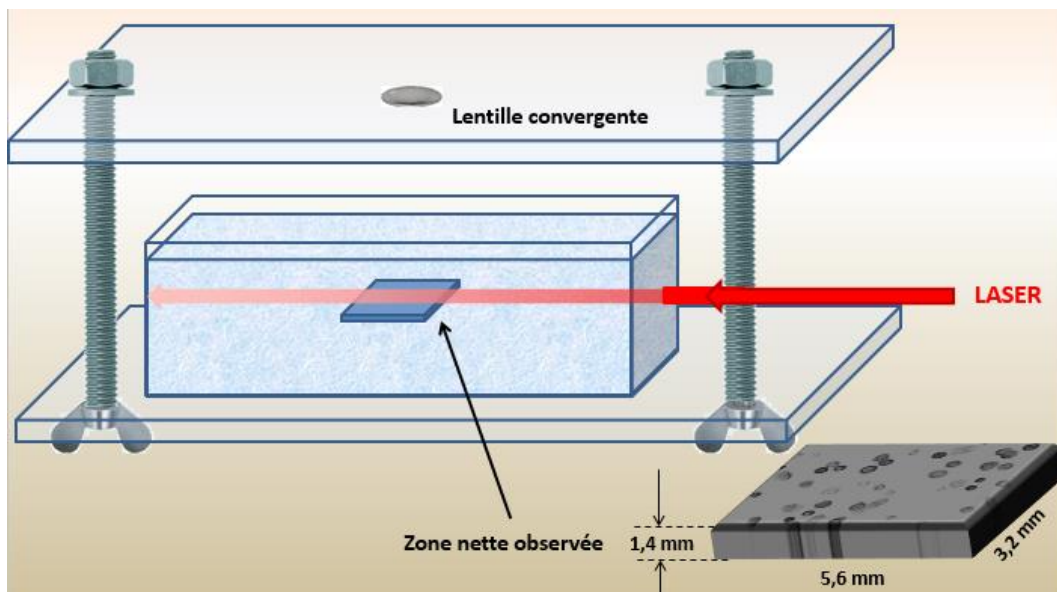


Figure 17 : dispositif expérimental permettant le comptage des bulles

En posant le smartphone sur la plaque du haut, de telle sorte que l'objectif de la caméra du smartphone soit superposé à la lentille convergente, et en utilisant le grandissement numérique de la caméra, on obtient ainsi un dispositif qui permet de grandir 50 fois une zone nette observable (dont nous avons évalué les dimensions à l'aide d'une grille et des 2 tiges filetées préalablement étalonnées).

La vidéo de l'expérience est visible en suivant le lien suivant :

[http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g3\\_influence-concentration-bulles\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g3_influence-concentration-bulles_school)

Une fois ces mesures faites, nous avons envoyé un faisceau laser de sorte que le faisceau laser traverse la zone nette observable, l'idée étant de comparer l'intensité de cette lumière transmise à celle de l'évolution de la concentration des bulles à cette même hauteur du récipient.

Une fois le dispositif prêt, nous avons rempli le récipient de l'eau contenant les microbulles et nous avons filmé les bulles de la zone observable avec le smartphone. Voici les résultats obtenus (figure 18) :

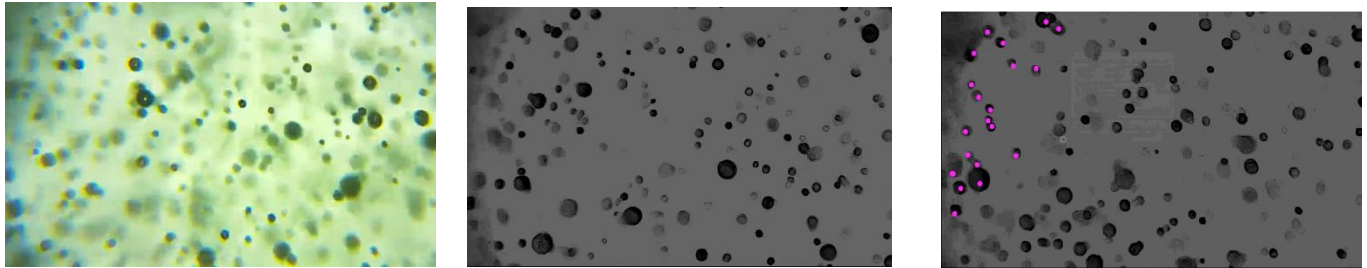


Figure 18 : De gauche à droite : image de la vidéo de l'eau avec des bulles – une image filtrée – Comptage des bulles d'une image filtrée en les marquant d'un point rose

Le film dure environ 1 minute. Nous avons visualisé le film. Pour faire ressortir les bulles du film afin de les compter plus facilement, nous avons modifié le contraste du film, les couleurs, jusqu'à obtenir l'image du milieu. Nous avons alors compté les bulles chaque seconde du film, en les pointant une par une, comme on peut le voir sur l'image de droite. Et comme la vidéo contenait 30 images par secondes, nous avons compté les bulles sur 4 images par seconde et nous avons fait une moyenne sur ces 4 images, et ce, pour chaque seconde. Cela revient donc à compter les bulles sur 240 images, ce qui est particulièrement long. Et voici ce que donne ce comptage (Figure 19) :

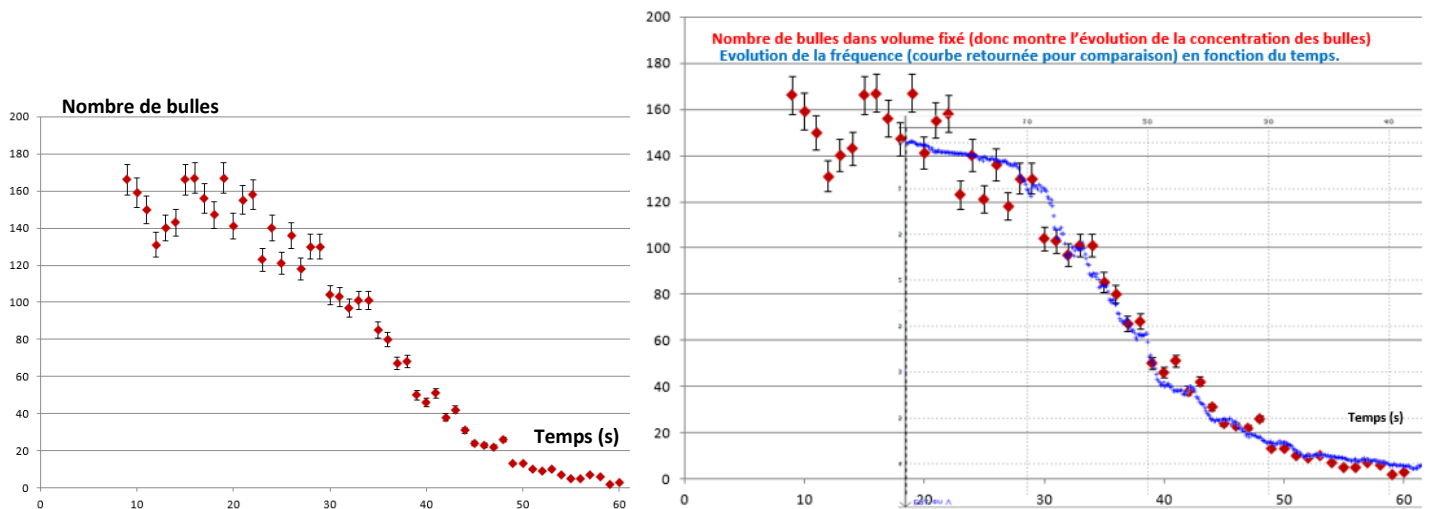


Figure 19 : Evolution de la concentration des bulles (à gauche) – Comparaison de l'évolution de la concentration des bulles (en rouge) avec l'évolution de la fréquence (courbe retournée verticalement pour rendre la comparaison possible (en bleu).

Sur le schéma de droite, nous avons retourné la courbe montrant l'évolution de fréquence par rapport à un axe horizontal, toujours en prenant soin de respecter l'échelle temporelle de l'axe des abscisses.

La superposition des deux courbes est alors vraiment spectaculaire ! Le résultat montre donc que la fréquence du son de la tasse est proportionnelle à la concentration des bulles présentes dans le liquide.

Mais comment les bulles sont ainsi capables de modifier la fréquence du son généré par la tasse ?



## 4 ) Comment les bulles sont-elles capables de modifier le son généré par les coups sur la tasse ?

### a – Hypothèse

Notre première idée a été de supposer que les bulles modifient la façon dont les ondes se propagent. En effet, nous savons que les ondes sonores se propagent à une vitesse de l'ordre de 1500 m/s dans l'eau, alors qu'elle n'est que de 340 m/s dans l'air, donc dans les bulles. Donc, au fur et à mesure que les bulles disparaissent du béccher, les ondes sonores se propagent avec une célérité qui augmente.

D'autre part, les longueurs d'onde des modes propres de vibration sont quant à elles liées à la géométrie du système. Dans le cas d'une corde de guitare par exemple, ces longueurs d'onde sont liées en effet à la longueur de la corde. Dans le cas de la tasse, la présence de bulle ne change pas la géométrie du système, donc les longueurs d'onde  $\lambda$  des modes propres de vibrations de la tasse d'eau, avec ou sans bulle, ne doivent pas varier.

Or on sait que la célérité, la longueur d'onde et la fréquence d'une onde sont reliées par la relation :  $v = \lambda \times f$ . Donc, compte tenu que  $\lambda$  est constante, si la célérité augmente lorsque la concentration de bulles diminue, alors la fréquence propre de vibration doit également augmenter lorsque les bulles disparaissent. C'est bien ce que l'on constate expérimentalement.

Mais comment vérifier que c'est cela qui influence l'évolution de la fréquence ?

### b – Vérification expérimentale

Pour vérifier l'hypothèse formulée dans le paragraphe précédent, nous avons eu l'idée de positionner un émetteur et un récepteur ultrasonores dans l'eau, l'un en face de l'autre, séparés de quelques centimètres, dans un récipient assez large de forme circulaire (un grand cristalliseur) (figure 20). L'émetteur émet alors un signal sinusoïdal de fréquence constante. En l'absence de bulle, imaginons que le signal reçu par le récepteur soit en phase avec le signal émis par l'émetteur (figure 20). En présence de bulles, puisque la célérité des ondes est modifiée, et que l'on a toujours la relation  $v = \lambda \times f$ , la longueur d'onde de l'onde qui se propage entre l'émetteur et le récepteur est également modifiée (puisque cette fois-ci, dans ce raisonnement, c'est la fréquence de l'onde qui est constante), et les signaux émis et reçu n'ont alors plus aucune raison d'être en phase. Autrement dit, on peut rechercher comment évolue le déphasage entre ces deux signaux au cours du temps, et comparer cette évolution à celle de la fréquence propre de vibration de la tasse lorsque les bulles disparaissent. Cela reviendra à comparer l'évolution de la célérité des ondes dans le liquide à l'évolution de la fréquence des sons produits en tapant sur la tasse.

La vidéo de l'expérience est visible en suivant le lien suivant :

[http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g2\\_influence-celerite-avec-les-bulles\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap0g2_influence-celerite-avec-les-bulles_school)

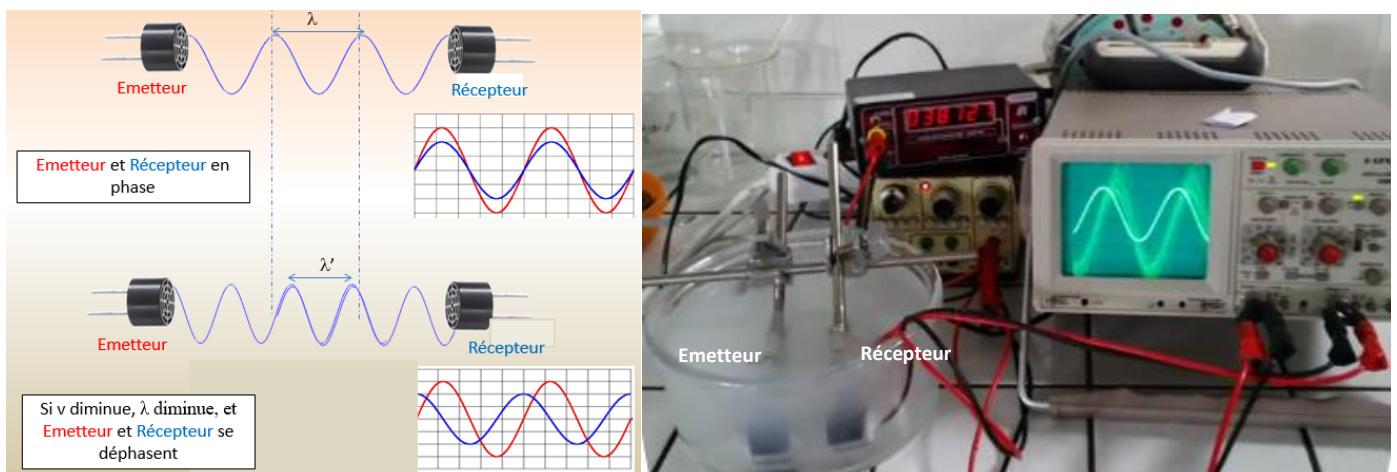


Figure 20 : dispositif expérimental permettant de mesurer la variation de la célérité des ondes acoustiques dans l'eau avec les bulles par mesure du déphasage.

Nous avons alors filmé l'écran de l'oscilloscope durant l'expérience pour mesurer l'évolution de ce déphasage, et voici les résultats obtenus (Figure 21) :

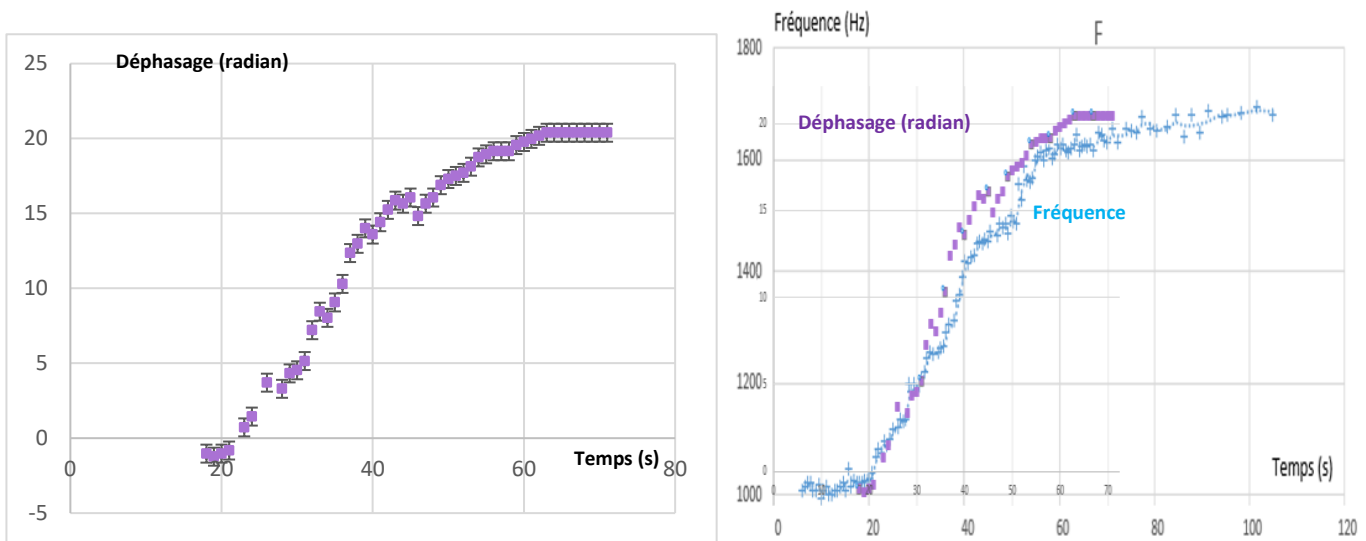


Figure 21 : Evolution du déphasage (à gauche) - Comparaison de l'évolution du déphasage (violet) avec l'évolution de la fréquence (en bleu) de vibration de la tasse contenant de l'eau avec des bulles (à droite)

Le schéma de droite montre la superposition de l'évolution du déphasage et l'évolution typique de la fréquence que nous avons mesurée dans un bécher. Nous avons à nouveau respecté les échelles de temps. On remarque que le déphasage suit à peu de chose près l'évolution de la fréquence. La légère différence de pente est peut-être simplement due au fait que la distance entre l'émetteur et le récepteur est un peu plus faible que le diamètre du bécher avec lequel l'évolution de la fréquence a été mesurée.

Ces mesures valident donc notre hypothèse : les bulles modifient la célérité des ondes, ce qui modifie les fréquences propres de vibration de la tasse d'eau.

Mais peut-être pas comme on le pensait...

Il y a un problème d'ordre quantitatif : le graphique de gauche montre que le déphasage entre le début de l'expérience et la fin de l'expérience est de l'ordre de 25 rad, c'est-à-dire environ  $4 \times 2\pi$ .

A partir du déphasage et de la distance entre l'émetteur et du récepteur, on a pu mesurer que la célérité de l'onde en présence de bulles, au début de l'expérience, est environ 200 m/s, alors qu'elle est de 1500 m/s lorsqu'il n'y a plus de bulles. La célérité est donc multipliée par 7 au cours de l'expérience. Or la fréquence ne fait que passer de 1000 à 1600Hz, ce qui n'est pas compatible avec la relation  $v = \lambda \times f$ .

Conclusion :

- Les bulles sont bien responsables de l'évolution de la fréquence, mais ce n'est pas la variation de la célérité des ondes dans l'eau qui explique la variation de fréquence.
- Et cela veut aussi dire que les ondes qui passent dans l'eau n'ont aucun rôle dans l'évolution de la fréquence. Et donc, les ondes qui nous intéressent doivent être confinées dans la tasse.

**Mais alors, comment la présence de bulles peut modifier la fréquence de vibration du bécher si les ondes restent confinées dans le matériau même qui compose le bécher ?**

Il faut que nous en sachions davantage sur la façon dont vibre le bécher.

Et profitons-en pour faire le point : qu'est ce qui est juste dans ce que nous avons écrit, et qu'est ce qui peut être remis en cause ?

## III - Retour sur la façon dont vibre une tasse

### 1 ) De quelle façon vibre une tasse ?

Pour voir une tasse d'eau vibrer, nous l'avons forcée à vibrer avec une membrane vibrante que nous avons collée sur la tasse. Nous avons dans un premier temps tapé sur la tasse afin de rechercher à quelle fréquence elle vibre naturellement, puis nous avons réglé la fréquence d'excitation de la membrane à cette fréquence-là, pour se positionner dans des conditions de résonance. Le résultat obtenu est spectaculaire ! Nous avons pris en photo la surface de l'eau dans le bécher (figure 22).

D'autre part, la vidéo de l'expérience est visible en suivant le lien suivant :

[http://www.dailymotion.com/video/x5ap5be\\_vibration-tasse\\_school](http://www.dailymotion.com/video/x5ap5be_vibration-tasse_school)

On observe les ondes stationnaires dont on parlait dans la première partie du mémoire. On observe en particulier 4 ventres de vibration et 4 nœuds pour le premier mode de vibration.

Comme en tapant sur le bécher, il nous était possible de connaître les fréquences des premiers modes de vibration du bécher, nous avons alors réglé la fréquence d'excitation de la membrane vibrante à ces valeurs trouvées, pour visualiser les ondes stationnaires dans les modes de vibration suivants. Nous avons pu voir la vibration du verre pour les deuxième et troisième modes. Mais la photo concernant le troisième mode n'arrive pas à montrer les vibrations. Voici ce que nous avons pu observer pour les modes 1 et 2 (Figure 22):

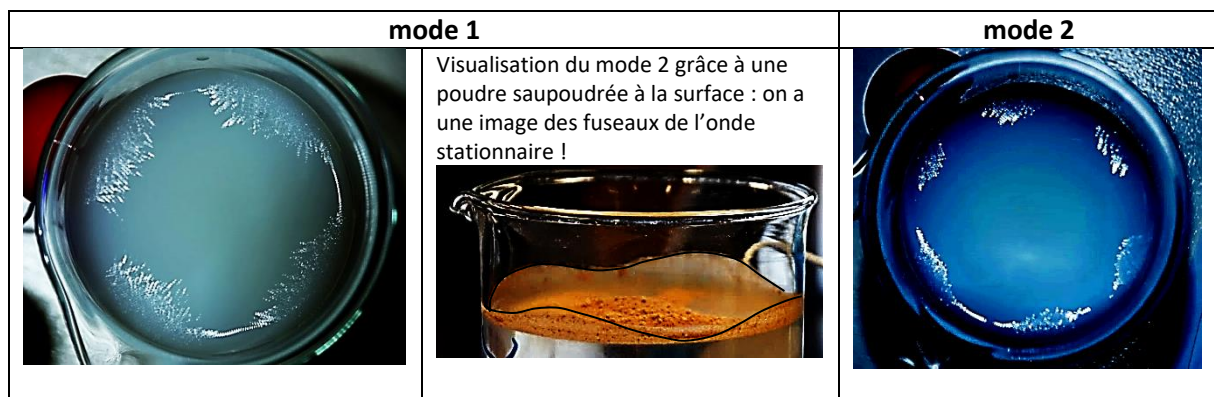


Figure 22 : visualisation des premiers modes propres de vibration de la tasse d'eau.

Le 3<sup>ème</sup> mode propre de vibration permettait de mettre en évidence 8 ventres de vibrations.

A l'aide de ces résultats, il nous était alors possible de mesurer les longueurs d'onde dans chacun des modes de vibration. Pour cela, nous avons mesuré le diamètre du bécher pour en déduire la valeur du périmètre du bécher, puis nous avons divisé le périmètre par 2 pour avoir la valeur de  $\lambda$  pour le mode 1, par 3 pour le mode 2, et par 4 pour le mode 3. Les résultats apparaissent dans le tableau ci-dessus. Dans la dernière colonne de ce tableau, nous avons calculé la célérité des ondes dans chacun des modes. Et là, nous avons été étonnés par deux choses : nous avons trouvé que les valeurs de la célérité étaient faibles, et nous avons été particulièrement étonnés de voir des célérités aussi différentes selon les différents modes, alors que nous pensions trouver une célérité constante, comme cela est le cas pour les différents modes de vibration d'une corde de guitare.

mode	F(Hz)	Nombre de $\lambda$ sur 1 périmètre	$\lambda$ (m)	v (m/s)
1	590	2	0,12	71
2	1628	3	0,08	130
3	2825	4	0,06	170

Après réflexion, voici comment répondre à notre première interrogation : les ondes qui s'établissent dans le périmètre du verre ne sont pas des ondes de compression, mais des ondes de déformation de la surface, plus communément appelées « ondes de flexion ». Quand nous avons eu conscience de cela, nous avons fait des recherches pour en savoir plus sur ces ondes, et nous avons trouvé un document qui traitait du rayonnement



acoustique d'une plaque infiniment grande. Et même si le béccher n'est pas une plaque infiniment grande, il a quelque chose d'infini car on peut peut-être supposer qu'une perturbation circulant le long du périmètre n'est pas arrêtée par la fin du verre.

Dans ce document nous avons alors pu lire que la célérité d'une onde de flexion d'une plaque infiniment grande d'épaisseur  $h$  dépend de la fréquence selon la relation :

$$c = \sqrt{2\pi} \times \sqrt{f} \left( \frac{Eh^2}{12\rho(1-\nu^2)} \right)^{1/4}$$

Où  $E$  est le module d'Young du matériau,  $\rho$  sa masse volumique, et  $\nu$  son coefficient de poisson. Dans le cas du verre,  $E = 65 \text{ GPa}$ ,  $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$  et  $\nu = 0,25$

De rapides applications numériques donnent alors, avec  $h = 2 \text{ mm}$  :

$c = 107 \text{ m/s}$ pour une fréquence de 600 Hz
$c = 174 \text{ m/s}$ pour une fréquence de 1800 Hz
$c = 232 \text{ m/s}$ pour une fréquence de 2825 Hz

Les valeurs que nous mesurons expérimentalement sont donc du même ordre de grandeur que celle que l'on obtiendrait en considérant que le béccher se comporte comme une plaque de verre infiniment grande, du moins en ce qui concerne la célérité des ondes de flexion. Et finalement, le fait que la célérité de ces ondes dépendent de la fréquence témoigne des propriétés très dispersives du verre pour ce type d'onde, propriété que l'on ne voit pas dans le cadre de la corde de guitare.

Et compte tenu du caractère dispersif du verre pour les ondes de flexion, nous comprenons alors pourquoi nous n'avons pas trouvé de relation simple entre les différents modes propres de vibration du béccher contenant de l'eau dans le paragraphe I – 2). C'est justement dû au fait que la célérité dépend de la fréquence ! Tout s'éclaire :

Faisons un parallèle avec une corde de guitare de longueur  $L$ . Les longueurs d'onde des modes propres suivent la formule :  $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ . ( $2L$  représente la distance à parcourir par la perturbation pour revenir au point de départ).

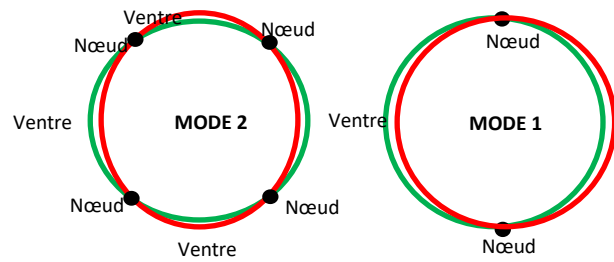
Dans le cas du béccher de rayon  $R$ , on aurait alors  $\lambda_n = \frac{2\pi R}{n}$ , a une grosse différence près : le mode  $n=1$  ne semble en réalité ne pas exister dans le cas de la vibration de la tasse, puisque la première longueur d'onde propre de vibration que nous avons mesurée est égale à  $\lambda = \frac{2\pi R}{2}$ .

Mode	$F(\text{Hz})$	$\lambda(\text{m})$	Vitesse (m/s) $v_n = f_n \times \lambda_n$
1			
2	$f_2 = 590$	$\lambda_2 = \frac{2\pi R}{2} = 0,12$	71
3	$f_3 = 1628$	$\lambda_3 = \frac{2\pi R}{3} = 0,08$	130
4	$f_4 = 2825$	$\lambda_4 = \frac{2\pi R}{4} = 0,06$	170

Mise à part cette différence, la corde, comme la tasse, vibrent selon des modes propres respectant la relation  $v_n = f_n \times \lambda_n$ . Mais dans le cas de la corde,  $v_n$  sera indépendante du mode, alors qu'elle le sera dans le cas du béccher. Le tableau ci-dessus témoigne à nouveau de cela, et prend en compte la remarque faite quant à la numérotation des modes de vibration.

**Remarque :**

Pourquoi le mode 1 n'existerait pas ? Nous avons tenté de répondre à cette question en faisant des schémas : le mode 2 présente 4 nœuds et 4 ventres. Le mode 1 devrait présenter 2 nœuds et 2 ventres. Les schémas ci-contre montrent alors le béccher vu de dessus non perturbé (en vert) et perturbé (en rouge) pour le mode 2 (schéma de gauche), et pour le mode 1 (schéma de droite).



Comme le périmètre du béccher doit garder une même valeur, les formes vertes et rouges doivent mesurer la même longueur. Donc concernant le mode 1, la vibration du béccher doit être telle que la partie gauche du verre doit se rapprocher du centre du cercle autant que la partie droite s'en éloigne, ce qui revient alors simplement à déplacer globalement le haut du béccher vers la droite (dans l'exemple du schéma), alors que la base du béccher ne bouge pas. On aurait alors dans le premier mode de vibration une forme très dissymétrique du béccher, qui n'aurait alors pas une grande stabilité. Nous pensons que c'est la raison pour laquelle ce premier mode n'est pas visible.

**2 ) Alors que nous apportent toutes ces nouvelles observations ?**

Tout d'abord, le fait d'avoir vu les vibrations du verre nous a permis de comprendre que les ondes de flexion s'établissent dans le verre. Les longueurs d'ondes de ces ondes sont bien fixées par la dimension du périmètre du verre et non par le liquide qu'il contient. Donc, pour revenir à l'action des bulles sur l'évolution de la fréquence, cette nouvelle étude de la vibration du béccher nous permet de confirmer, comme nous le présentions à la fin de la partie du II - , que cette évolution ne peut pas être due aux ondes qui sont transférées du verre au liquide. Les bulles ont une autre action qui n'ont rien à voir avec des ondes.

**Nous pensons maintenant que les bulles modifient les propriétés mécaniques du liquide, et que c'est cela qui est à l'origine de la variation de fréquence.**

D'autre part, puisque le béccher vibre latéralement, le verre du béccher pousse une certaine masse d'eau en vibrant. Donc l'analogie avec le dispositif « solide ressort », que nous avons présentée précédemment, nous semble vraiment intéressante pour expliquer la vibration du béccher contenant le liquide dans la partie décroissante des courbes de la figure 3. En effet, le béccher vibre avec une certaine élasticité, qui serait représentée par la constante de raideur  $k$  du ressort, et la masse de l'eau correspondrait à la masse accrochée à l'extrémité du ressort.

Conformément à la relation donnant la fréquence des oscillations d'un tel dispositif  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ , plus la masse est importante, et plus le verre du béccher oscillera avec une fréquence faible.

**Cette modélisation sur laquelle nous insistons est alors essentielle pour comprendre l'action des bulles sur l'évolution de la fréquence, comme nous l'expliquons dans le dénouement qui suit :**

### 3 ) Vibration du bécber en présence des bulles de gaz : dénouement.

Comme nous l'avons dit, nous sommes convaincus que les propriétés mécaniques du liquide sont modifiées par la présence des bulles. Quelle caractéristique mécanique du liquide est alors modifiée en présence de bulles ? Il est peu probable que ce soit la masse volumique : nous avons récupéré le gaz issu des bulles et le volume obtenu est pratiquement insignifiant par rapport au volume du liquide.

Alors, compte tenu de l'expression  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ , si la masse volumique et donc la masse ne varie pas, c'est que l'élasticité représentée par le coefficient  $k$  du système est modifiée.

Or l'élasticité du verre n'est pas modifiée par la présence de bulles. On en déduit que le coefficient  $k$  ne représente pas seulement l'élasticité du verre, mais l'élasticité de l'ensemble « verre + liquide ». Ainsi, dans cette façon de redéfinir les choses, on peut envisager le fait que la présence de bulles modifie l'élasticité du liquide, ce qui modifie le coefficient  $k$ .

**Et cela semble tout à fait possible, car le fait que l'eau contienne des bulles rend le liquide compressible, donc malléable plus facilement.** Comme  $k$  représente la force à appliquer à un ressort pour le comprimer ou l'étirer d'1m, on comprend alors que plus il y a de bulles, plus le milieu est compressible facilement (c'est-à-dire qu'à même valeur de force appliquée au système, la déformation du système sera d'autant plus grande en présence de bulles), et par conséquent  $k$  sera plus faible. Et plus  $k$  est faible, plus la fréquence est faible.

Pour conclure, la constante de raideur  $k$  de la tasse d'eau résulte à la fois de l'élasticité du verre, mais aussi de l'élasticité du liquide qu'il contient. Peut-on le prouver ?

### 3 ) Vibration du verre d'eau avec des bulles, avec un cylindre dedans :

Nous nous sommes dit que si on réduisait le volume disponible à l'eau à l'intérieur du bécber, cela réduirait le nombre de bulles présentes, sans modifier la concentration de ces bulles. Le volume de liquide étant alors plus faible, la compression maximale possible doit diminuer. On s'attend alors à ce que la variation de la fréquence soit plus faible au cours du temps.

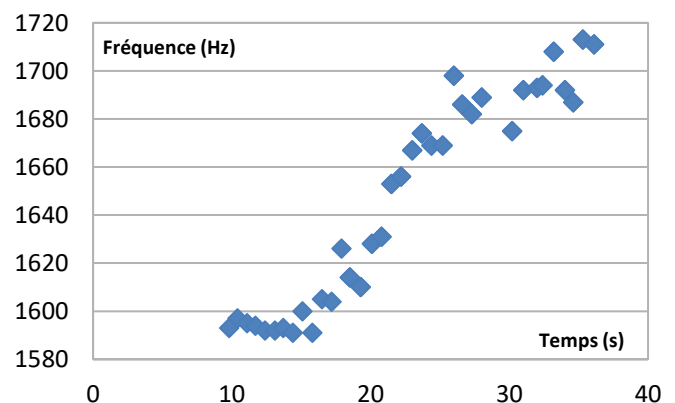
Vérifions cela expérimentalement :



Pour diminuer le volume disponible à l'eau dans le bécber, nous avons plongé un cylindre en verre, rempli d'eau, dans le bécber (figure 23), tout en le maintenant par un fil relié à une potence pour qu'il ne soit pas en contact avec le verre du bécber. Nous avons ensuite tapé sur le bécber et nous avons remarqué à nouveau une variation de fréquence. Par contre, cette variation de fréquence ne se fait que sur une centaine de Hertz (figure 24) au lieu des 600 Hz observés lors des autres expériences.

Figure 23 : Flacon cylindrique rempli d'eau et fermé par un bouchon, suspendu par une potence et plongeant dans un bécber rempli d'eau avec des bulles

Figure 24 : Evolution de la fréquence avec un tube cylindrique suspendu au milieu du bécber contenant de l'eau



Ces résultats semblent donc tout à fait cohérents avec nos interprétations précédentes : la compression de l'eau est possible, mais la variation de volume de cette compression est plus faible du fait du plus faible volume d'eau contenant les bulles.



Suite à des échanges avec des chercheurs du CINAM (Centre Interdisciplinaires de Nanosciences de Marseille), dont certains travaillent dans le domaine de la nanofluidique, nous envisageons également de mettre à l'épreuve notre dernière conclusion, qui aborde l'influence de l'élasticité du liquide contenu dans la tasse sur la fréquence de vibration propre de la tasse. L'idée serait de générer de façon contrôlée des bulles par électrolyse dans le bécher, et à les répartir différemment dans le bécher. Par exemple, si nous disposons 100 bulles selon une direction qui relie 2 ventres diamétralement opposés, puis 100 bulles selon une direction qui relie 2 nœuds diamétralement opposés, nous nous attendons à observer une fréquence propre de vibration différente du bécher. En effet, lorsque les bulles relient les deux ventres, la compressibilité du liquide selon cette direction devrait modifier la fréquence propre de vibration de la tasse, alors que si les bulles relient les deux nœuds, la compressibilité du liquide ne devrait pas avoir de conséquence sur la fréquence propre de vibration de la tasse puisqu'au niveau des nœuds, la tasse est immobile. Ces expériences restent à faire.

## IV – Conclusion

Le projet que nous avons mené nous a permis de comprendre l'influence de plusieurs paramètres sur la façon dont vibre une tasse d'eau et de comprendre l'origine de l'évolution de la fréquence que l'on entend lorsqu'en remuant la cuillère dans une tasse de lait chaud dans lequel on a ajouté du chocolat en poudre, la cuillère cogne contre la tasse.

Cette évolution du son est due à l'apparition de microbulles de gaz dans le liquide, qui semblent modifier l'élasticité du liquide, qui modifie l'élasticité du système « tasse + liquide », et par la suite, les fréquences propres de vibration du verre.

Ce qui nous a passionné est le fait d'avoir dû nous même chercher les réponses en menant des démarches et des expériences dont les interprétations étaient toujours des énigmes à résoudre.

Nous pensions d'autre part, au début de notre travail, que ce projet ne faisait que tenter de répondre à des questions sur des phénomènes observés tous les jours. Mais nous avons eu l'occasion de présenter notre projet à Saint-Etienne, et le laboratoire SAINBIOSE, qui travaille dans le domaine de la santé, l'ingénierie et la biologie nous a sollicité pour éventuellement mener un travail collaboratif, car il se pourrait que les résultats obtenus au cours de nos recherches, trouvent un intérêt particulier dans leurs études. Nous sommes très enthousiastes à l'idée de nous enrichir de ce partenariat ! Plusieurs pistes peuvent être envisagées, comme par exemple injecter des bulles dans l'écoulement d'un liquide pour modifier l'élasticité d'une membrane sur laquelle s'écoule le liquide. On peut également pourquoi pas contrôler la teneur en gaz d'un liquide en mesurant la fréquence de résonance du récipient qui le contient.

Ce qui s'avérait n'être qu'une simple question nous a donc non seulement passionné, et la fin de l'histoire n'est visiblement pas encore écrite. C'est alors avec beaucoup de plaisir que nous continuerons de faire cette physique, et pas seulement au petit déjeuner !

Merci à nos partenaires qui nous ont soutenu, ont collaboré et témoigné de l'intérêt à notre travail.

