



Sciences à l'École



LE CHANT DES BULLES



AUBERT Lucie
BARDET Clément
LAVIRON Arthur

Concours CGénial

SOMMAIRE

Introduction et Présentation	3
Partie 1 : La formation de la bulle	4
1. La formation d'une bulle et ses caractéristiques	4
A. Différencier bulle et goutte.	4
B. Formation de la bulle : Croissance d'une bulle à la sortie d'un tuyau, forme du pied de bulle et volume de la bulle.	5
2. Pourquoi une bulle fait du bruit	10
Partie 2 : Expériences	13
A. Protocole d'une expérience type	13
B. Expériences spécifiques	15
C. les résultats et leur exploitation	15
D. Discutons l'écart entre résultats théoriques et expérimentaux	19
Conclusion	21
Remerciements	22
Sitographie	23

INTRODUCTION ET PRÉSENTATION

Le projet <<Le Chant des Bulles>> prend sa source à la fin de notre année de première, lorsque Mme Alleg et Mr Mathiotte, professeurs encadrant du projet dans notre établissement, invitent les élèves intéressés à se présenter à l'étage de physique afin de nous faire connaître les détails du concours. Au moment de se regrouper pour échanger et chercher un potentiel sujet, nous nous sommes tous les trois: Lucie, Arthur et Clément; assez naturellement associés. En effet nous nous connaissions depuis la seconde ou la première par le biais de notre classe et du voyage de l'option que nous partageons. Cela a probablement participé au fait que la répartition du travail n'a pas été un problème et de manière générale d'ailleurs, nous nous sommes arrangés de sorte à ce que chacun puisse réaliser une part de tous les aspects de ce travail que vous découvrirez.

Une fois notre groupe constitué, la phase de recherche de sujet a été rebondissante. Nous avons commencé par des recherches sur les oscillateurs couplés et des manipulations associées mais cela n'a pas été concluant. Nous avons ensuite décidé de creuser le sujet du son des bulles dans l'eau pour aboutir à l'idée de créer de la musique grâce à des bulles. Lors de nos recherches, nous sommes tombés sur la thèse de Valentin LEROY du laboratoire MSC à l'Université Paris Cité, que nous avons contacté et qui a répondu à nos questions et nous a donné des idées notamment pour améliorer notre montage afin d'avoir un son plus propre.

Le son des bulles d'air dans l'eau est observable au quotidien notamment dans des cascades ou lorsqu'une goutte de pluie tombe sur une flaque. Dans l'océan, des bulles d'air se forment à la surface grâce aux vagues et dans les profondeurs grâce à une espèce de crevettes qui s'en sert pour étourdir ses proies.

Notre objectif est donc de comprendre pourquoi une bulle d'air dans l'eau crée un son, de déterminer quels paramètres entrent en jeu lors de la création du son et comment exploiter ces paramètres pour recréer une mélodie.

Dans un premier temps, nous allons étudier la formation des bulles d'air dans l'eau, les paramètres qui influent sur la taille des bulles et le bruit des bulles de manière théorique en exploitant les lois associées. Puis nous écouterons des bulles obtenues en laboratoire avec notre montage. Ce sera l'occasion de comparer les résultats de nos travaux à ceux prévus par la théorie en ce qui concerne le son d'une bulle. Le but final étant de réussir à constituer une mélodie à partir des sons de nos bulles.

PARTIE 1 : LA FORMATION DE LA BULLE

La formation d'une bulle et ses caractéristiques

Pour étudier le bruit créé par une bulle, nous allons devoir nous intéresser aux conditions de formation d'une bulle, ainsi qu'à ses différentes caractéristiques.

A. Différencier bulle et goutte.

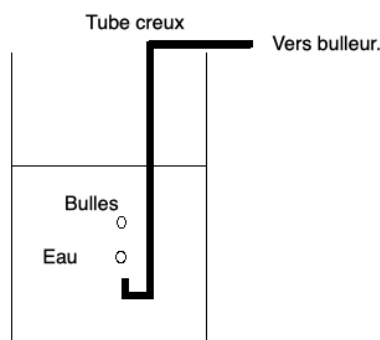
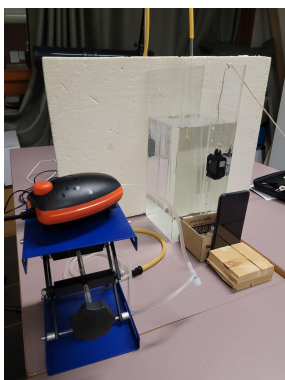


<https://jeunes.sfpnet.fr/2017/10/10/gouttes-bulles-de-savon-et-billes-de-gaz/>

Tout d'abord, distinguons bulle et goutte. On appelle bulle du gaz dans un liquide et goutte du liquide dans un gaz. La formation d'une bulle dans un liquide nécessite de l'énergie mais le but est d'en consommer un minimum. On cherche donc une forme qui possède la plus petite surface pour le plus grand volume. Le but est de rendre l'interface de contact entre le gaz et le liquide la plus petite possible, pour un volume le plus grand possible : c'est une sphère.

La forme normale d'une bulle d'air dans l'eau est donc en première approximation une sphère.

Pour former des bulles, nous avons décidé d'utiliser un tube immergé dans l'eau alimenté par un bulleur d'aquarium (le protocole complet est décrit plus loin dans le rapport).

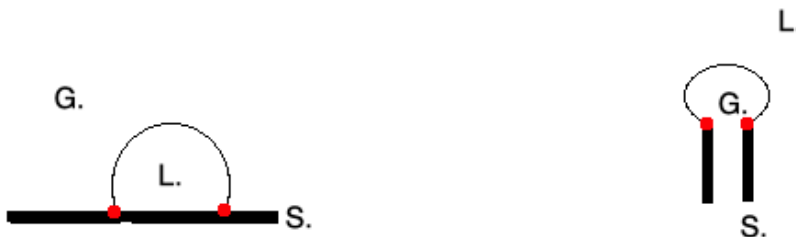


B. Formation de la bulle : Croissance d'une bulle à la sortie d'un tuyau, forme du pied de bulle et volume de la bulle.

• **Mouillage et ligne triple :**

Lors de la formation d'une bulle, les phases liquides, solides et gazeuses sont en contact, respectivement liées à l'eau, à l'orifice du tuyau (qui prend la forme d'un tube) et à l'air dans notre cas. La zone d'intersection de ces trois phases s'appelle la ligne de contact ou ligne triple. Il s'agit d'une interface solide-liquide-gaz. Elle est aussi observable lorsqu'on étudie une goutte de liquide sur une plaque solide.

• **Ligne triple : interface L G S**



Goutte posée sur une plaque

Bulle de gaz à la sortie d'un tube cylindrique

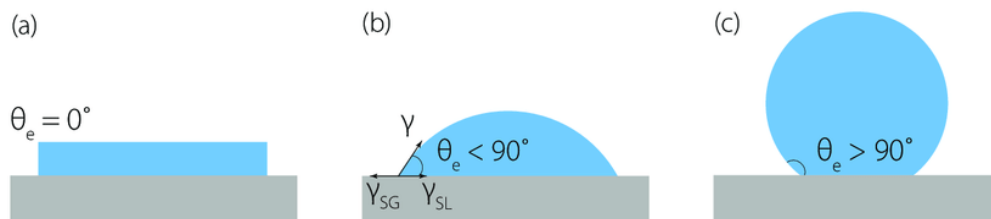
Pour comprendre ce qui se passe à la sortie du tuyau lors de la formation de la bulle, nous allons commencer par comprendre le cas d'une goutte de liquide déposée sur un solide. Lorsque l'on étudie une goutte déposée sur une surface solide, elle peut prendre deux formes :

- Soit le liquide s'étale totalement (on parlera de mouillage total)
- Soit le liquide prend une forme de sphère (on parlera de mouillage partiel).

L'étude de l'étalement de cette goutte se nomme le mouillage.

Il existe deux points (en rouge sur le schéma) où il est possible d'observer l'angle de contact dans le cas d'une goutte posée sur une surface solide. Les angles en question n'existent qu'en deux points sur un plan en coupe car ils ont pour particularité d'être en contact avec les trois phases (liquide, solide et gazeuse). L'angle de contact est l'angle formé par les plans tangents aux phases solide et gazeuse. Il est mesuré à l'intérieur de la bulle par convention. Il varie selon le gaz, le liquide et le solide étudiés.

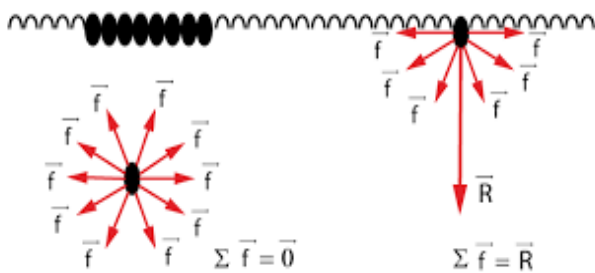
Il permet de déterminer la mouillabilité d'un solide sur une surface donnée. Si l'angle à l'équilibre Θ_E est supérieur à 90° , le liquide est non mouillant, s'il est inférieur à 90° , on parlera de mouillage partiel et s'il est nul on parlera de mouillage total.



Sur ce schéma, on observe en (a) un mouillage total, en (b) un mouillage partiel et en (c) un mouillage nul.

Entre chaque phase, des forces de tension superficielle agissent et la loi de Young-Dupré permet de calculer l'angle de contact.

La tension de surface (ou force de tension superficielle) est la force qui va expliquer le fait qu'une goutte va chercher à avoir un minimum de surface de contact avec le solide et l'air. Toutes les molécules présentes dans un liquide vont interagir entre elles. De plus, elles vont chercher à interagir au maximum. Cependant, les molécules présentes en surface (en contact avec le liquide ou en contact avec l'air) interagissent moins que les molécules entièrement entourées de liquide. En effet, ces dernières peuvent interagir avec toutes les molécules les entourant alors qu'une molécule présente en surface interagit en partie avec le gaz ou le solide.



La tension de surface va empêcher les molécules d'eau de remonter à la surface pour maximiser les interactions avec le reste de l'eau.

Dans l'eau, les forces d'interaction s'annulent car elles sont toutes symétriques les unes par rapport aux autres. Cependant, lorsqu'une molécule se trouve en surface, elle est attirée

vers l'intérieur de la sphère car les forces s'exerçant sur elle ne sont plus symétriques. Les molécules en surface ne sont donc pas à l'équilibre alors que les molécules entièrement entourées d'eau le sont.

Afin de limiter le nombre de molécules soumises à cette force, l'eau va minimiser sa surface de contact avec l'air et le solide et adopter une forme sphérique. La tension de surface est une force par unité de longueur, tangentielle à la surface et mesurée en $N.m^{-1}$.

Cette force est aussi le produit du coefficient de tension superficielle et de la longueur de l'interface.

- **Forces s'appliquant à la bulle :**

C'est l'équilibre de ces forces qui permet d'obtenir la loi de Young-Dupré :

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cos(\Theta_E)$$

Où γ_{sg} correspond à la tension de surface solide-gaz, γ_{sl} correspond à la tension de surface solide-liquide et γ_{lg} correspond à la tension de surface liquide-gaz.

La loi de Young-Dupré implique un angle de contact constant. Cependant, celui-ci varie selon les caractéristiques de la surface solide (sa rugosité, son irrégularité de surface...) En prenant en compte ces caractéristiques, l'angle de contact ne peut pas être unique, il est compris entre deux valeurs limites et si celles-ci sont dépassées, la ligne de contact se mettra en mouvement ce qui peut faire rouler la goutte ou l'étaler sur la surface solide.

Pour revenir au cas de la bulle qui nous intéresse : Nous considérerons que les bulles évoluent dans un état quasi-statique et donc que l'angle de contact est proche de celui donné par la loi de Young-Dupré. Cet angle de contact fait varier la façon dont le pied de bulle s'accroche au tuyau avant que la bulle ne s'en détache. En effet, selon la nature du solide, du liquide ou du gaz les tensions de surface entre les différentes phases sont modifiées. Dans notre cas, le gaz étant uniquement l'air, il n'aura pas d'influence sur l'angle de contact.

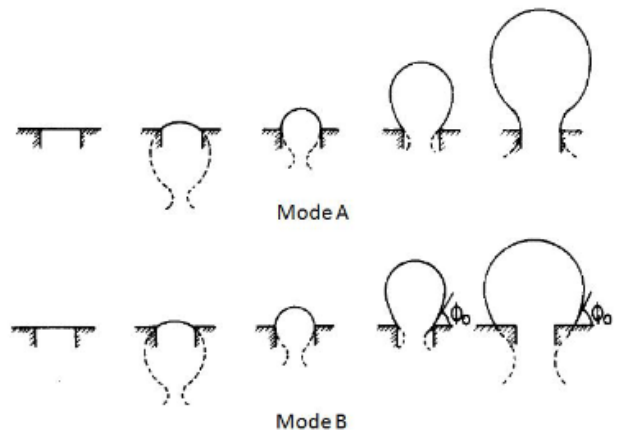
- **Comment la bulle croît-elle avant sa sortie du tube ?**

Il existe deux modes de croissance de bulle à la sortie d'un tuyau lorsque celle-ci croît lentement : (donnés par Chester)

Le mode A : Le rayon du pied de bulle correspond au rayon du tuyau.

Le mode B : Le rayon du pied de bulle dépasse celui du tuyau et s'étend au-delà.

Ces modes étant liés aux tensions de surfaces entre les différentes interfaces, dans notre cas il sera défini par l'affinité entre notre tube et notre liquide. Nous supposons que lorsque le tube est hydrophile, nous observerons le mode A mais que lorsque le tube est hydrophobe, nous observerons le mode B car de l'air s'insère entre le tube et le liquide.



Les différents modes de croissance de bulle selon Chesters

Selon Chester, le volume de la bulle au moment où elle se détache du tuyau dépend principalement de l'angle de contact.

- **Volume lors du détachement de la bulle :**

L'expression du volume de la bulle diffère selon son mode de croissance.

Trois forces s'appliquent à une bulle en croissance quasi-statique dans un liquide au repos lorsque celle-ci est accrochée au tube. Ces trois forces sont verticales.

Forces	Capillaire	Poussée d'Archimède	Poids
Valeur et sens	Dirigée vers le haut $F_c = 2\pi r_{tube} \gamma_{liq} \sin \Theta_E$	Dirigée vers le haut $P_{Archi} = V_{bulle} \rho_{liq} g$	Dirigée vers le bas $P = \rho_{gaz} V_{bulle} g$
Point d'application	Surface de contact entre le tube et la bulle	Centre de gravité	Centre de gravité
Influence sur la bulle	Accroche le pied de bulle au tube	Fait remonter la bulle à la surface	Maintient la bulle sur le tuyau

Grâce au bilan de ces trois forces et avec un angle de contact de 90° , on peut obtenir le volume maximal de la bulle juste avant le détachement. Ce moment est appelé l'équilibre.

On a donc $\vec{P} + \vec{F}_c + P_{Archi} = \vec{0}$

d'où $2\pi r_{tube} \gamma_{liq} + \rho_{gaz} V_{bulle} g = V_{bulle} \rho_{liq} g$

soit : $V_{max} = \frac{2\pi r_{tube} \gamma_{liq}}{g(\rho_{liq} - \rho_{gaz})}$

Dans notre cas, le liquide et le gaz étant respectivement l'eau et l'air, on peut négliger la masse volumique de ce dernier car elle est minime comparée à celle de l'eau. On obtient

$$V_{max} = \frac{2\pi r_{tube} \gamma_{liq}}{g\rho_{liq}}$$

alors une formule simplifiée :

$$r = \sqrt[3]{\frac{3r_{tube} \gamma_{liq}}{2g\rho_{liq}}} \quad \text{Avec } r \text{ le rayon de la bulle.}$$

Si le mode de croissance de la bulle est le mode B, les équations qui régissent la relation entre le liquide et le tube deviennent très complexes. Nous n'avons pas poussé plus loin cette partie, et resterons dans le cas simplifié précédent.

Nous pouvons comparer nos rayons théoriques et expérimentaux.

Tuyau	Rayon maximal théorique	Rayon expérimental moyen	Rayon du tuyau	Z-score
non gradué (20°C)	2,9 mm	2,5 mm	2,2 mm	2
non gradué (40°C)	2,8 mm	2,7 mm	2,2 mm	0,5
gradué (20°C)	2,4 mm	3,5 mm	1,3 mm	5,5

Le rayon expérimental est la moyenne du rayon d'un grand nombre de bulles. (voir tableau en annexe) Le rayon maximal théorique est quant à lui calculé grâce à la formule du volume maximal donnée précédemment.

A 20°C, avec le premier tube, on observe une variation de 0,4mm. Nous obtenons alors un Z-score de 2. Ce n'est pas parfait mais c'est une valeur acceptable.

Les deux premières lignes du tableau correspondent au même tube (même rayon) mais à des températures différentes. La température va modifier la valeur de la tension de surface de l'eau (69,5mN/M à 40°C), ainsi que sa masse volumique (992 kg/m³). Nous observons expérimentalement une diminution du rayon de la bulle, cohérent avec la théorie, en effet, on obtient un Z-score de 0,5 ce qui veut dire que notre écart entre bulle théorique et bulle expérimentale est très satisfaisant.

Pour ce qui est du dernier tube, l'écart entre la valeur théorique et la valeur expérimentale devient bien plus important. On fabrique des bulles avec un rayon environ 1,5 plus important que ce que prévoit la théorie. Mais dans cette expérience, le tube est très épais. Nous supposons que la force capillaire qui s'exerce alors devient plus grande et que notre pied de bulle s'accroche au bord du tube plutôt que de rester à l'intérieur de celui-ci ce qui pourrait alors expliquer pourquoi la bulle est beaucoup plus grande que ce que prévoit la théorie. Nous avons effectivement décidé de garder la formule du rayon utilisée dans une croissance de mode A étant donné que celle du mode B est trop complexe. Pour valider cette hypothèse, nous aurions dû utiliser un tube en verre possédant le même rayon et une

épaisseur semblable à celle des autres tuyaux. Nous obtenons aussi un Z-score de 5,5, ce qui nous pousse à penser que nous n'avons pas utilisé la bonne formule.

Nous remarquons cependant que le rayon expérimental est inférieur au rayon théorique dans les deux premiers cas. Nous supposons donc que notre débit était légèrement trop important ce qui pouvait empêcher les bulles de se former entièrement. C'est pourquoi nous avons décidé de mesurer le rayon de bulles en croissances lentes, avec un débit très faible. Nous observons ici une variation de 0,3 mm entre rayon expérimental et rayon théorique. Le Z-score a lui aussi diminué. Ces mesures nous permettent donc de valider notre hypothèse : la baisse du débit permet d'obtenir des bulles plus conformes à ce que prévoit la théorie, pour en être sûrs, nous aurions pu prendre des mesures avec un débit encore plus faible mais nous nous en sommes tenus à ce résultat pour garder un nombre de bulles exploitables.

tube non gradué à 20°C	Rayon maximal théorique	Rayon expérimental moyen	Rayon du tuyau	Z-score
Bulle à croissance très lente	2,9 mm	2,6 mm	2,2 mm	1,5

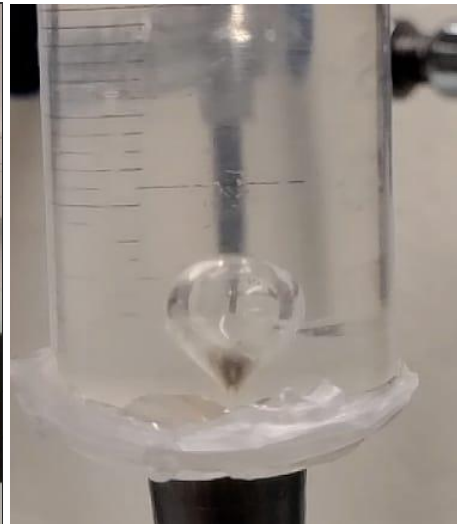


Clichés pris lors de la formation d'une unique bulle

Dans ce cas de figure, il semble bien que le pied de bulle épouse l'intérieur du tube, ce qui correspond au modèle de croissance A et à la formule utilisée.

Nous pouvons observer d'autres exemples de formation de bulle avec notre maquette de la création d'une bulle d'air dans la glycérine et dans l'éthanol .

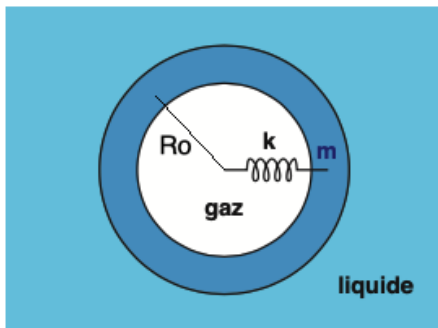
La taille de la bulle dépend du type de tuyau (hydrophile ou hydrophobe), de la nature du liquide (masse volumique et tension superficielle) et du diamètre de sortie du tuyau.



2. Pourquoi une bulle fait du bruit

Nous avons essayé de comprendre les différentes caractéristiques de la formation d'une bulle, qu'en est-il du son désormais ?

Lorsqu'une bulle se forme sous la surface de l'eau, elle produit un son. C'est dans son article philosophique intitulé "On Musical Air-Bubble and the Sounds of Running Water" datant de 1933 que Marcel Minnaert répond à la question de la dynamique de la bulle et du son qu'elles produisent.



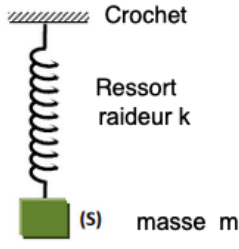
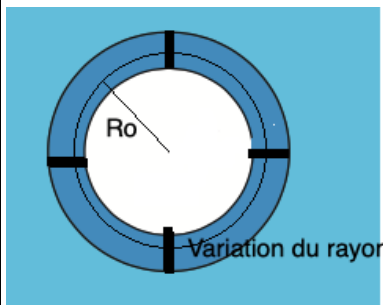
– La bulle comme oscillateur harmonique

Une bulle sphérique de rayon moyen R_0 , vibre librement lorsqu'elle se décroche. Le grossissement de la bulle est limité par l'inertie du liquide qu'elle doit mettre en mouvement pour déplacer sa paroi. Son rétrécissement est quant à lui limité par la compressibilité du gaz contenu dans la bulle

Lorsqu'elle est excitée, c'est-à-dire à partir du moment où elle se détache de l'embout par lequel elle s'est formée, une bulle dans l'eau est capable

d'osciller selon une infinité de possibilités propres à elle-même.

Par analogie, on peut relier cette information au classique système masse-ressort : une masse m (en kg) suspendue à un ressort de raideur k (en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$) écartée de sa position d'équilibre.

	
<p>Ce type de système possède une fréquence d'oscillation propre à lui même dont la formule est :</p> $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$	<p>On cherche par analogie les facteurs qui dans la bulle correspondent à la masse et à la raideur du ressort</p>

Lors de la vibration, le rayon de la bulle varie autour de son rayon moyen R_0 . Dans l'optique de se raccrocher à notre analogie, on considère que la masse d'eau mise en mouvement correspond à la masse du système.

Il nous est possible d'approximer l'ordre de grandeur de la masse d'une bulle sphérique de rayon R_0 avec ρ la masse volumique de l'eau (en kg/m^3) tel que : m de l'ordre de $\rho \times R_0^3$

Lorsque la bulle est en vibration, le gaz est dilaté et comprimé de manière alternative. La raideur du ressort sera comparée à la capacité du gaz à se comprimer. Suite à ces changements de volume, sa pression varie. Le gaz (ici l'air) joue le rôle du ressort dans notre système.

Nous pouvons nous baser sur une équation aux dimensions pour trouver l'analogie entre la raideur du ressort et la pression de la bulle :

La raideur s'exprime en N/m

La pression est en Pa , c'est à dire en N/m^2 (pour rappel : Pression = Force / Surface)

Le produit d'une pression et d'une longueur a donc la même dimension que la raideur. La longueur caractéristique de la bulle est son rayon moyen, nous avons donc une raideur de l'ordre de grandeur de $P \times R_0$

En appliquant alors la formule qui donne le fréquence propre de vibration du système masse-ressort, on a :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{P_0}{\rho R_0^2}}$$

Remarque : Cette analogie nous a été suggérée par la conférence expérimentale de l'ESPCI <https://www.youtube.com/watch?v=PEpVko08GICA>

Ainsi, pour une bulle de rayon de l'ordre du mm , avec une pression de l'ordre de la pression atmosphérique, on trouve comme fréquence :

pour 1mm , $f = 15\text{kHz}$ pour 3mm , $f = 5\text{kHz}$ pour 8mm , $f = 2\text{kHz}$

Cela correspond bien au domaine de l'audible.

Notre analogie nous a donc aiguillée vers une valeur approchée de la fréquence de vibration de la bulle, et donc la fréquence du son émis.

Les travaux de Minnaert, puis d'autres scientifiques nous ont permis d'obtenir une expression de la fréquence propre d'une bulle d'air dans l'eau plus complète;

La fréquence propre de vibration d'une bulle d'air dans l'eau se nomme fréquence de Minnaert:

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_e}}$$

Avec R_0 le rayon à l'équilibre (en m), ρ_e la masse volumique de l'eau et γ la capacité thermique du gaz (soit la quantité de chaleur nécessaire pour modifier la température d'une quantité donnée de matière de 1°C, sans unité), ici l'air.

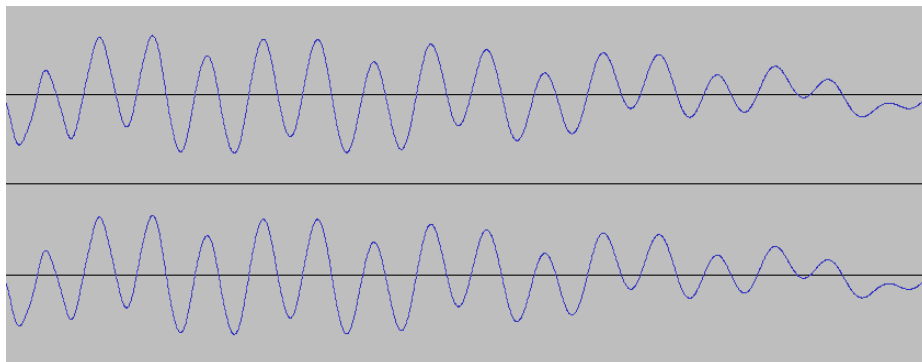
Cette formule est donnée pour de "grandes" bulles (un rayon supérieur à 1µm) ce qui est confirmé par nos expériences, et qui effectuent des pulsations adiabatiques (aucun transfert de chaleur entre le milieu et le système n'est observé).

Dans le cas de bulles plus petites, les pulsations sont isothermes. Ainsi l'équation de la fréquence propre de ces bulles avec σ la tension de surface et une viscosité du milieu négligeable est :

$$f = \frac{1}{2\pi R_0} \sqrt{\frac{3\gamma P_0}{\rho_e} + \frac{4\sigma}{\rho_e R_0}}$$

Nous ne ferons que mentionner cette formule car comme dit plus haut, les bulles de nos expériences sont trop grandes pour être considérées comme de "petites bulles".

Le signal acoustique d'une bulle dans l'eau a pour particularité d'être avec une base sinusoïdale très amortie. L'énergie qui engendre le mouvement se dissipe au cours du temps.



Quand nous mesurons la période de ce signal (la méthode est décrite plus loin) nous en déduisons la fréquence propre qui est de 4.10^2 Hz pour ici, dans le domaine de l'audible.

Maintenant, il nous reste à écouter des bulles !

PARTIE 2 : EXPÉRIENCES

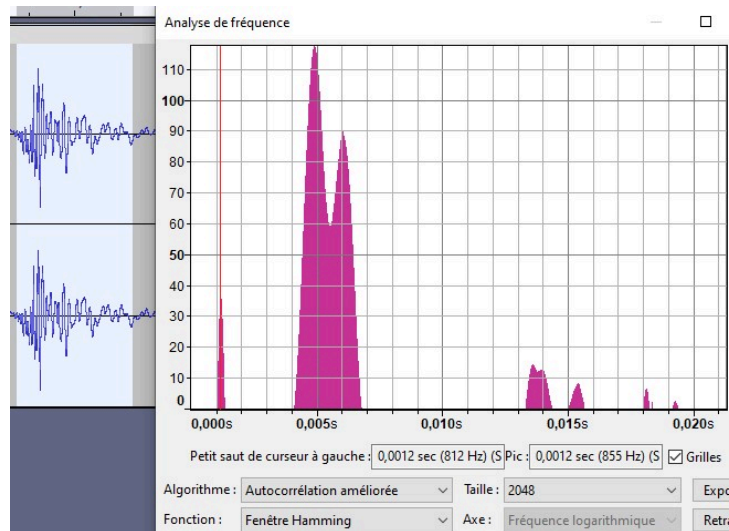
A- Protocole d'une expérience type

- Remplir d'eau douce une cuve rectangulaire à base carrée d'une contenance de 6L - Placer une plaque blanche à l'arrière de la cuve
- Immerger à 12,0 cm au dessus du fond de la cuve la sortie d'un tuyau soit 15,7 cm de la surface, dont les 2 bouts sont orientés vers le haut en ayant placé un étalon sur ce tuyau au préalable (exemple : 2,0 cm entre deux marques)
- Raccorder l'entrée du tuyau à un bulleur grâce à un tuyau souple
- Alimenter le bulleur en électricité et ajuster son débit grâce à la molette présente sur l'appareil afin d'obtenir un rythme de bulles assez lent
- Tenir le bulleur pour ne pas que ses vibrations produisent un son parasite
- Rattacher une GoPro munie d'une coque à un fil et lestée d'un objet lourd
- Lancer l'enregistrement puis immerger la GoPro de sorte à ce que son microphone soit le plus proche possible de la sortie du tuyau
- Placer un smartphone à une distance d'environ 4 à 9 cm de la cuve de sorte à ce que sa caméra soit face à la sortie du tuyau et le plus parallèle possible à la face de la cuve concernée
- Prendre une vidéo au ralenti (Android) en effectuant la mise au point et en utilisant un CLAP pour signaler le début de la série(Exemple d'un << Top !>> accompagné d'un geste de la main qui passe derrière le téléphone (on reconnaît le signe grâce au reflet dans la cuve et la mise au point n'est pas perturbée)
- Couper les 2 enregistrements lorsque l'expérience est terminée

Exploitation des enregistrements

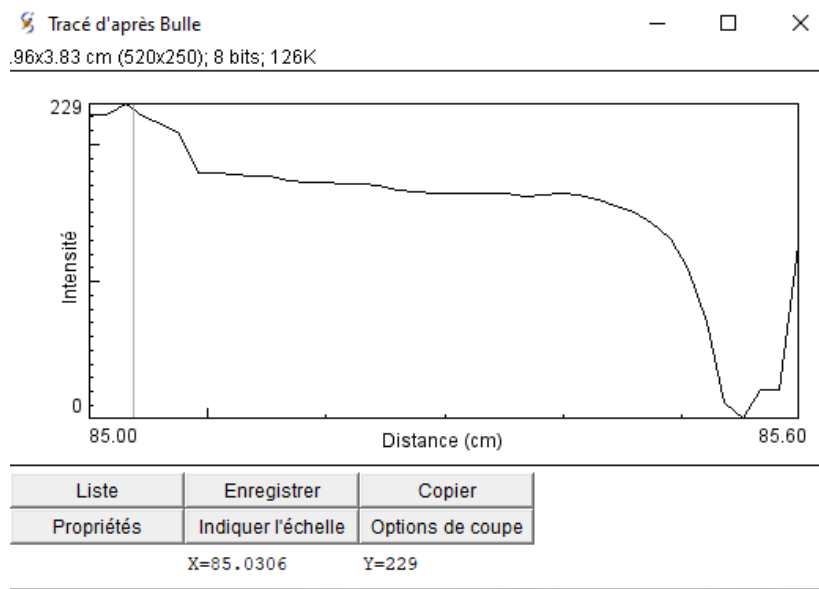
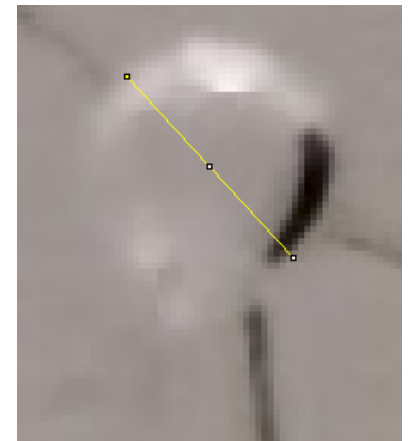
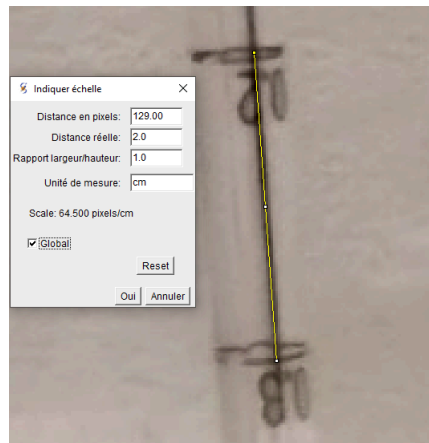
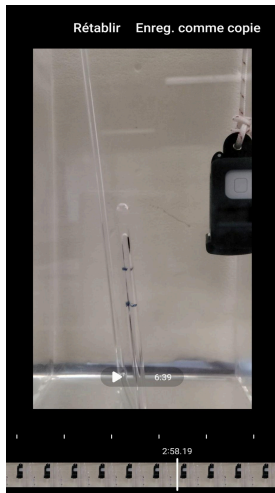
Audio

- Insérer la carte SD de la GoPro dans un ordinateur et ouvrir la vidéo dans le logiciel Shotcut
- Conserver seulement l'audio de la vidéo
- Exporter en format mp3 le fichier audio
- Ouvrir le fichier mp3 dans le logiciel Audacity
- Repérer le signal sonore indiquant le début des relevés (clap)
- Sélectionner à partir de ce signal une zone comportant le son d'une bulle pour chaque bulle
- Aller dans Analyser-->Tracer le spectre pour chaque bulle après avoir sélectionné la zone où le son est présent avec les paramètres "Fenêtres Hamming" et "Autocorrélation avancée"
- Relever la fréquence du pic le plus à gauche et consigner cette fréquence dans un fichier tableur pour chaque bulle



Vidéo

- (Sur Android) Sélectionner la vidéo dans Galerie puis sélectionner Ouvrir dans Lecteur Vidéo--> Éditeur
- Augmenter au maximum le nombre d'images disponibles lorsqu' on navigue parmi les différentes images qui composent la vidéo
- Repérer le signal de l'expérience
- Prendre en capture d'écran chaque bulle à partir de ce signal en se rapprochant le plus possible du moment où la bulle se détache du tuyau et est sphérique
- Transférer ces images sur un ordinateur et ouvrir chaque image dans le logiciel SalsaJ
- Sélectionner grâce à un trait l'étalon placé sur le tuyau
- Aller dans les paramètres d'échelle et indiquer la taille réelle en cochant la case global pour appliquer l'échelle à toutes directions
- Sélectionner le diamètre de la bulle puis aller dans Analyse-->Coupe
- Calculer la différence entre la valeur de x à droite de la coupe par la valeur de x à gauche de la coupe
- Répéter pour chaque bulle et consigner la taille dans le fichier tableur



B- Expériences spécifiques :

Tuyaux de diamètres différents :

- Reproduire l'expérience avec un second tuyau dont le diamètre n'est pas le même que le tuyau dans la première manipulation (en pensant à placer l'étalon sur le tuyau pour l'échelle)

Tuyau de matière différente (dans notre cas, du plastique) :

- Reproduire l'expérience avec un tuyau en plastique, ou dans une matière différente du tuyau utilisé dans la première manipulation (en pensant à placer l'étalon sur le tuyau pour l'échelle)

Incertitude sur le diamètre de la bulle sur Salsaj : Plus ou moins 0,3 mm

C- les résultats et leur exploitation:

Voici nos conditions opératoires : - Quantité d'eau dans la cuve: environ 6L

- Hauteur de formation de la bulle: 12,0 cm du fond
- Masse volumique de l'eau: 988 g/L

tuyaux	fréquence moyenne du son en Hz (notée f)	rayon moyen de la bulle en mm (notée R)	nombre de bulles analysées	Moyenne des moyennes des produits f x R (en m/s)	Conditions opératoires
pas gradué	1102	3.3	71	3.6	rayon du tuyau: 2,2 mm température: 22.3°C milieu: eau
gradué	835,6	3.5	178	2.9	rayon: 1,3 mm température: 21.9°C milieu: eau
plastique	1176	2.6	10	3.1	rayon: 2,0 mm température: 22.1°C milieu: eau
embout vert	1243	2,8	18	3,5	rayon: 2,8 mm température: 21.8°C milieu: eau

Les mesures sur le tuyau en plastique et sur le tuyau nommé "embout vert" sont bien moins nombreuses que les autres pour deux raisons. Tout d'abord, le but était uniquement de montrer que les paramètres étudiés faisaient bien varier les mesures. Ensuite, les mesures concernant ces deux tuyaux étaient fastidieuses, nous les avons réalisées après les autres et nous nous sommes aperçus qu'elles étaient brouillées et faute de temps nous n'avons pas pu faire autant de mesures que pour les autres paramètres.

Nous traçons désormais un graphe de f en fonction de 1/R modélisée en fonction linéaire avec les 4 tubes suivants.

fréquence en Hz	rayon moyen R de la bulle en m	1/R en m ⁻¹
835.6 (gradué)	3.50×10^{-3}	286
1102 (pas gradué)	3.30×10^{-3}	303
1176 (plastique)	2.60×10^{-3}	385
1243 (embout vert)	2.80×10^{-3}	357

Un peu de métrologie : Nous avons réalisé plusieurs séries de mesures de fréquence et de rayon dans les mêmes conditions et nous en déduisons une moyenne liée à un écart-type (σ) et à son incertitude élargie de type A : U(m).

$$U(m) = \frac{2\sigma}{\sqrt{n}}$$

Soit, pour un indice de confiance de 95 % (k=2),

A cela, nous associons une incertitude de type B que nous approximations à partir de nos appareils et logiciels de mesure.

Pour la fréquence(en Hz)

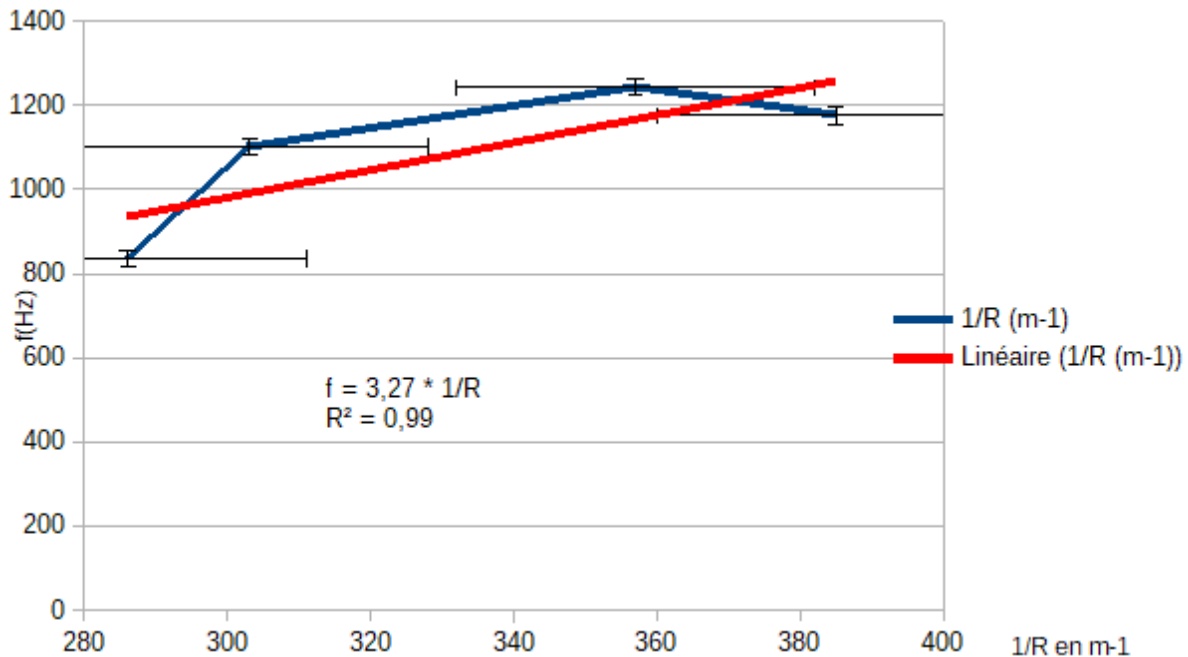
tuyaux	moyenne (Hz)	écart-type le plus grand	Nombre de mesures	Incertitude élargie de type A	Incertitude de type B	Incertitude globale $\sqrt{(U_m^2 + U_B^2)}$
tuyau non gradué (NG)	1102	33,3	71	8	10	2.10 ¹
tuyau gradué	835,6	44,5	144	8	10	2.10 ¹
Tuyau plastique	1176	20,9	52	6	10	2.10 ¹
tuyau embout vert	1243	22,7	18	2.10 ¹	10	3.10 ¹
tuyau (NG) eau chaude	1065	6,28	80	2	10	2.10 ¹
tuyau (NG) eau salée	856	25,1	25	2.10 ¹	10	3.10 ¹

Pour le rayon (en m)

tuyaux	moyenne	écart-type le plus grand	Nombre de mesures	Incertitude de type A	Incertitude de type B	Incertitude globale U(R) $\sqrt{(U_m^2 + U_B^2)}$	U(1/R) en m ⁻¹
tuyau non gradué(NG)	0,0033	0,00058	71	0,0002	0.0002	0,0002	3.10 ¹
tuyau gradué	0,0035	0,00017	144	0,00003	0.0002	0,0003	3.10 ¹
Tuyau plastique	0,0026	0,00094	56	0,0003	0.0002	0,0004	6.10 ¹
tuyau embout vert	0,0028	0,00063	18	0,0003	0.0002	0,0004	6.10 ¹
tuyau (NG) eau chaude	0,0026	0,00035	80	0,00008	0.0002	0,0003	5.10 ¹
tuyau (NG) eau salée	0,0034	0,00021	25	0,0009	0.0002	0,0003	3.10 ¹

remarque : $U(1/R) / (1/R) = U(R)/R$

Voici le graphique de la fréquence en fonction de 1/R avec ses barres d'incertitudes :



Analyse sur l'incertitude globale sur la fréquence ; nous pouvons remarquer que lorsque beaucoup de mesures ont été faites, l'incertitude de type A (incertitude statistique) est très faible et que l'incertitude de type B (incertitude de répétabilité) prend le pas sur elle. Nous voyons donc que nous ne pouvons pas ignorer l'incertitude de type B à cause du manque de fiabilité de nos appareils de mesures mais que nous pouvons diminuer l'incertitude globale en faisant un très grand nombre de mesures pour rendre l'incertitude de type A négligeable.

Suite à l'étude de 390 bulles et fréquences, nous pouvons conclure que la fréquence est inversement proportionnelle au rayon de la bulle.

Graphiquement on trouve une constante de 3,3. Comparons-la avec la valeur théorique de la formule de Minnaert dans les conditions expérimentales :

en prenant $\gamma = 1,4$ (gaz diatomique), $P_0 = 1.0 \cdot 10^5$ Pa et $\rho_e = 1.0 \cdot 10^3$ kg/m^3

D'après la loi de Minnaert, le coefficient directeur de la droite f en fonction de $1/R$ est :

$$\frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{3 \times \gamma \times P_0}{\rho}} = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{3 \times 1,4 \times 1,0 \times 10^5}{1,0 \times 10^3}} = 3,3$$

Nous retrouvons bien cette valeur mais la modélisation linéaire (où nous avons forcé l'origine) montre bien que nos mesures possèdent certaines incertitudes représentées par des barres. Nous pouvons nous interroger sur les facteurs qui expliquent ces incertitudes.

D- Discutons l'écart entre résultats théoriques et expérimentaux

Premièrement, même si chacun de nos points correspond à un très grand nombre de bulles et à une moyenne significative, nous avons conscience que seules trois valeurs différentes de fréquences limitent la qualité de notre modélisation. Le quatrième tuyau que nous avons utilisé n'a pas permis de mesures utilisables.

Mais nous avons fait le choix de beaucoup nous appliquer sur un nombre limité de tuyaux, et de tester ensuite d'autres paramètres cachés dans la formule de Minnaert.

Dans la formule de Minnaert, la pression du gaz dans la bulle apparaît, et est certainement sujet à discussion.

Pour utiliser la pression de l'air à l'intérieur de la bulle, nous pouvons analyser plusieurs paramètres et voir leur pertinence dans la formule de Minnaert :

- **La pression à l'intérieur de la bulle et la force de tension superficielle :**

La tension superficielle est à l'origine de la surpression à l'intérieur des bulles. Les forces de tension superficielle ont tendance à faire contracter la bulle, par conséquent la pression à l'intérieur de la bulle P_{int} va être supérieure à la pression extérieure et elle est donnée par la relation de Laplace.

Loi de Laplace :

$$P_{int} - P_{ext} = \gamma_{liq} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

où R_1 et R_2 sont les rayons de courbures principaux de la bulle.

Elle correspond à un équilibre mécanique entre l'intérieur et l'extérieur de la bulle.

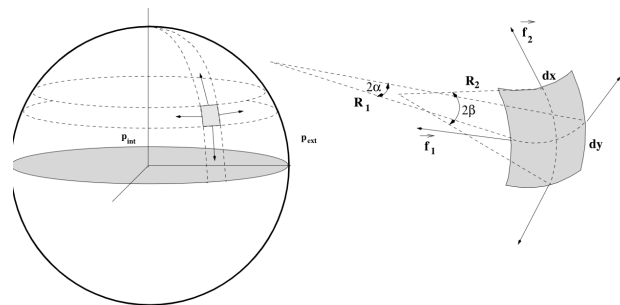
Avec R_1 et R_2 confondu, pour une bulle sphérique, on obtient :

$$P_{int} - P_{ext} = \frac{2\gamma_{liq}}{R}$$

Pour une bulle de 3,0 mm de rayon, dans l'eau à 20°C ($\gamma_{eau} = 72,8 \cdot 10^{-3} \text{N/m}$), on trouve :

$$P_{int} = P_{ext} + 50 \text{Pa}$$

La prise en compte de la surpression à l'intérieur de la bulle d'environ 50 Pa est négligeable à notre niveau (par rapport à une pression atmosphérique moyenne de $1,0 \cdot 10^5 \text{Pa}$).



- **La pression à l'intérieur de la bulle et la profondeur à laquelle elle se forme :**

Sous l'eau, à une profondeur h , la pression est la somme de la pression en surface et de la pression hydrostatique:

$$P = P_{atm} + \rho_{liq}gh$$

Dans notre cas, pour une pression atmosphérique moyenne de 1013 hPa en surface (avec une variation de plus ou moins 30 hPa en fonction de la météo), avec une masse volumique d'eau égale à 1000 kg/m³ et pour une profondeur de 12cm dans notre montage, on trouve :

$$P = P_{atm} + 1000 \times 9,8 \times 0,12$$

$$\text{Soit } P = P_{atm} + 1176 \text{ Pa} \quad \text{soit } P = P_{atm} + 1,1 \cdot 10^3 \text{ Pa}$$

La prise en compte de la profondeur d'immersion du tube lors de la formation de la bulle représente donc une variation d'environ 1% sur la valeur de la pression atmosphérique. Celle-ci reste bien inférieure aux variations météorologiques (facteur 2 ou 3). Il semble donc que nous pouvons mettre ce paramètre de côté, mais qu'il aurait été judicieux de relever plus précisément les valeurs de pressions ambiantes les jours où nous avons expérimenté.

- **Importance du facteur "masse volumique" du liquide :**

Dans la formule, la masse volumique est au dénominateur : Une augmentation de la masse volumique devrait s'accompagner d'une diminution de la fréquence du son. Nous avons testé cette hypothèse en remplaçant l'eau douce par de l'eau salée saturée.

Masse volumique de l'eau: 988 g/L et Masse volumique de l'eau salée : 1183g/L

tuyaux	fréquence moyenne en Hz	rayon moyen de la bulle en mm	nombre de bulles	Moyenne des moyennes des produits f*R avec R en mètre	Conditions opératoires
eau douce tuyau non gradué	1102	3.3	71	3.6	rayon du tuyau: 2.2 mm température: 22.3°C milieu: eau
eau salée tuyau non gradué	856	3.4	25	2.9	rayon tuyau: 2.2 mm température: 21.9°C milieu: eau saturée en sel

On observe bien qu'une augmentation de la masse volumique du liquide a permis de faire baisser la fréquence du son émis comme le prévoit la formule.

Le coefficient de proportionnalité entre f la fréquence et 1/R est expérimentalement de 2,9 et théoriquement de 2,9, ce qui est très concordant.

- **Importance du facteur "température" du liquide :**

Nous avons recommencé des mesures en remplaçant l'eau douce à température ambiante par de l'eau douce chauffée à environ 40°C;

tuyaux	fréquence moyenne en Hz	rayon moyen de la bulle en mm	nombre de bulles	Moyenne des moyennes des produits f*R	Conditions opératoires
eau douce tuyau non gradué	1102	3.3	71	3.6	rayon du tuyau: 2.2 mm température: 22.3°C milieu: eau
eau chaude tuyau non gradué	1065	2.6	80	2.8	rayon: 2.2 mm température: 39.5+-3°C milieu: eau

On remarque dans ce cas qu'une augmentation de la température du liquide permet une diminution de la fréquence du son émis. L'explication est dans ce cas plus complexe, car la

température va modifier la masse volumique de l'eau (une légère diminution), mais certainement aussi la pression du gaz dans la bulle (si on considère le gaz comme parfait, la pression augmente avec la température). Nous avons vu dans la partie précédente que la taille des bulles est modifiée par la température, la fréquence va donc aussi l'être mais nous n'avons pas pu discuter plus loin son influence.

Bilan : Les incertitudes liées au mesure de fréquence et de rayon nous permettent tout de même de trouver le coefficient de proportionnalité entre f et $1/R$ à une dizaine de pourcents près.

Suite à la discussion avec Valentin Leroy, une amélioration sur la mesure de la fréquence avec l'ajout d'une bouteille intermédiaire afin d'empêcher de potentiels à-coups de la part du bulleur nous aurait permis d'approcher ce coefficient avec de meilleurs résultats.

CONCLUSION

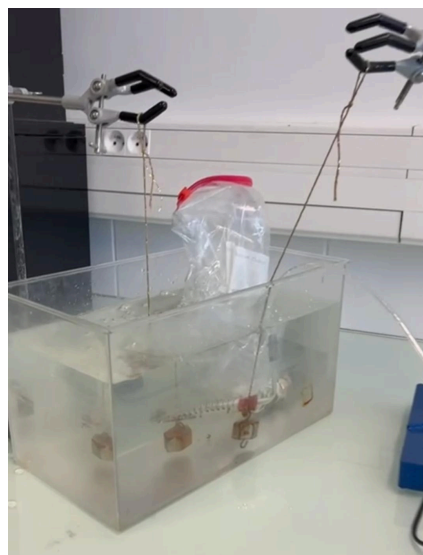
A partir des fréquences de nos bulles obtenues expérimentalement avec le matériel à disposition au lycée, nous avons pu réaliser une mélodie de l'enfance très identifiable. Vous la découvrirez au cours de notre vidéo. Surprise...

Cette expérimentation nous a permis de comprendre le lien entre la taille des bulles et le son qu'elles émettent dans les conditions observées. En effet, nous avons pu comprendre comment une bulle se forme, le lien entre la fréquence qu'elle émet suite au détachement et son rayon. Nous avons découvert que la température du liquide, la masse volumique de notre gaz, l'affinité entre le liquide et le tuyau ou encore le débit auquel les bulles se forment peuvent avoir une influence sur la taille de celles-ci !

Nous nous rendons compte que ce procédé est très utilisé dans la nature sous-marine. Quand les baleines à bosse sont très en colère, ou très compétitives, elles font des bulles sous l'eau pour interagir.

Cette communication indispensable est malheureusement interférée par la pollution sonore due à aux passages des bateaux, au son émis par leur sonar, au battage de pieux pour l'installation d'éolienne en mer ou autre résonance. Des prototypes de rideaux de bulles sont en cours de développement depuis les années 2010 afin de protéger l'environnement de ces pollutions sonores.

Intrigués par ces installations nous avons tenté de créer une maquette de rideau de bulles à partir du matériel dont nous disposons.



L'idée ici est de placer un tube en verre dont les deux extrémités sont bouchées au milieu de la cuve. Nous relierons ce tube au bulleur d'aquarium nous ayant servi lors de nos précédentes expérimentations. Nous utilisons des masses afin de maintenir ce tube dans le fond de la cuve. Nous plaçons une enceinte respectant la norme IP67, dans un sac plastique afin de limiter son exposition à l'eau. Nous l'immergeons d'un côté du tube en verre et plaçons notre GoPro de l'autre, dans l'optique de s'en servir comme hydrophone, comme dans le montage de notre "instrument à bulles".

À partir de ce montage, nous émettons un son continu grâce à un site internet adapté et après avoir enregistré durant quelques secondes, nous envoyons l'air dans le tube et notre rideau de bulles prend vie. Nous cherchons ici à constater une différence d'intensité sonore sur le signal entre le moment où le rideau est activé et le moment où il ne l'est pas.

Malgré plusieurs essais, nous n'avons pas encore été capables d'exploiter des résultats, nous rencontrons quelques complications liées à la capture du son. Cependant nous ne baissons pas les bras et nous continuons à essayer de montrer expérimentalement la capacité des rideaux de bulles à protéger la faune aquatique !

Remerciements :

Nous voudrions dans un premier temps adresser nos remerciements à Mr.Leroy, auteur de la thèse qui nous a inspiré ce sujet. Il a aimablement accepté de nous accorder un peu de son temps, entre autres, durant une visioconférence afin que nous puissions lui faire part de nos doutes et questions. Il a partagé avec nous son expérience dans le domaine en proposant des améliorations à notre manipulation.

Nous remercions également le Lycée Germaine Tillion et Mme Christine Louis, technicienne, qui nous ont permis d'accéder au laboratoire et d'utiliser le matériel qui nous était nécessaire. Mme Louis nous a aidé à mettre en place nos expérimentations et à répondre aux problématiques que nous avons rencontrées.

Nous souhaitons enfin remercier nos professeurs encadrants Mme Alleg et Mr Mathiotte qui nous ont accompagnés et encouragés tout au long de ce projet, notamment en nous apportant une expertise théorique.

Mentions honorables à Nathan Aubert, frère de Lucie, qui a répondu à certaines de nos interrogations et à la pâte à fix qui demeure à ce jour notre anti-stress le plus fidèle.

Sitographie :

- Thèse de Valentin Leroy : *Bulles d'air dans l'eau : couplage d'oscillateurs harmoniques et excitation paramétrique* <https://theses.hal.science/tel-00007437>
- Thèse de Mathis Poujol : *Signature acoustique d'évènements hydrodynamiques violents : l'éclatement de bulles capillaires à la surface d'un liquide* <https://theses.hal.science/tel-03583897>
- Thèse de Lorenzo Betti : *Mouillage dynamique : surfaces superhydrophobes et coalescences induites par vibrations* <https://theses.hal.science/tel-04042382v1>
- Thèse de Flore Mekki-Berrada : *Oscillations couplées de microbulles sous champ ultrasonore et conséquences hydrodynamiques* <https://theses.hal.science/tel-01458915v1>
- Thèse de Ahmed Hamraoui : *Mouillage et adhésion aux interfaces liquide–solide et cellules–surfaces* <https://iramis.cea.fr/Pisp/ahmed.hamraoui/files/156/HDR.pdf>
- ESPCI PARIS : *Le son des bulles - Conférence expérimentale du 9 janvier 2023* <https://youtu.be/PEpVko8GICA?si=q7NPKjz5u-8kQNi3>
- IEEE-UFFC : *Experimental Results On The Pressure Dependence Of The Minaret Resonance Frequency* <https://youtu.be/ptgqJhZn3o?si=owZDyqjr2kvjMqQM>
- [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Bulle_\(physique\)#](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Bulle_(physique)#)
- http://b.louchart.free.fr/Documents/CE/01/MP/Mines_Ponts_PSI_2006_Physique_2_Enonce.pdf
- <https://femto-physique.fr/>
- <https://mathinfo.tn/>
- https://lyc-hoche-versailles.ac-versailles.fr/IMG/pdf/4_formation_de_bulles_de_savon.pdf