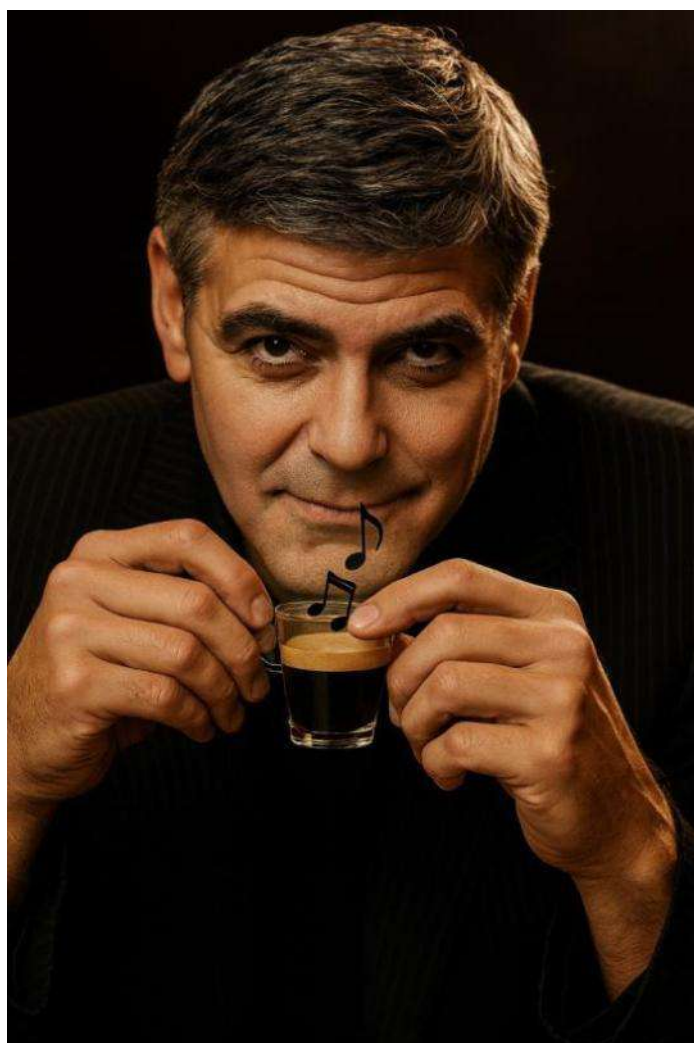


# Un café sonore



# What else ?

# La team

**Lily** 18 



 **Casser un b cher en chantant** 30 PTS  
Donne   Lily la compétence "castafiore"

 **Reine des sonagrammes** 100 PTS  
Aptitude spéciale qui confère à Lily la capacité unique de présenter un sonagramme parfaitement

COLLECTION REINE DE LA PHYSIQUE

**Léonore** 17 



 **Battre des œufs** 40 PTS  
Léonore ne sait pas touiller un café comme on battrait des œufs : attention aux éclaboussures !

 **Serveuse de café** 90 PTS  
Aptitude spéciale permettant à Léonore de faire le café le plus "altasonique" possible

COLLECTION REINE DE LA PHYSIQUE



**Sarah** 17 



 **Casser un b cher en le touillant** 10 PTS  
Munie de l'artefact "cuillère", Sarah peut, en touillant énergiquement un b cher, le casser

 **L'analogie du ressort** 130 PTS  
Aptitude spéciale qui permet à Sarah d'attirer son public avec seulement deux ressorts

COLLECTION REINE DE LA PHYSIQUE

# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>I. OBSERVATION DES FRÉQUENCES</b> .....	<b>1</b>
1. Analyse spectrale du son.....	1
2. Analyse spectrale de l'expérience.....	2
3. Les ondes .....	2
4. Vitesse du son dans les fluides .....	3
<b>II. LE SON ÉMIS PAR LE VERRE</b> .....	<b>6</b>
1. Cas du verre vide (ou rempli d'air).....	6
2. Les ondes stationnaires .....	6
3. Verre frappé sur le côté.....	7
<b>III. LE SON ÉMIS PAR LE VERRE AVEC DE L'EAU</b> .....	<b>10</b>
1. Influence de l'eau sur les fréquences .....	10
2. Le son émis avec de l'eau contenant des bulles.....	12
3. L'effet allasonique : Approche théorique .....	13
<b>IV. NOTRE THÉORIE SUR L'EFFET ALLASONIQUE</b> .....	<b>16</b>
1. Le modèle .....	16
2. Expérience finale .....	17
3. Retour d'expérience.....	19
<b>CONCLUSION</b> .....	<b>21</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>21</b>

# INTRODUCTION

Quand on prend un café ou un chocolat chaud dans une tasse, après l'avoir mélangé, il est possible d'entendre un phénomène bizarre ...

En effet, si on s'amuse à taper le fond avec notre cuillère. Le son entendu devient de plus en plus aigu !

Nous avons trouvé une vidéo sur You Tube réalisée par M Bobroff

[1] – **Le café qui chante** qui montre ce phénomène :

[1] <https://www.youtube.com/watch?v=R3dNaKIKgfs>



Celui-ci parle de l'**effet allasonique** (ou effet chocolat chaud) qui semble dépendre de la hauteur d'eau et de la vitesse du son.

Tout cela nous a interpellés et nous avons voulu comprendre et expliquer ce phénomène.

**Objet de notre étude :**

Peut-on **observer** et **mesurer** ces fréquences ?

Est-il possible d'**expliquer théoriquement** ce phénomène ?

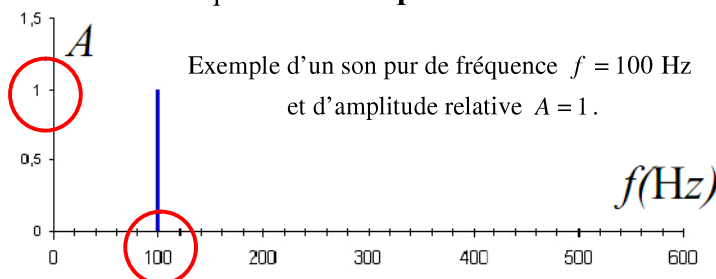
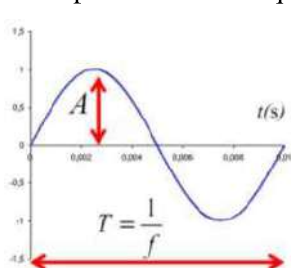
**Pour commencer : Comment observer et mesurer les fréquences d'un signal ?**

## I. OBSERVATION DES FRÉQUENCES

### 1. ANALYSE SPECTRALE DU SON

#### 1.a. Spectre d'un son pur

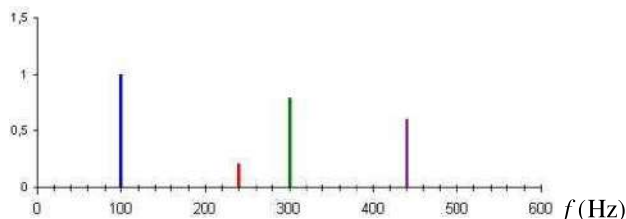
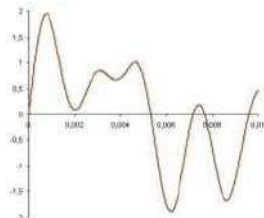
Un son pur correspond un signal sinusoïdal. Il faut deux informations (l'amplitude  $A$  et la fréquence  $f$ ) pour le caractériser. La représentation fréquentielle de ces caractéristiques donne le **spectre** du son étudié.



Exemple d'un son pur de fréquence  $f = 100$  Hz et d'amplitude relative  $A = 1$ .

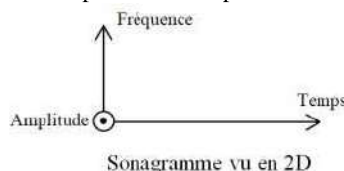
#### 1. b. Spectre d'un son complexe

Dans le cas d'un son complexe constitué de plusieurs sons purs, la représentation fréquentielle permet, d'un simple coup d'œil, de connaître les caractéristiques de celui-ci.

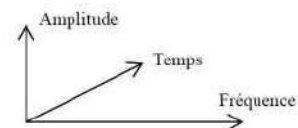


Représentation d'un son complexe et son spectre

**Sonagramme :** Il est possible de représenter l'évolution temporelle du spectre d'un signal sur un même graphique appelé **sonagramme**.



Sonagramme vu en 2D



Sonagramme vu en 3D

## 1.c. Décomposition en série de Fourier

**Théorème de Fourier** : Il existe un **théorème** qui dit qu'un **signal périodique** peut se toujours décomposer en une **somme d'ondes sinusoïdales** de fréquences **multiples** (harmoniques). On parle de décomposition en **série de Fourier**. Cet outil mathématique permet l'analyse des fréquences (le **spectre**) d'un signal, comme le son.

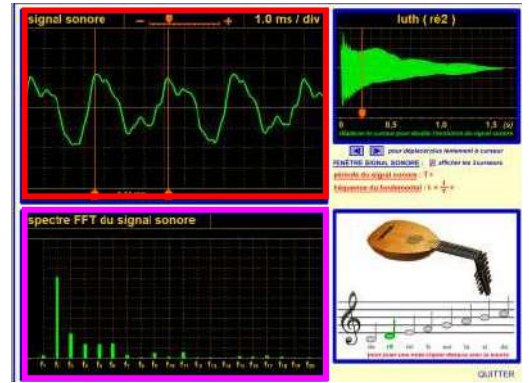
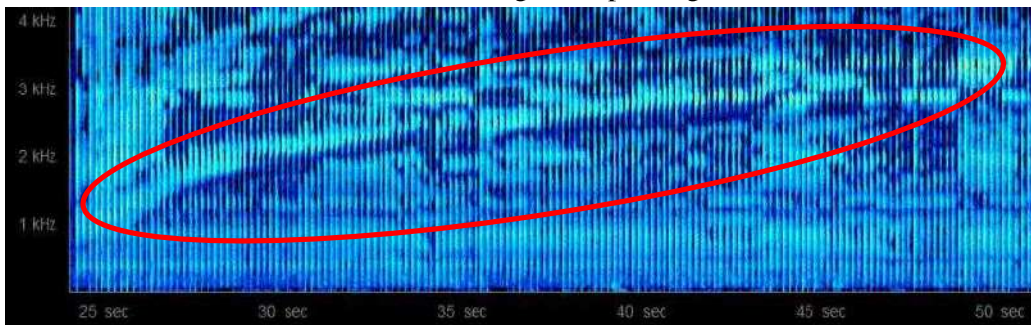
## 2. ANALYSE SPECTRALE DE L'EXPÉRIENCE

L'application **PHYPHOX** sur le **SMARTPHONE** permet de représenter et mesurer ces fréquences :

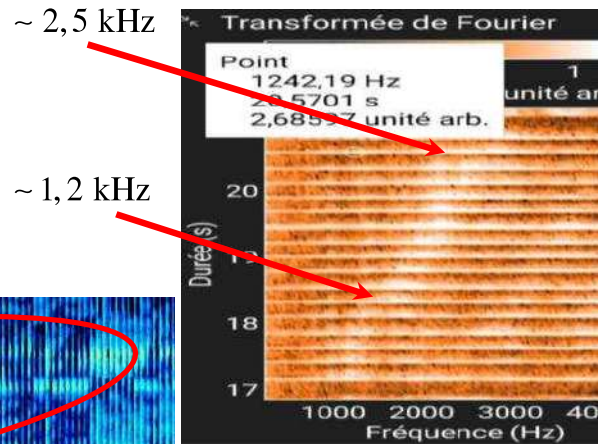
La trace blanche qui se dessine représente la variation de la fréquence qui varie en fonction du temps (en s).

Celle-ci varie donc entre 1,2 kHz et 2,5 kHz environ. Nous constatons que la fréquence augmente comme attendu, le son perçu devenant de plus en plus aigu.

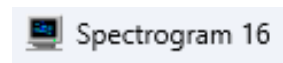
Les mêmes mesures effectuées avec le logiciel **Spectrogram 16** :



Son d'un luth (note ré) - Flash-FFT



Expérience sur Phyphox réalisée avec une tasse de café



**Conclusion** : Sur les sonagrammes, on arrive à observer des fréquences qui varient au cours du temps mais peut-on expliquer ce phénomène qui relève du domaine des ondes.

**Mais, qu'est ce qu'une onde ?**

## 3. LES ONDES

### 3.a. Définition

Une **onde** est la propagation au cours du temps d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu. Elle se déplace avec une vitesse déterminée qui dépend des caractéristiques du milieu de propagation

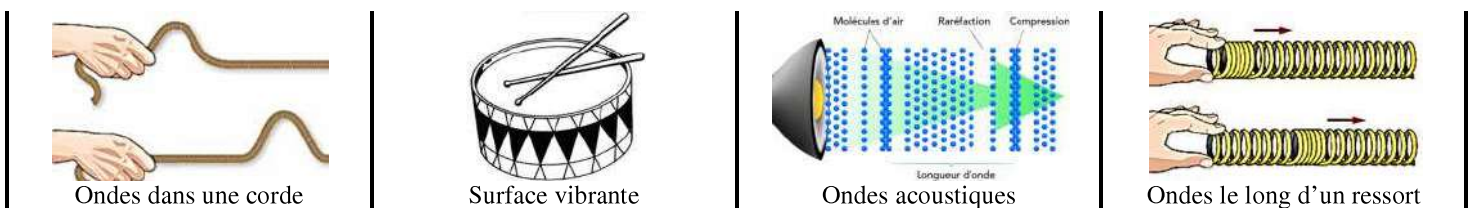


Un exemple d'onde de gravité

### 3.b. Différents types d'ondes

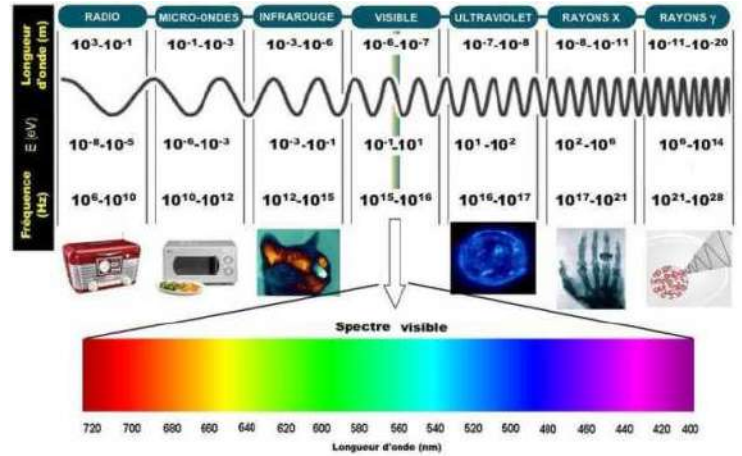
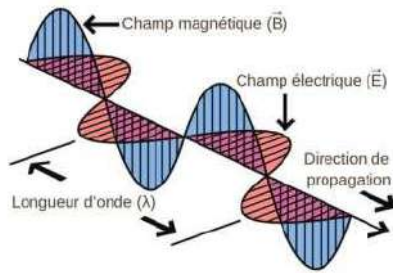
En mécanique classique, on distingue principalement deux types d'ondes, les ondes mécaniques qui ont besoin d'un milieu matériel pour se propager et les ondes électromagnétiques qui peuvent de propager dans le vide.

**Exemples d'ondes mécaniques** : Nécessite un milieu matériel pour se propager.



◆ Dans le cas de l'onde acoustique, on parle **d'onde de pression**.

**Les ondes électromagnétiques :** Correspond à la propagation (même dans le vide) d'un champ électrique et d'un champ magnétique.



Spectre des ondes électromagnétiques

### 3.c. Les ondes sinusoïdales

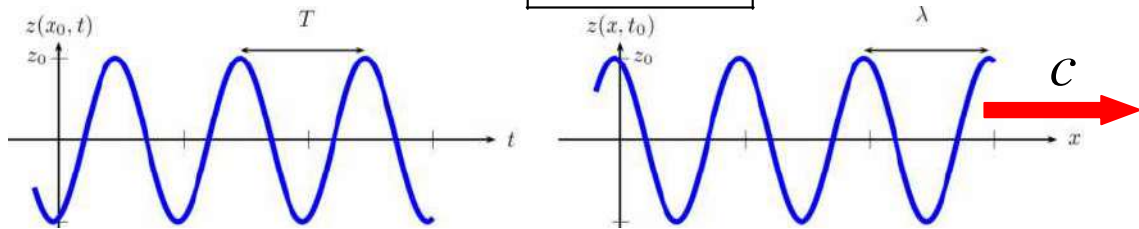
Comme on peut le voir sur le spectre électromagnétique précédent, il existe une catégorie fondamentale d'onde appelée onde sinusoïdale. Celle-ci est modélisée par une fonction sinusoïdale qui dépend de l'espace et du temps. Son expression mathématique est la suivante :

$$z(x, t) = z_0 \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \frac{2\pi}{\lambda}x + \varphi\right)$$

- Où :
- $z_0$  est l'amplitude de l'onde
  - $T = \frac{1}{f}$  est la fréquence de l'onde (et  $f$  la fréquence)
  - $\lambda$  la longueur d'onde
  - $\varphi$  la phase à l'origine

La longueur d'onde et la période (ou la fréquence) sont liées par la relation suivante dans laquelle intervient la célérité (ou vitesse) de l'onde.

$$\lambda = c.T = \frac{c}{f}$$



Une onde se propage à une certaine vitesse, peut-on la calculer et la mesurer ?

## 4. VITESSE DU SON DANS LES FLUIDES

### 4.a. Aspect théorique

Notre expérience concerne le son qui se propage dans l'eau ou l'air que l'on appelle des fluides. Dans la littérature scientifique, on trouve l'expression de la vitesse ou célérité d'une onde sonore dans les fluides :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho\chi_s}}$$

- Où :
- $c$  est la **célérité** (ou vitesse) du son (en m/s)
  - $\chi_s$  est le **module de compressibilité isentropique** (ou coefficient de compressibilité adiabatique) du fluide (en  $\text{Pa}^{-1}$ ). Il représente la résistance du fluide à la compression.


$$\chi_s = -\frac{1}{V} \left. \frac{\partial V}{\partial P} \right|_s$$

Le coefficient  $\chi_s$  exprime de combien se comprime un volume si on exerce une pression sur lui

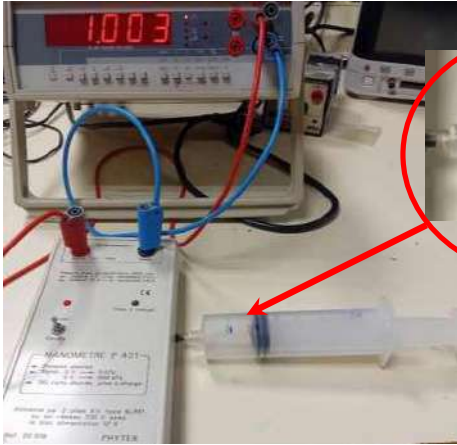
- $\rho$  est la **masse volumique** du fluide (en  $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ).

Concrètement, c'est une formule qui relie l'**élasticité** et l'**inertie** du milieu :

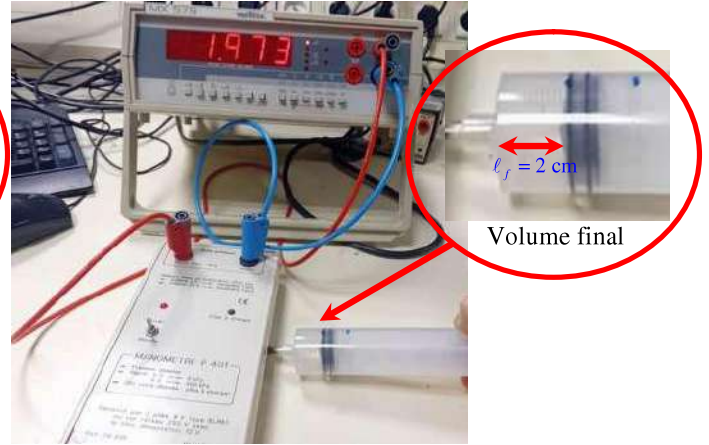
## 4.b. Exemple de l'air

 **Mesure de  $\chi_s$**  : Expérience de mesure de  $\chi_s$  pour l'air

**Protocole** : Avec une seringue remplie d'air et un capteur de pression (manomètre P 401 de Phytex). On appuie rapidement afin d'enfoncer le piston et l'on mesure la variation de pression correspondante.



État initial :  $P_i = 1,003$  bar et  $\ell_i = 4$  cm



État final :  $P_f = 1,973$  bar et  $\ell_f = 2$  cm

**Exploitation** : Cette expression  $\chi_s = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}_s$  permet de déterminer expérimentalement sa valeur à l'aide de notre protocole. En effet, par intégration entre les deux positions de la seringue, il vient :

$$\chi_s \int_{P_i}^{P_f} \partial P = - \int_{V_i}^{V_f} \frac{\partial V}{V} \quad \text{soit} \quad \chi_s = \frac{1}{P_f - P_i} \ln \frac{V_i}{V_f}$$

Nous avons enfoncé la seringue de  $\Delta \ell = 2$  cm pour une longueur initiale de  $\ell_i = 4$  cm avec une variation de pression  $P_f - P_i = 0,97$  bar  $= 0,97 \cdot 10^5$  Pa .

$$\text{Avec } V_i = S \times \underbrace{\ell_i}_{=4 \text{ cm}} \text{ et } V_f = S \times \underbrace{(\ell_i - \Delta \ell)}_{=2 \text{ cm}} : \quad \chi_s = \frac{1}{P_f - P_i} \ln \frac{S \times \ell_i}{S \times (\ell_i - \Delta \ell)} = \frac{1}{P_f - P_i} \ln \frac{\ell_i}{\ell_i - \Delta \ell}$$

$$\text{Numériquement : } \chi_s = \frac{1}{0,97 \cdot 10^5} \ln 2 = 7,1 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$$

Cette valeur est cohérente avec la littérature qui donne  $\chi_s \approx 7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$

Nous pouvons estimer la vitesse du son dans l'air avec  $c = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi_s}}$  et  $\rho_{\text{air}} = \frac{M_{\text{air}} P}{RT} \approx 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  à  $20^\circ\text{C}$ .

Nous trouvons alors :  $c_{\text{air}} \approx 345 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (résultat en adéquation avec la valeur de référence ci-dessous)

### Valeurs de référence

Milieu	Célérité de référence (c)	Commentaires
Eau (pure, $20^\circ\text{C}$ )	$\approx 1500$ m/s	Dépend fortement de la température, de la salinité (pour l'eau de mer) et de la pression.
Air (sec, $20^\circ\text{C}$ )	$\approx 343$ m/s	Dépend principalement de la température : $c_{\text{air}} \approx 331,4 + 0,6 \cdot T$ (où T est en $^\circ\text{C}$ ).

### Mesure de la vitesse du son dans l'air :

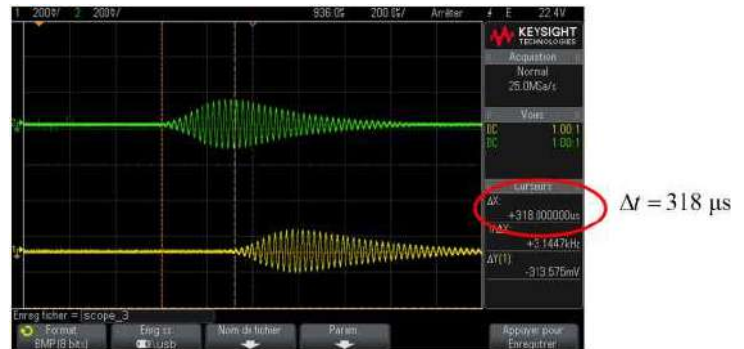
**Protocole :** On dispose d'un émetteur d'ultrasons sinusoïdaux (fréquence des ultrasons autour de 40 kHz). L'émetteur permet d'obtenir une émission par salves (émises à environ 100 Hz) et de deux récepteurs d'ultrasons identiques, dont la sortie sera reliée à une entrée de l'oscilloscope.



**Exploitation :** La mesure du retard entre les récepteurs donne une mesure directe de la vitesse du son par :  $c = \frac{d}{\Delta t}$   
Avec  $d = 11 \text{ cm} = 0,11 \text{ m}$  et  $\Delta t = 318 \mu\text{s}$ , il vient :

$$c_{\text{air}} = \frac{0,11}{318 \cdot 10^{-6}} = 346 \text{ m.s}^{-1}$$

On retrouve une valeur proche de la référence.

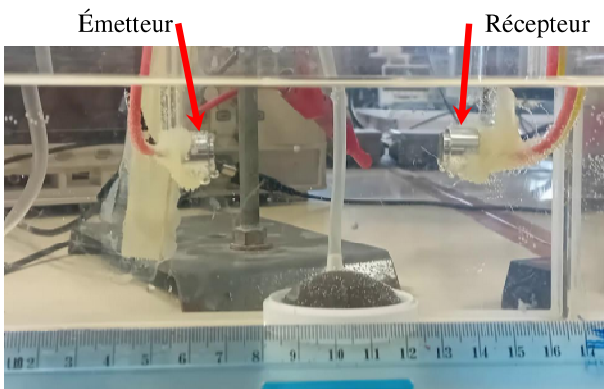


### 4.c. Exemple de l'eau

Contrairement à l'air, la mesure directe de  $\chi_s$  ( $\chi_s \approx 4,6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ ) nous est impossible car l'eau est quasi incompressible (surtout avec notre seringue en plastique...). Par contre, il est possible de réaliser la mesure de la vitesse du son directement avec le même protocole que pour l'air.

### Mesure de la vitesse du son dans l'eau :

**Protocole :** On utilise un émetteur d'ultrasons sinusoïdaux ( $f \approx 40 \text{ kHz}$ ) permettant d'obtenir une émission par salves et d'un récepteur. Les deux étant reliées à l'oscilloscope afin d'obtenir l'oscillogramme ci-dessous.



Ici,  $d = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$



**Exploitation :** La mesure du retard entre émetteur et récepteur donne une mesure de la vitesse du son par  $c = \frac{d}{\Delta t}$ .

Avec  $d = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$  et  $\Delta t = 62 \mu\text{s}$ , il vient :  $c_{\text{eau}} = \frac{0,09}{62 \cdot 10^{-6}} = 1450 \text{ m.s}^{-1}$

Ce résultat (à comparer avec la valeur de référence du tableau de la page précédente) montre que cette méthode de mesure est pertinente.

**La suite :** Pour entendre l'effet allasonique, il faut taper au fond d'une tasse ou d'un verre mais ...

**Que se passe-t-il dans le verre quand on tape au fond ?**

## II. LE SON ÉMIS PAR LE VERRE

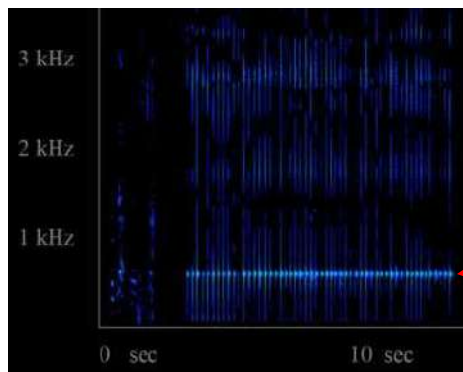
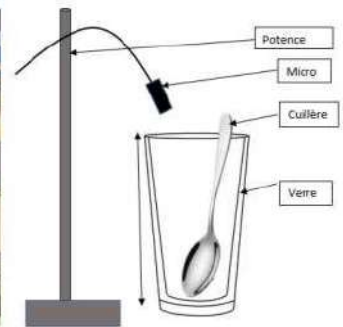
### 1. CAS DU VERRE VIDE (OU REMPLI D'AIR)



**Son émis par le verre vide :**

**Protocole :** Dans notre expérience, nous allons frapper un verre (hauteur 14 cm) au fond avec la cuillère. Le son est analysé avec le logiciel Spectrogram 16.

**Résultat :** On mesure essentiellement une fréquence d'environ 600 Hz.



La présence de cette fréquence peut s'expliquer par les ondes stationnaires.

**Qu'est ce qu'une onde stationnaire ?**

### 2. LES ONDES STATIONNAIRES

#### 2.a. Définition

Une onde stationnaire résulte de la superposition d'une onde incidente et d'une onde réfléchie de même amplitude et de même fréquence se propageant en sens inverse.

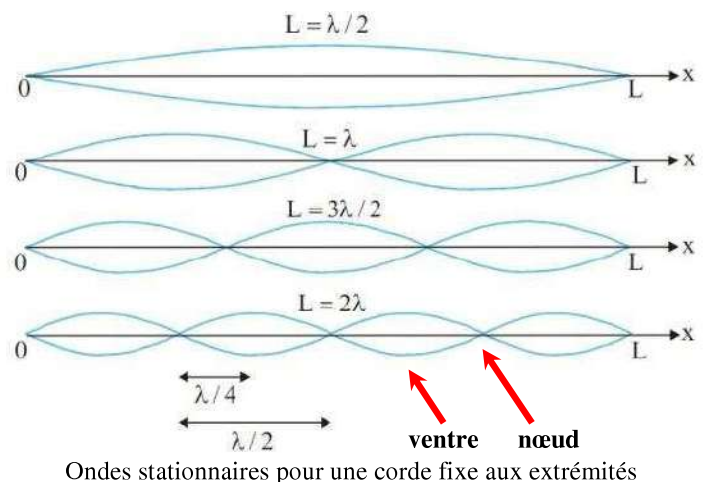
Celle-ci présente des :

- **Nœuds :** Points où l'amplitude de vibration est nulle.
- **Ventres :** Points où l'amplitude de vibration est maximale.

Les fréquences et longueurs d'ondes sont liées aux conditions aux limites du milieu de propagation. Les extrémités du milieu (corde, colonne d'air, etc.) imposent donc des contraintes qui déterminent les fréquences possibles (fréquences propres ou harmoniques). Ces conditions peuvent être :

- Fixe (Nœud) : L'amplitude doit être nulle
- Libre (Ventre) : L'amplitude est maximale

Comme on peut le voir sur la figure ci-dessus, dans le cas d'une corde aux deux extrémités fixes, les ondes stationnaires ne peuvent exister que si la longueur  $L$  du milieu est un multiple entier de  $\frac{\lambda}{2}$ .



$$L = n \times \frac{\lambda}{2} \Leftrightarrow \lambda_n = \frac{2L}{n} \text{ et comme } \lambda = c.T = \frac{c}{f}, \text{ il vient les fréquences possibles } f_n = n \frac{c}{2L}$$

**Annexe :** Nous avons réalisé l'expérience de la corde de Melde afin de vérifier l'existence des ondes stationnaires pour une corde fixe aux extrémités.

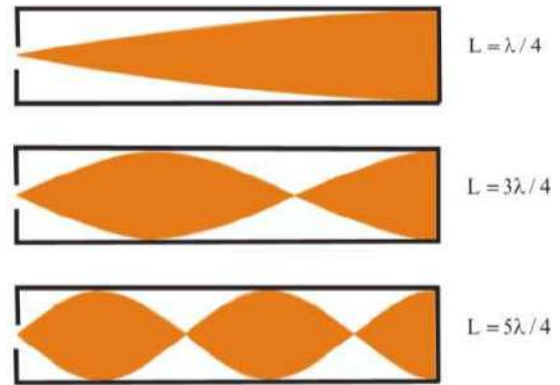
## 2.b. Cas d'une colonne d'air

Comme nous l'avons vu précédemment, une onde acoustique est une onde de pression. Dans le cas d'une colonne d'air, les conditions aux limites sont imposées soit par :

- Une ouverture avec l'extérieur qui fixe la pression atmosphérique  $P_0$  et qui représente un nœud de la vibration.
- Une extrémité fermée qui représente alors un ventre de pression.

Il est donc possible de se mettre dans les mêmes conditions que l'expérience de la corde de Melde avec un tuyau ouvert-ouvert ou bien de réaliser un tuyau ouvert-fermé.

Dans ce cas, la longueur  $L$  du milieu est un multiple entier impaire de  $\frac{\lambda}{4}$ .

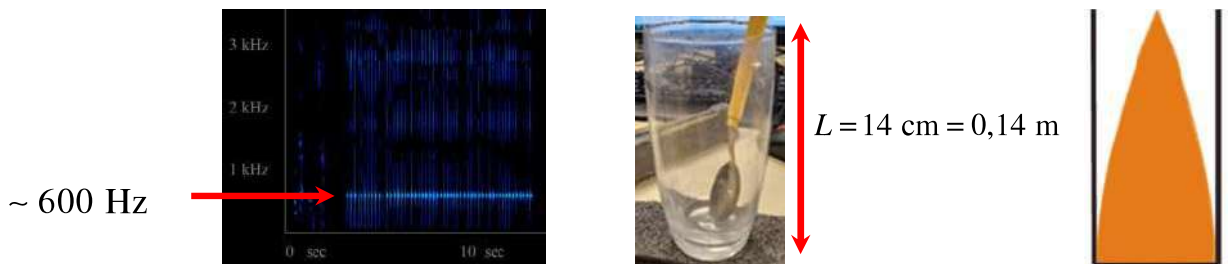


Onde de pression dans un tuyau ouvert-fermé

$$L = n \times \frac{\lambda}{4} \Leftrightarrow \lambda_n = \frac{4L}{n} \text{ et comme } \lambda = c_{\text{air}} \cdot T = \frac{c}{f} \Rightarrow f_n = n \frac{c_{\text{air}}}{4L} \text{ avec } n = 1, 3, 5, \dots$$

## 2.c. Retour sur l'expérience du verre : Présence d'ondes stationnaires !

Le fond fermé du verre est un ventre de pression (l'air est bloqué, la variation de pression est maximale). L'ouverture du verre est un nœud de pression (la pression y est égale à la pression atmosphérique).



Avec l'expression de la fréquence  $f_n = n \frac{c_{\text{air}}}{4L}$ , pour  $n = 1$  (fondamental) et  $c_{\text{air}} = 340 \text{ m.s}^{-1}$  :  $f_1 = 607 \text{ Hz}$

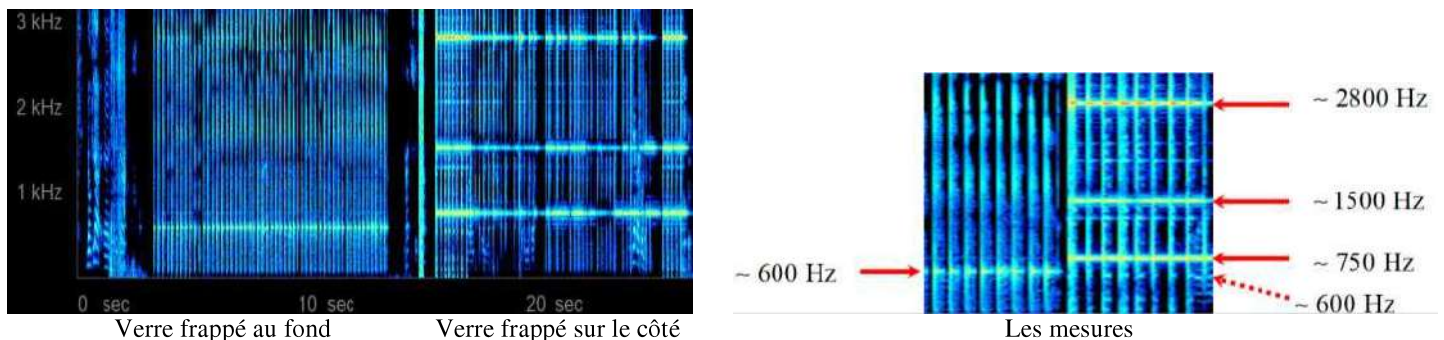
La comparaison théorie / expérience nous conforte dans l'idée d'ondes stationnaires acoustiques dans le verre.

Et si on frappe le verre sur le côté ?

## 3. VERRE FRAPPÉ SUR LE CÔTÉ

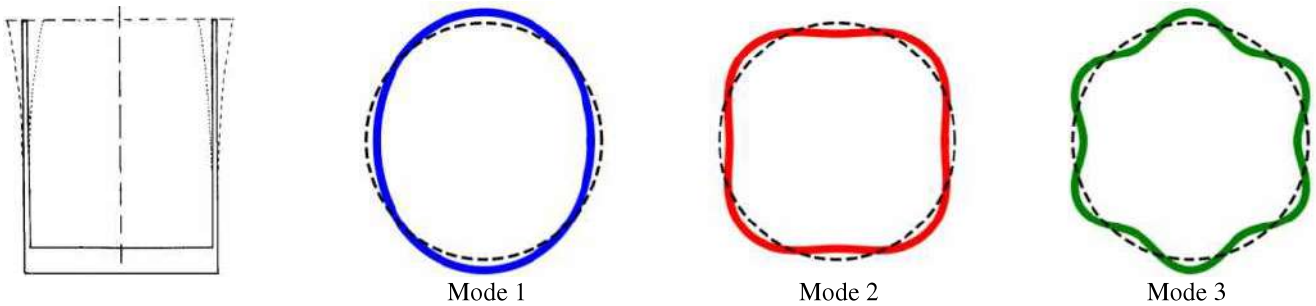
### 3.a. Différences du son émis par le verre

L'expérience : On compare le son émis par le verre frappé au fond puis sur le côté à l'aide d'un sonagramme.

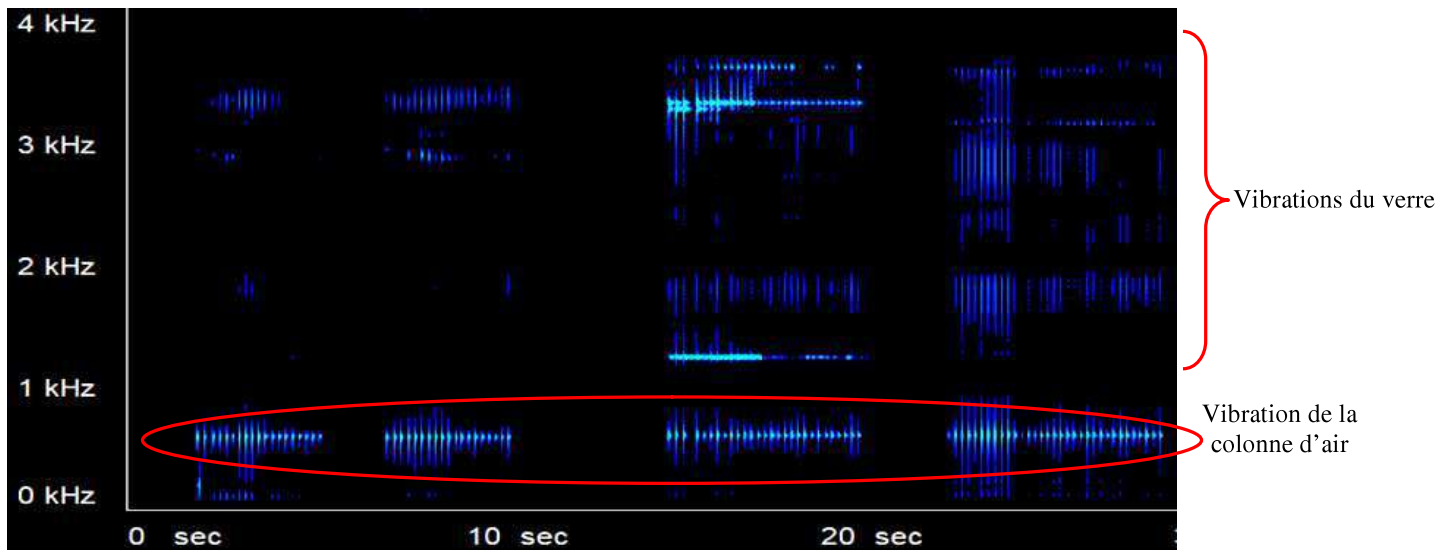
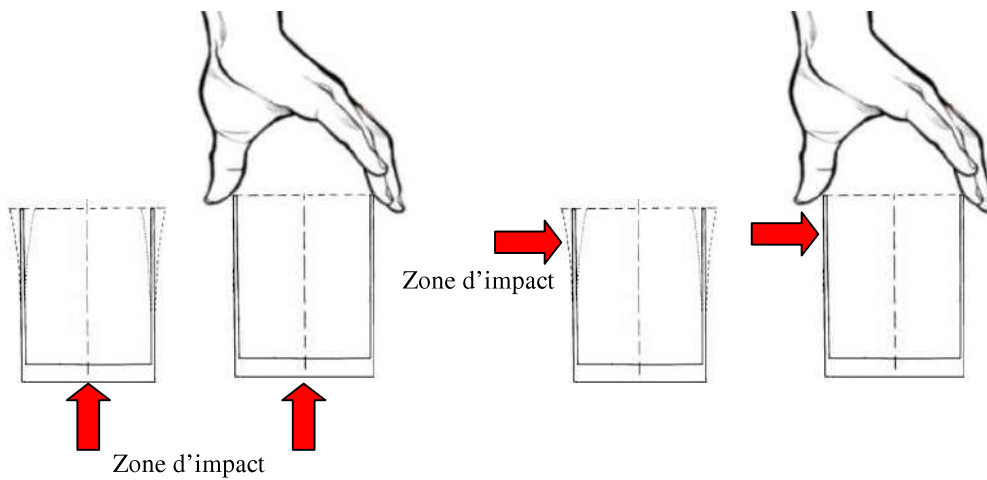


**Résultats :** Il apparaît de nouvelles fréquences plus aiguës qui n'ont pas de lien avec la fréquence de l'onde stationnaire existant dans la colonne d'air à 600 Hz. Toutefois, celle-ci reste présente, bien qu'atténuée, dans le son émis.

**Interprétation :** D'après le travail d'une équipe des Olympiades de Physique ([2] - 2005 – Sur les traces de la Castafiore), il s'agit des vibrations latérales du verre lui-même. Celui-ci présente la encore des ondes stationnaires (donc des nœuds et des ventres) sur sa circonférence avec des modes propres dont les formes sont les suivantes :

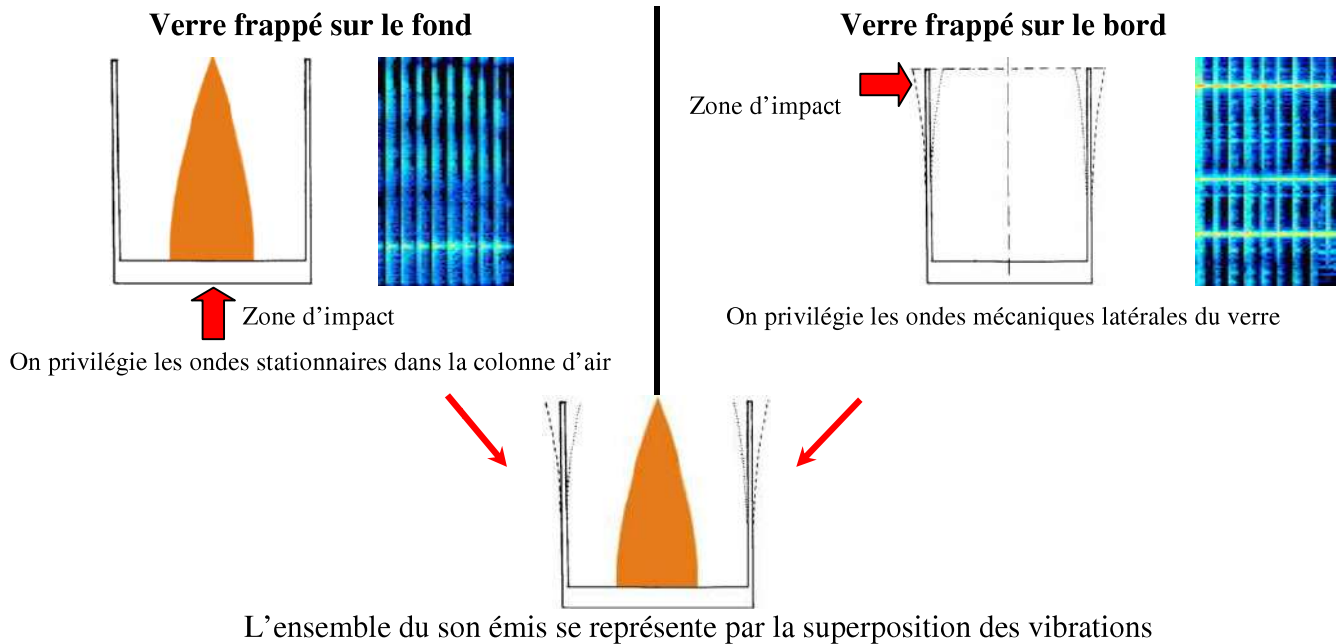


**Vérification :** Afin de vérifier simplement la nature de ces vibrations, nous avons comparé le son du verre frappé dans deux configurations différentes, à savoir le verre libre de vibrer et le verre tenu fermement au niveau de la circonférence avec les doigts.



Quelle que soit la zone d'impact, on retrouve toujours la vibration de la colonne d'air. Par contre avec l'impact sur le côté, les vibrations du verre sont très atténuées quand celui-ci est maintenu fermement avec les doigts. Cette petite expérience confirme notre hypothèse des vibrations latérales du verre.

**Conclusion :** Le son d'un verre frappé est constitué, à minima, de la superposition des vibrations mécaniques latérales et des vibrations acoustiques de la colonne d'air (avec pour les deux plusieurs modes possibles). Pour les distinguer facilement, il suffit de frapper préférentiellement le verre au fond ou sur le côté.

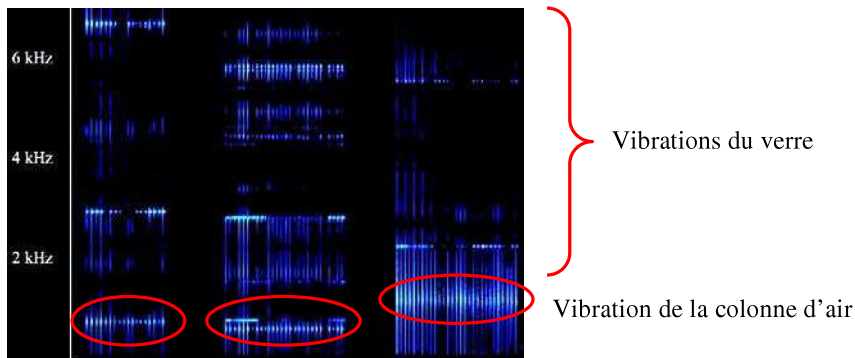


Et si on teste pour différents verres ?

### 3.b. Généralisation avec différents verres

**L'expérience :** Afin de confirmer notre interprétation du son émis par un verre, nous avons voulu refaire l'expérience avec d'autres verres de hauteurs et largeurs différentes.

**Résultats :** On retrouve à chaque fois une fréquence basse correspondant à la vibration acoustique de la colonne d'air suivi des vibrations latérales.



Hauteurs : 12 cm 14cm et 6,5 cm

Respectivement, les fréquences de la colonne d'air sont : ~720 Hz (12 cm), ~600 Hz (14 cm) et ~1200 Hz (6,5 cm)

**Interprétation :** Théoriquement, on doit retrouver ces valeurs avec la formule  $f_n = n \frac{c_{\text{air}}}{4L}$  pour  $n = 1$ .

Hauteur (cm)	12	14	6,5
$f_{\text{exp}}$ (Hz)	720	600	1200
$f_{\text{théorique}} = \frac{c_{\text{air}}}{4L}$ (Hz)	708	607	1300

Les valeurs expérimentales et théoriques sont très proches et semble confirmer cet aspect théorique.

**Conclusion :** Il n'y a pas de verre « spécial ». Par la suite, **toutes nos manipulations seront faites avec un bécher ou une éprouvette** pour rendre les expériences reproductibles et réalisables par tous.

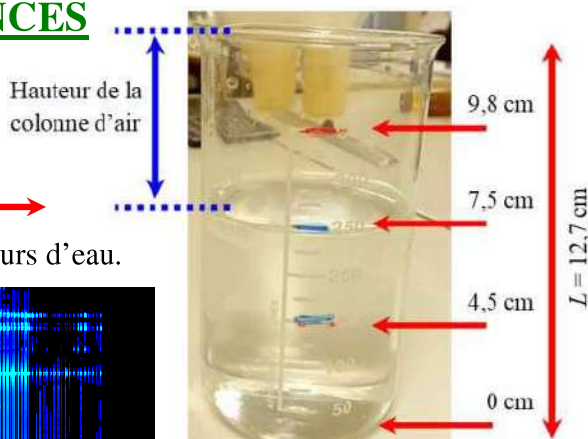
# III. LE SON ÉMIS PAR LE VERRE AVEC DE L'EAU

## 1. INFLUENCE DE L'EAU SUR LES FRÉQUENCES

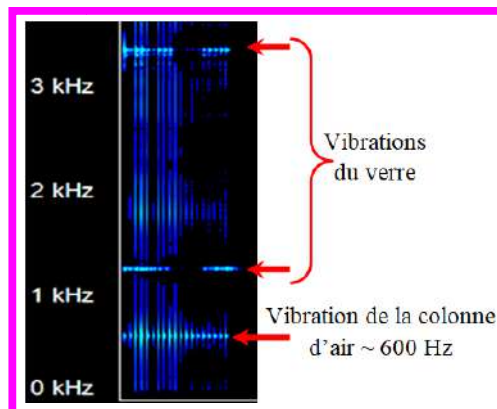
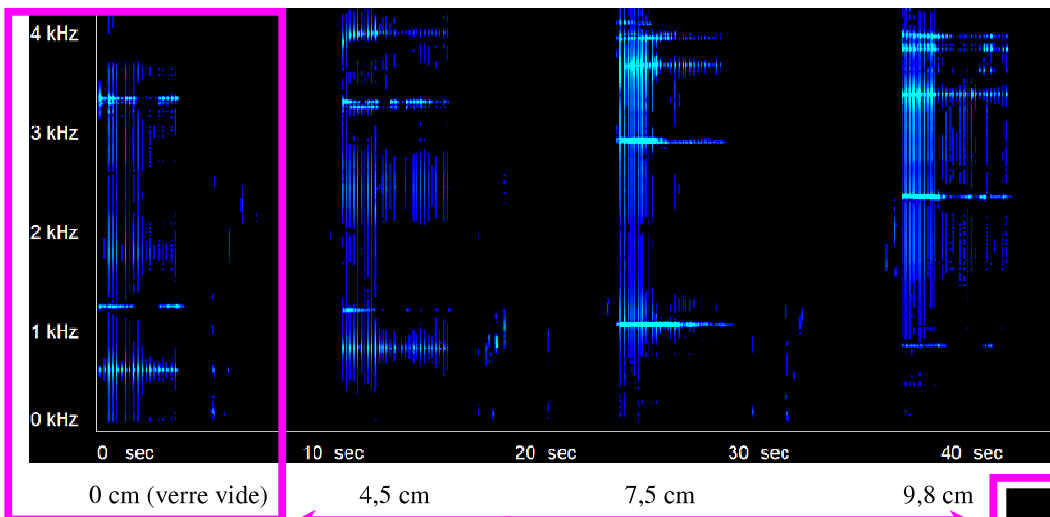
### 1.a. Expérience lors du remplissage

**Protocole :** Afin de visualiser l'influence de l'eau, nous avons décidé d'analyser les fréquences pour quatre hauteurs d'eau différentes dans un béccher (voir photo ci-contre).

**Résultats :** Voici le sonagramme de l'expérience pour les quatre hauteurs d'eau.

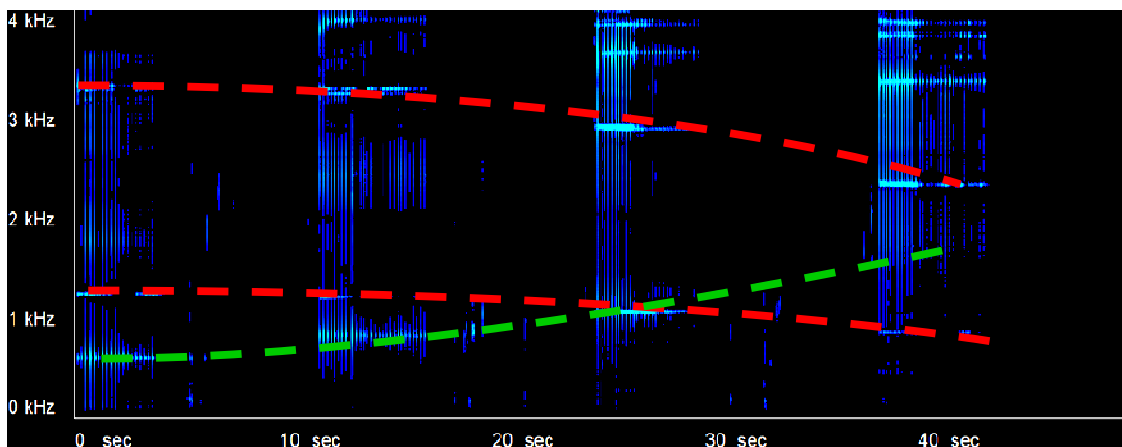


Béccher avec des hauteurs d'eau différentes



Le verre vide permet de distinguer la vibration de la colonne d'air des vibrations latérales. En effet, vu la hauteur du verre, la fréquence de l'onde stationnaire acoustique doit être de l'ordre de  $f_{théorique} = \frac{c_{air}}{4L} = 670 \text{ Hz}$ .

Au cours du remplissage, on remarque une baisse des fréquences du verre et une augmentation de la fréquence associée à la colonne d'air.



Comment interpréter ces variations ?

## 1.b. Quelle interprétation ?

Il faut distinguer les deux situations : À savoir la fréquence associée à la colonne d'air et les vibrations du verre.

**I - La colonne d'air :** Au fur et à mesure que la hauteur d'eau monte, la colonne d'air diminue.

Vu l'expression de la fréquence ( $f = \frac{c_{\text{air}}}{4L_{\text{air}}}$ ), si  $L_{\text{air}} \searrow$  alors  $f \nearrow$  comme le montre le tableau suivant :

Hauteur d'eau (cm)	0	4,5	7,5	9,8
Colonne d'air (cm)	12,7	8,2	5,2	2,9
$f_{\text{théorique}} = \frac{c_{\text{air}}}{4L_{\text{air}}} \text{ (Hz)}$	670	1030	1630	2930
$f_{\text{exp}} \text{ (Hz)}$	600	820	1100	?

Le résultat est cohérent en termes d'évolution mais plus la colonne d'air est petite et plus l'écart entre la théorie et l'expérience augmente !

Après une recherche sur internet, nous avons trouvé un article dans le magazine [3] **Pour la Science** :

### Un bon tuyau pour accorder un orgue.

Dans cet article, on apprend que la fréquence du son émis par un tuyau dépend de la longueur mais aussi du diamètre. Ces résultats sont issus des travaux de Lord Rayleigh en 1877 ainsi que des physiciens Harold Levine et Julian Schwinger en 1948.

Concrètement dans le cas d'un tuyau cylindrique, plus le tuyau est court et plus il faut corriger la longueur réelle en ajoutant 0,3 fois son diamètre, soit :

$$L_{\text{réelle}} = L_{\text{tuyau}} + 0,3D$$

En reprenant cette formule, il vient le tableau suivant pour un diamètre  $D = 7,2 \text{ cm}$  :

Hauteur d'eau (cm)	0	4,5	7,5	9,8
Colonne d'air (cm)	12,7	8,2	5,2	2,9
$f_{\text{théorique}} = \frac{c_{\text{air}}}{4L_{\text{air}}} \text{ (Hz)}$	670	1030	1630	2930
$f_{\text{corrigée}} = \frac{c_{\text{air}}}{4(L_{\text{air}} + 0,3D)} \text{ (Hz)}$	570	820	1150	1670
$f_{\text{exp}} \text{ (Hz)}$	600	820	1100	?

On retrouve une forte concordance entre la théorie (corrigée) et l'expérience, c'est encourageant.

## II – Les vibrations du verre :

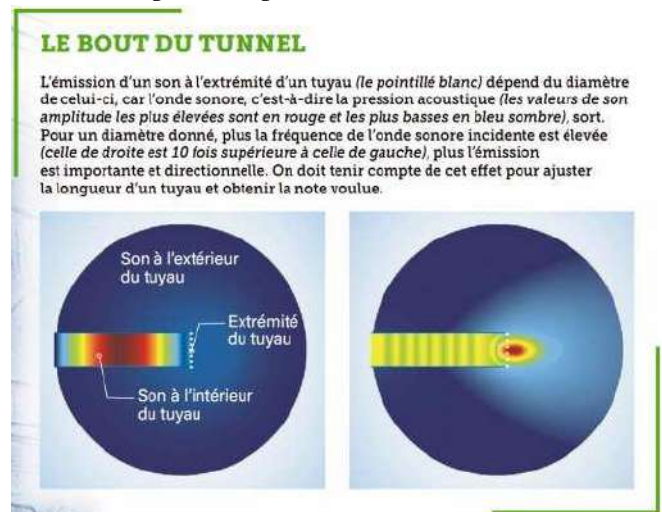
Les fréquences des vibrations du verre diminuent quand on ajoute de l'eau. Une explication simple est possible en assimilant le verre à un système masse – ressort.

La fréquence d'un tel système est :

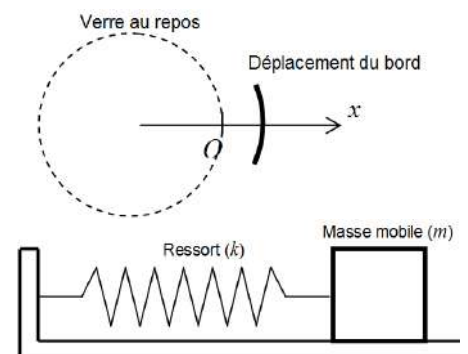
$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

avec  $k$  la constante de raideur du ressort en  $\text{N.m}^{-1}$  et la masse  $m$  en kg

En ajoutant de l'eau, on augmente la masse du système qui oscille impliquant une baisse de la fréquence. Pour résumer : si  $m \nearrow$  alors  $f \searrow$



Extrait de l'article



**Conclusions :** Il y a deux conclusions importantes

1 - Quelque soit le verre utilisé, on retrouve systématiquement les mêmes types de vibrations (ondes sonores liées à la colonne d'air et les vibrations de la circonférence du verre). Cela va nous permettre dans la suite de nos recherches **d'utiliser exclusivement de la verrerie de chimie, à savoir des béchers ou des éprouvettes.**

2 - Pour une hauteur d'eau fixée, les fréquences émises sont constantes dans le temps. Il n'y a **aucun effet allasonique** avec simplement de l'eau dans le verre. Pour l'observer, il faut impérativement bien mélanger un café avec de la mousse.

**Mais pourquoi est-ce important de mélanger le café pour observer l'effet allasonique ?**

## **2. LE SON ÉMIS AVEC DE L'EAU CONTENANT DES BULLES**

Quand on mélange vigoureusement le café, cela permet d'avoir des bulles d'air dans le liquide. Afin de confirmer la nécessité de celles-ci et d'être capable d'avoir un protocole expérimental simple et reproductible, nous devons trouver des méthodes pour avoir des bulles dans l'eau.

### **2.a. Comment avoir des bulles dans l'eau ?**

Voici quelques idées pour créer des bulles dans de l'eau ainsi que les observations directes de ces expériences.

① **Liquide vaisselle :** Mettre du liquide vaisselle dans un verre d'eau et touiller énergiquement pour incorporer de l'air et créer de la mousse.

**Observation :** Lorsque l'on arrête de touiller, de la mousse apparaît à la surface et les bulles remontent doucement dans le verre.

② **Mousse à raser :** Mettre de la mousse à raser dans un verre d'eau et touiller pour l'incorporer.

**Observation :** Le mélange devient tout blanc et opaque. On le voit ensuite « décanter » lentement en deux phases (eau et mousse au dessus). Nous présumons que la remontée de la mousse est due aux bulles d'air emprisonnées dans celle-ci, car elle se reforme en surface.

③ **Eau chaude en sortie de robinet :** Faire couler doucement de l'eau chaude du robinet dans un verre.

**Observation :** Il apparaît des bulles de dégagement gazeux (dégazage) dues à la baisse de pression entre la tuyauterie et la pression extérieure.

④ **Cachet d'aspirine :** Mettre un cachet effervescent d'aspirine dans de l'eau.

**Observation :** Il se forme rapidement une grande quantité de bulles mais le mélange n'est pas homogène. De plus, il reste des résidus dans le verre après la remontée des bulles.



① Liquide vaisselle



② Mousse à raser



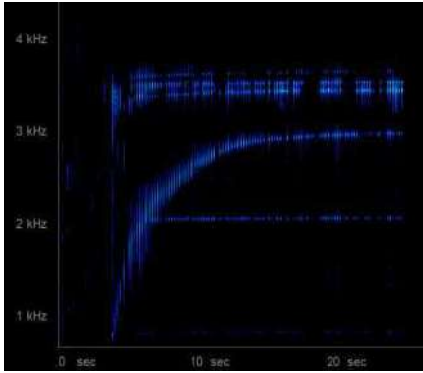
③ Eau chaude en sortie de robinet



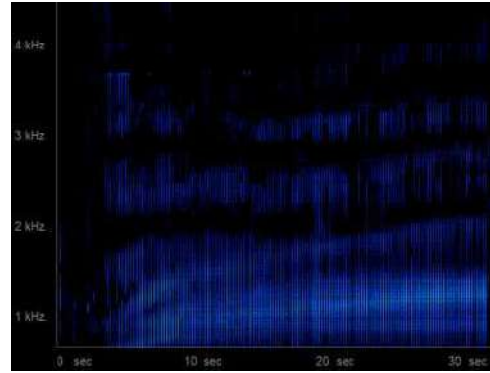
④ Cachet d'aspirine

**Reste maintenant à tester notre eau « bullée » !**

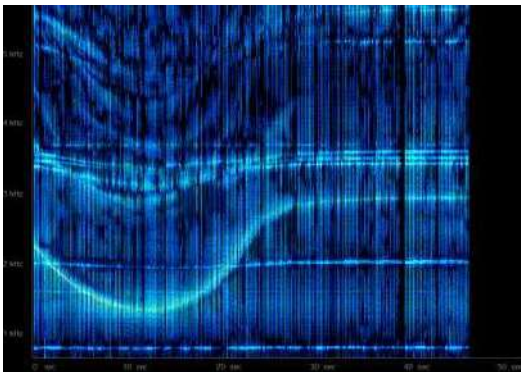
## 2.b. Test des différentes options de bullages



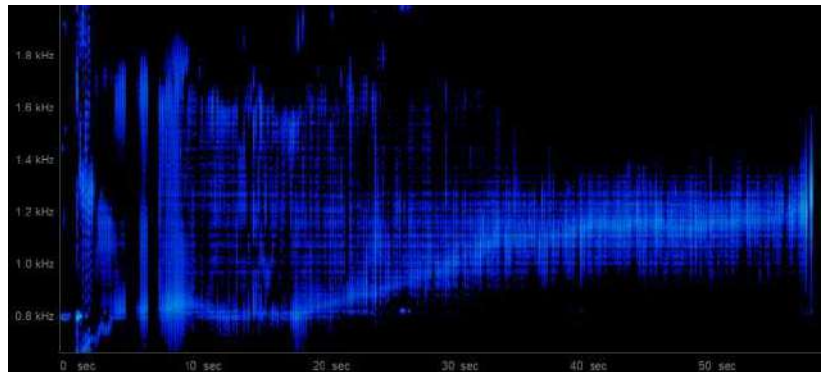
① Liquide vaisselle



② Mousse à raser



③ Eau chaude en sortie de robinet



④ Cachet d'aspirine

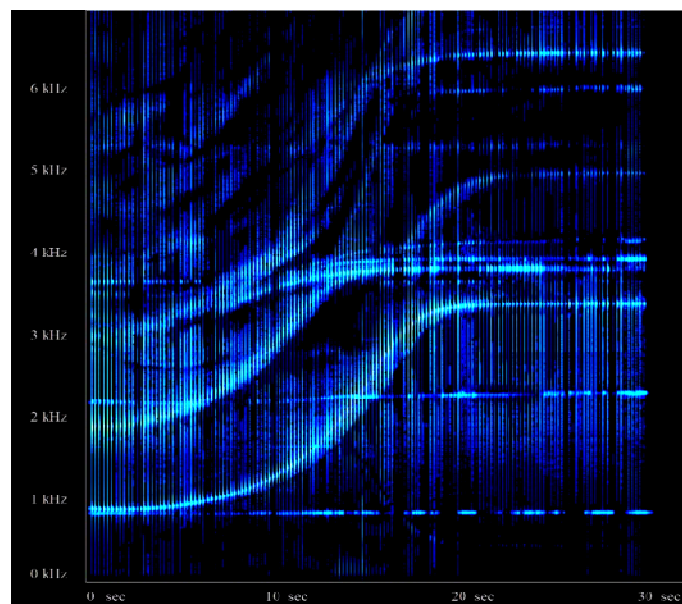
**Conclusion :** Pour toutes ces expériences on observe un effet allasonique (une variation de fréquence en fonction du temps). Concernant le liquide vaisselle comme la mousse à raser, le résultat est très dépendant de la manière de mélanger. Avec le cachet d'aspirine, l'effet allasonique est très chaotique. Pour ces raisons, toutes nos manipulations seront faites avec l'eau chaude sous pression du robinet pour rendre les expériences reproductibles.

## 3. L'EFFET ALLASONIQUE : APPROCHE THÉORIQUE

### 3.a. Première analyse du phénomène

**Protocole :** Nous remplissons un bécher avec de l'eau chaude « bullée » sur une hauteur de 9 cm puis nous tapons sur le cotés afin d'obtenir le sonagramme.

**Résultats :** Voici le sonagramme de l'expérience.



bulles

Vibrations du bécher

**Observations :** En tapant sur le b cher, nous observons les bulles qui remontent jusqu' disparaître et une modification de la fréquence du son. Le son devient de plus en plus aigu. Nous avons bien l'effet allasonique attendu, ouf !

Au début, les fréquences partent de très bas (~ 900 Hz) puis montent jusqu' terminer sur une fréquence de vibration du b cher rempli d'eau sans bulles.

**Interprétation :** Si le son perçu correspond  une onde stationnaire dans la colonne d'eau de hauteur 9 cm, vu la vitesse du son, il vient la fréquence :

$$f = \frac{c_{\text{eau}}}{4L} = \frac{1450}{4 \times 0.09} \approx 4 \text{ kHz}$$

Cette valeur est trop grande  moins que la vitesse ne soit pas bonne. En effet, pour avoir une fréquence d'environ 900 Hz, il faudrait que la vitesse soit divisée par plus de 4 (environ 320 m.s<sup>-1</sup>)...

**Conclusion :** La présence des bulles est nécessaire pour le changement de fréquence qui semble lié  la disparition de celles-ci. Mais il y a une interrogation sur la vitesse du son dans l'eau « bullée ».

**Est-ce que les bulles change la vitesse du son dans l'eau ?**

### 3.b. Influence des bulles sur la vitesse

On cherche  montrer qualitativement l'influence des bulles sur la vitesse du son dans l'eau.



**Mesure de la vitesse du son dans l'eau avec des bulles :**

**Protocole :** Nous avons repris l'expérience de la mesure de la vitesse du son dans l'eau mais nous y avons ajouté un bulleur d'aquarium.

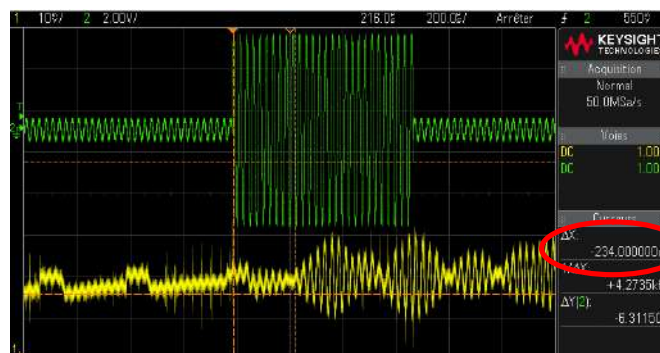


Ici,  $d = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$



Le bulleur d'aquarium

**Exploitation :** La mesure du retard entre les récepteurs donne une mesure directe de la vitesse du son par  $c = \frac{d}{\Delta t}$ .



$\Delta t = 234 \mu\text{s}$

Avec  $d = 9 \text{ cm} = 0,09 \text{ m}$  et  $\Delta t = 234 \mu\text{s}$ , il vient :  $c_{\text{eau+bulle}} = \frac{0,09}{234 \cdot 10^{-6}} = 384 \text{ m.s}^{-1}$

**Conclusion :** La vitesse du son est fortement diminuée et l'on peut conclure que la présence des bulles dans l'eau diminue significativement la vitesse du son dans ce milieu.

**Peut-on prévoir théoriquement cette diminution ?**

### 3.c. Notre modèle théorique de vitesse

**Théorie :** La vitesse du son dans un fluide dépend de sa masse volumique et de la compressibilité :

$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi_s}}$$

Les valeurs de ces deux paramètres diffèrent énormément entre l'air et l'eau.

Eau	$\chi_{\text{eau}} \approx 4,6 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$	$\rho_{\text{eau}} \approx 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$
Air	$\chi_{\text{air}} \approx 7 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}^{-1}$	$\rho_{\text{air}} \approx 1,2 \text{ kg.m}^{-3}$

Dans le mélange, il y a un volume d'air  $V_{\text{air}}$  en petite quantité dans le volume d'eau  $V_{\text{eau}}$ . En notant le volume

total du mélange  $V = V_{\text{eau}} + V_{\text{air}}$ , on peut définir la **fraction volumique d'air** (ou pourcentage) par :

$$\alpha = \frac{V_{\text{air}}}{V}$$

Il faut donc étudier séparément les variations de  $\rho$  et  $\chi$  dans le cas du mélange eau + bulle en fonction de  $\alpha$ .

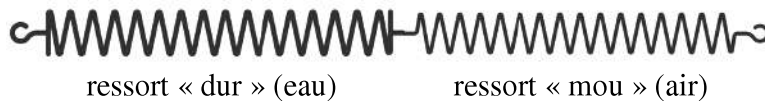
**I – La masse volumique :** La masse volumique du mélange  $\rho$  se détermine avec la masse totale du mélange.

$$m = m_{\text{eau}} + m_{\text{air}} \text{ avec } m_{\text{eau}} = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau}}, m_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}} \text{ et } m = \rho \cdot V$$

Il vient  $\rho \cdot V = \rho_{\text{eau}} \cdot V_{\text{eau}} + \rho_{\text{air}} \cdot V_{\text{air}}$  que l'on peut diviser par  $V$  :

$$\rho = (1 - \alpha) \cdot \rho_{\text{eau}} + \alpha \cdot \rho_{\text{air}}$$

**II – La compressibilité :** La compressibilité du mélange peut être vue comme l'association de deux ressorts ayant des raideurs très différentes.



Expérimentalement, ce ressort équivalent est essentiellement « mou » car il est facile de l'allonger. C'est le même principe pour la compressibilité du mélange eau + air. Il existe une loi simple appelé loi de Wood reliant la fraction volumique et les compressibilités pour le mélange de deux fluides immiscibles comme l'eau et l'air en bulles :

Loi de Wood :

$$\chi = (1 - \alpha) \cdot \chi_{\text{eau}} + \alpha \cdot \chi_{\text{air}}$$

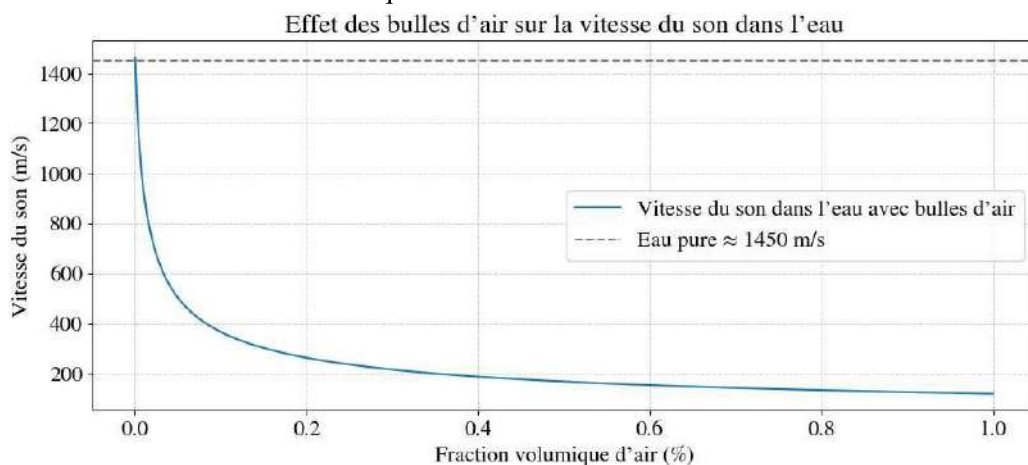
**Conséquence pour un mélange à 1% d'air :**

$$\rho = (1 - 0,01) \times 1000 + 0,01 \times 1,2 = 990 \text{ kg.m}^{-3} \text{ et } \chi = (1 - 0,01) \times 4,6 \cdot 10^{-10} + 0,01 \times 7 \cdot 10^{-6} = 7 \cdot 10^{-8} \text{ Pa}^{-1}$$

Ce petit calcul montre que la masse volumique du mélange varie peu avec les bulles contrairement à la compressibilité qui est multipliée par 100 !

La vitesse du son pour ce mélange à 1% est alors :  $c = 120 \text{ m.s}^{-1}$  soit 10 fois moins que pour l'eau pure...

Afin de mieux visualiser l'influence des bulles, nous avons tracé avec un petit programme Python (voir annexe) la vitesse du son en fonction de la fraction volumique d'air entre 0 et 1%.



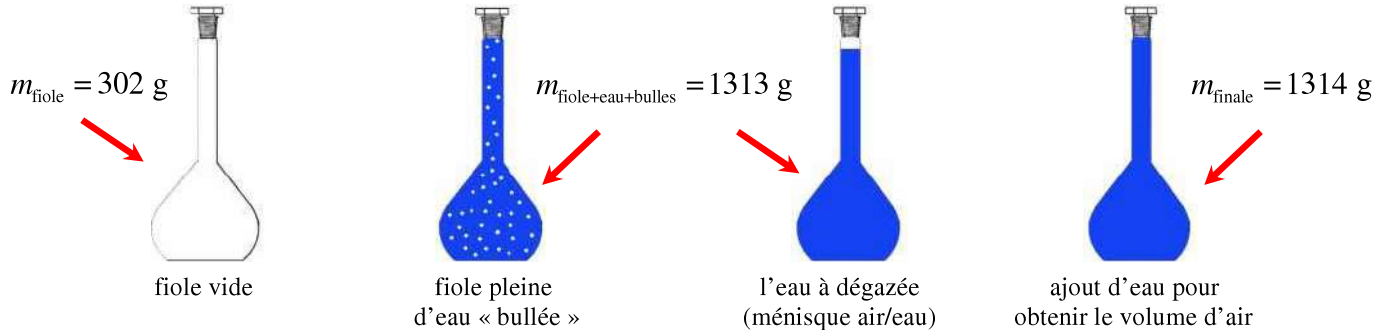
**Conclusion :** Une très faible quantité d'air modifie énormément la compressibilité et donc la vitesse du son.

**Peut-on mesurer la quantité d'air dans notre eau « bullée » ?**

### 3.d. La fraction volumique de bulle dans l'eau chaude

**Protocole :** Avec deux pesées (fiolle vide et fiolle remplie d'eau chaude « bullée »), on détermine la masse (et donc le volume d'eau). Ensuite il faut juste attendre que les bulles remontent en formant un ménisque d'air au dessus.

Pour finir, une dernière pesée donne accès à la petite quantité d'eau ajoutée pour revenir au niveau initial afin de connaître le volume occupé par l'air des bulles.

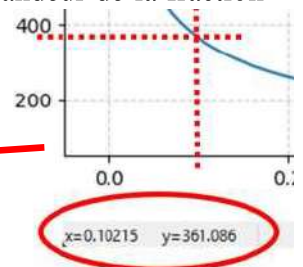


**Exploitation :** La mesure manque de précision en raison de la balance utilisée et de la difficulté de travailler à la goutte près, mais nous avons maintenant un protocole simple pour déterminer un ordre de grandeur de la fraction volumique de l'eau « bullée ». Voir l'annexe pour le détail des calculs de notre expérience.

Avec l'eau chaude « bullée » en sortie de robinet, on trouve :  $\alpha = \frac{V_{\text{air}}}{V} \approx 0,1\%$

À partir de notre modèle (voir page précédente), la vitesse du son est :  $c \approx 360 \text{ m.s}^{-1}$

Ce résultat est très proche de celui attendu lors de notre première analyse.

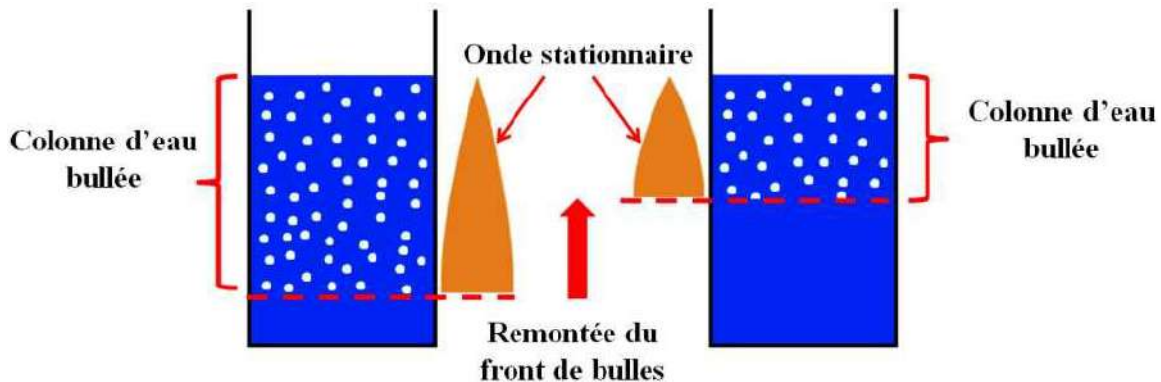


Il faut maintenant établir un modèle théorique.

## IV. NOTRE THÉORIE SUR L'EFFET ALLASONIQUE

### 1. LE MODÈLE

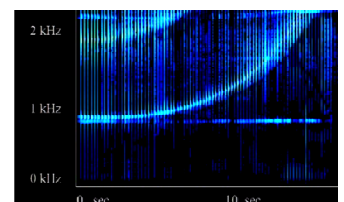
Les fréquences qui augmentent sont dues aux ondes stationnaires dans la colonne de bulles, dont la hauteur diminue au cours du temps.



En effet, avec une hauteur de colonne d'eau bullée qui diminue au cours du temps (la remontée du front de bulles),

la fréquence de l'onde stationnaire augmente suivant la formule :  $f(t) = \frac{c}{4L(t)}$

Pour résumer :  $L(t) \nearrow \Rightarrow f(t) = \frac{c}{4L(t)} \searrow$  conformément à l'allure du sonagramme



Reste à confronter notre modèle avec une ultime expérience que nous allons réaliser avec une éprouvette pour avoir une grande hauteur d'eau.

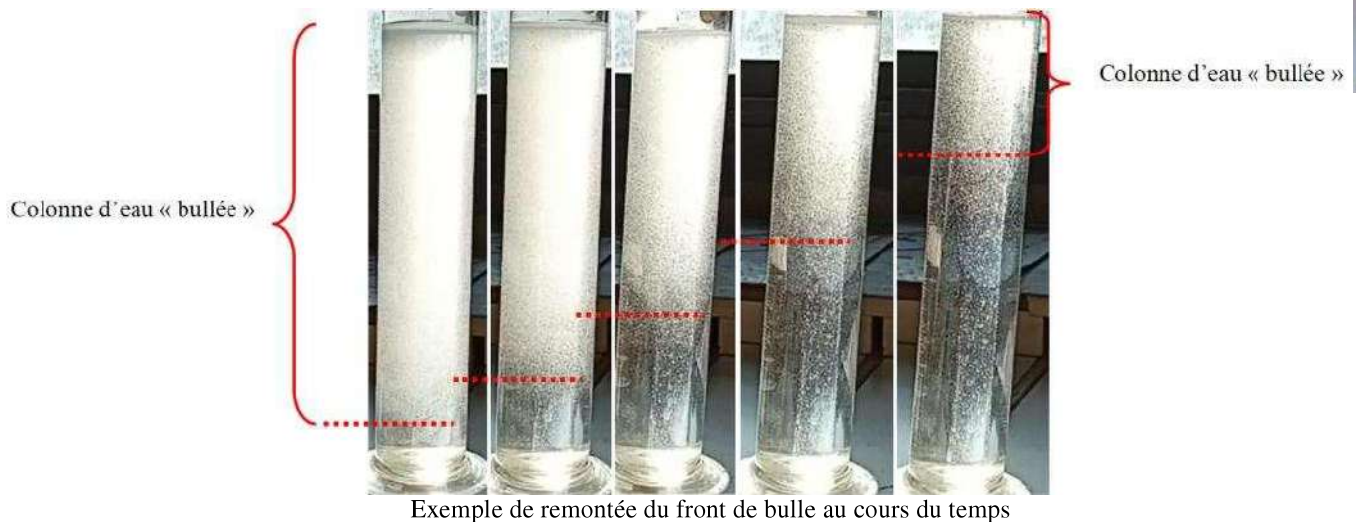
## 2. EXPÉRIENCE FINALE

Pour obtenir un temps de mesure suffisant de la hauteur de la colonne de bulles durant l'effet allasonique, nous utilisons une **grande éprouvette graduée** (donc une grande colonne d'eau).

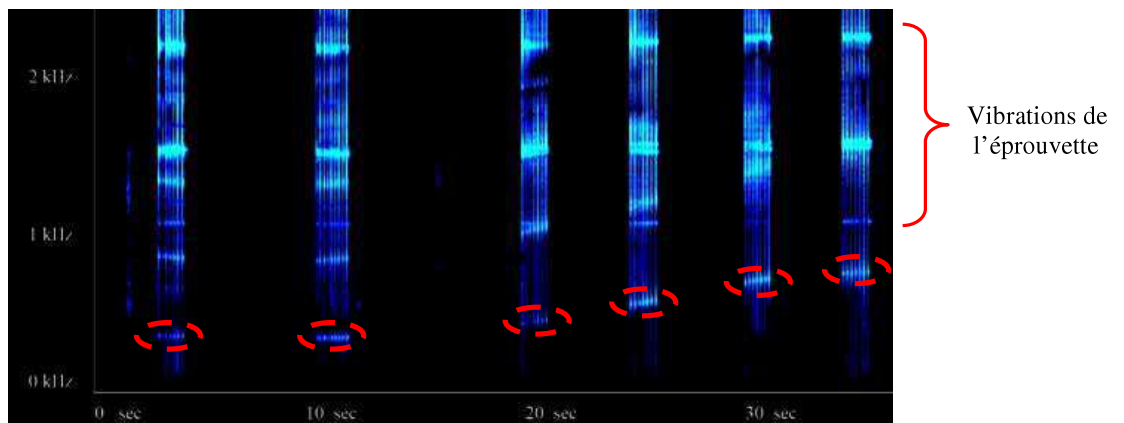
### 2.a. Mise en place de l'expérience

**Protocole :** Nous remplissons l'éprouvette du mélange eau « bullée » en sortie du robinet sur une hauteur de 27 cm. De plus nous traçons des repères le long de la hauteur à 3, 7, 11, 14, 18 et 20 cm qui vont permettre de suivre la remontée de front de séparation eau pure / eau « bullée ».

L'expérience se déroule alors comme suit : Lorsque le front de bulles atteint un repère prédéfini, nous tapons sur l'éprouvette. L'analyse de l'évolution du sonagramme permet d'avoir la fréquence et le temps correspondant à chaque repère.



**Résultats :** Voici le sonagramme de l'expérience sur lequel on retrouve les vibrations de l'éprouvette par comparaison avec le sonagramme de l'éprouvette avec 27 cm d'eau sans bulles et notre fréquence variable causée par l'effet allasonique (on voit essentiellement la plus basse fréquence ici).



Éprouvette avec l'eau « bullée » pour les repères (3 - 7 - 11 - 14 - 18 - 20 cm)

Les mesures du sonagramme sont les suivantes :

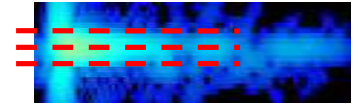
Incertitude

Temps (s)	4	10	20	24	30	34	$\Delta t = \pm 36 \text{ ms}$
Colonne d'eau « bullée » (cm)	24	20	16	13	9	7	$\Delta L = \pm 1 \text{ cm}$
Fréquence (Hz)	345	335	414	562	717	750	$\Delta f = \pm 30 \text{ Hz}$

**Incertitudes des mesures :** Pour toutes nos mesures, il y a une incertitude liée à trois facteurs.

- Le temps : La précision est directement donnée, soit  $\Delta t = \pm 36$  ms **Time (msec) : 20036 +/- 36**

- La fréquence : Pour cette mesure, bien que Spectrogram 16 affiche une résolution de  $\pm 6$  Hz, un zoom sur le spectre montre une largeur plus importante. En encadrant la zone au mieux (voir ci-contre) et en maximisant les écarts (par exemple  $(431+6) - (414-6) = 29$  Hz), on estime l'incertitude  $\Delta f = \pm 30$  Hz.



Les encadrements en fréquence et hauteur

**Frequency (Hz) : 397 +/- 6.0 414 +/- 6.0 431 +/- 6.0**

- La hauteur de la colonne bullée : Il est difficile de faire une séparation nette eau bullée / eau non bullée. Il semble réaliste de prendre une marge de 2 cm soit  $\Delta L = \pm 1$  cm.

**Place à l'exploitation.**

**2.b. Exploitation**

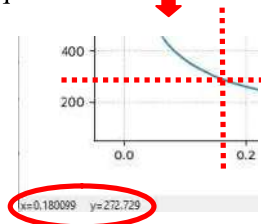
L'exploitation de ces résultats comporte plusieurs étapes.

**I – La vitesse du son dans l'eau « bullée » :** Dans l'hypothèse d'une onde stationnaire dans la colonne d'eau « bullée », la fréquence est liée à la hauteur de la colonne d'eau par :

$$f(t) = \frac{c}{4L(t)}$$

On détermine alors la vitesse du son pour chaque point avec  $c = f \times 4L$  puis la fraction volumique d'air.

Colonne d'eau « bullée » (cm)	24	20	16	13	9
Fréquence (Hz)	345	335	414	562	717
Vitesse (m/s)	330	270	265	290	260
Fraction volumique d'air (%)	0,12	0,18	0,19	0,16	0,20



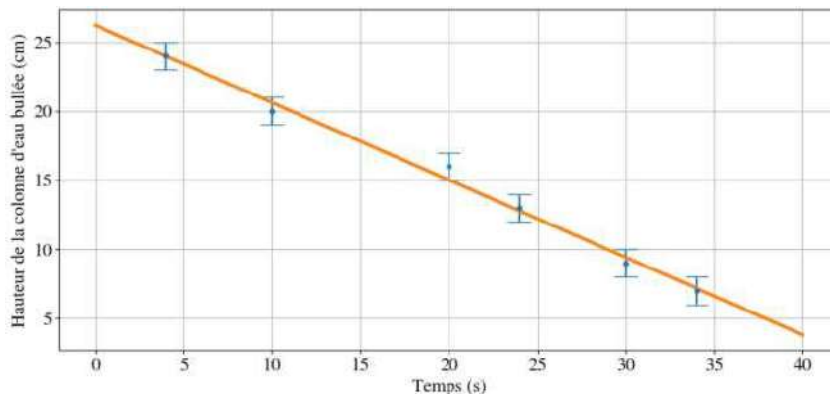
Méthode pour déterminer  $\alpha$  à partir de la vitesse

Excepté le premier point, la vitesse du son dans l'eau « bullée » est en moyenne de  $c \approx 270$  m.s<sup>-1</sup> correspondant à une fraction volumique d'air dont l'ordre de grandeur est  $\alpha \approx 0,18\%$ . Ce résultat est parfaitement compatible avec notre précédente mesure à la fiole.

**Conclusion :** On peut en conclure que c'est vraisemblablement l'ensemble des bulles qui monte au cours du temps sans changer notablement la fraction volumique d'air. Concernant le premier point, il n'y a pas de raison de penser à une erreur de mesure et il faudra donc revenir dessus pour l'expliquer dans un deuxième temps...

**II – La vitesse de remontée du front de bulles :**

En traçant la hauteur en fonction du temps, on peut déterminer la vitesse de remontée du front de bulles.



L'équation de la régression linéaire passant au mieux des points expérimentaux est :  $L = -0,56 \times t + 26,2$

Le coefficient de la pente donne directement la vitesse (en cm.s<sup>-1</sup>), soit :  $v_{\text{bulle}} = 0,56$  cm.s<sup>-1</sup> =  $5,6 \cdot 10^{-3}$  m.s<sup>-1</sup>

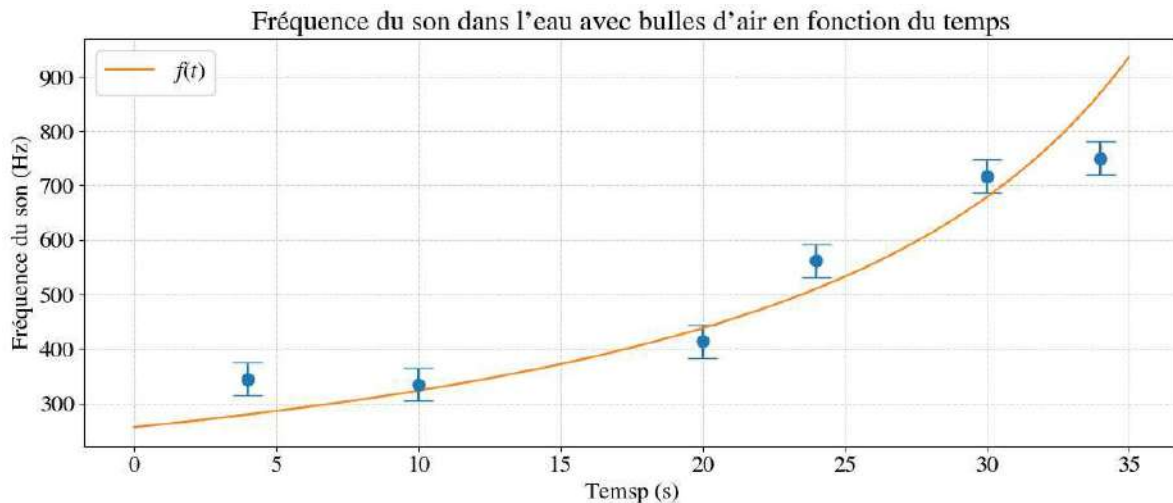
**Avec notre modèle et ces données, il est possible de confronter modèle et expérience.**

## 2.c. Modèle vs expérience

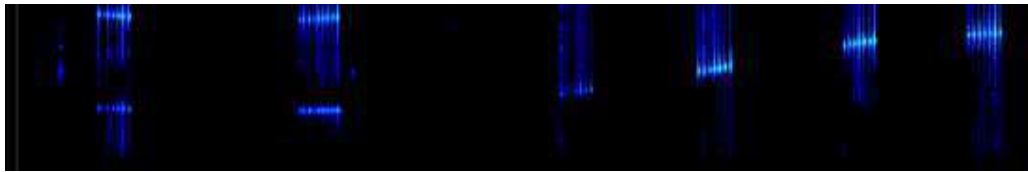
**Le modèle final :** Connaissant la vitesse de remontée du front de bulles au cours du temps et la vitesse du son dans l'eau « bullée », il est possible de simuler l'évolution de la fréquence en fonction du temps avec python.

Le principe de la simulation est le suivant :

- La hauteur d'eau s'exprime par  $L(t) = L_0 - v_{\text{bulle}} \times t$  avec  $v_{\text{bulle}} = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ m.s}^{-1}$  et  $L_0 = 0,27 \text{ m}$
- La fréquence  $f(t) = \frac{c}{4L(t)}$  avec  $c = \sqrt{\frac{1}{\rho \chi_s}}$
- $\rho$  et  $\chi_s$  dépendent de la fraction volumique  $\alpha \approx 0,18\%$  qui reste constante



Courbe modélisée et points expérimentaux



**Conclusion :** Compte tenu des incertitudes, les points expérimentaux sont très proches de la courbe théorique. Le résultat est très satisfaisant à première vue et conforte notre modèle.

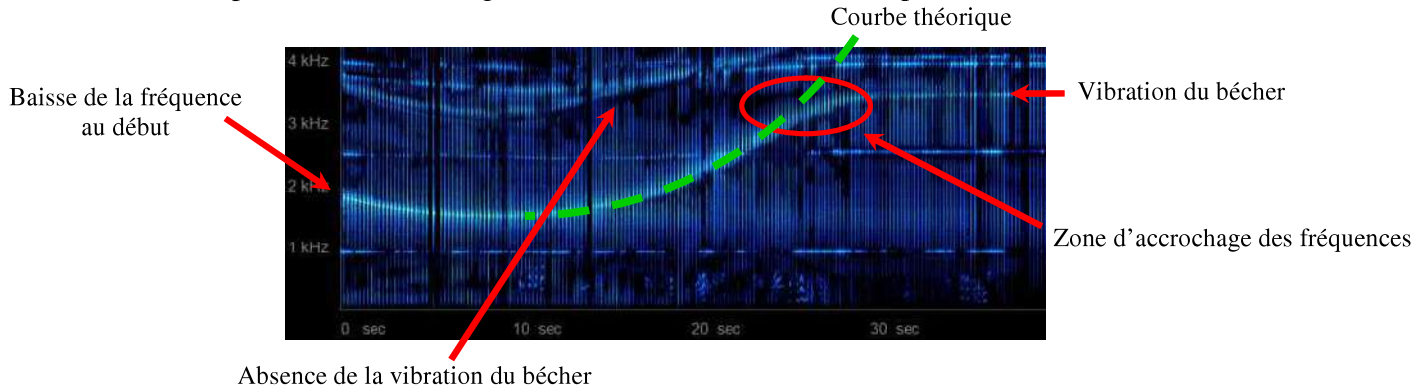
## 3. RETOUR D'EXPÉRIENCE

L'ensemble de ce travail nous a permis de tenter d'expliquer l'effet allasonique. On peut se satisfaire de ce résultat mais il y a deux comportements expérimentaux bizarres !

**1 -** Dans le cas de l'eau chaude en sortie de robinet, nous avons remarqué que le début de l'expérience commence souvent par une baisse de fréquence avant de remonter suivant notre loi. Ce phénomène n'est jamais présent avec les autres méthodes de « bullages » comme l'eau + liquide vaisselle ou la mousse à raser. Comment l'expliquer ?

**2 -** Les fréquences de la colonne d'eau « bullée » s'arrêtent au bout d'un moment. Celui-ci correspond visiblement à l'égalité entre la fréquence de l'eau « bullée » et celle du verre lui-même. Au passage, on note que la fréquence du verre correspondante n'est pas visible au début. Quelle est la raison de ce phénomène.

Pour illustrer des deux points, voici le sonagramme d'un b cher de 9 cm rempli avec de l'eau chaude « bullée » :



**Un début de réponse :** Voici nos idées pour répondre à ces deux points.

1 - Nous avons remarqué que lorsqu'on commence à touiller avec la cuillère dans l'eau chaude « bullée », il y a très rapidement plus de bulles qui apparaissent. Visiblement, le fait de bouger aide l'eau chaude à dégazer. Ensuite, on retrouve un comportement normal identique aux autres méthodes de bullages. C'est ce phénomène qui nous permet d'expliquer la « bizarrerie » de la mesure du premier point de notre expérience finale.

Colonne d'eau « bullée » (cm)	24	20
Fréquence (Hz)	345	335
Vitesse (m/s)	330	270
Fraction volumique d'air (%)	0,12	0,18

Phase de dégazage initiale

Par l'utilisation de notre modèle, la mesure de la vitesse du son nous donne accès à une fraction volumique d'air  $\alpha \approx 0,12\%$  au début de l'enregistrement. Celle-ci va ensuite évoluer jusqu'à  $\alpha \approx 0,18\%$  confirmant ainsi l'hypothèse d'un dégazage initial avant sa stabilisation.

2 – Concernant l'absence de vibration du verre pendant l'effet allasonique (avant sa réapparition finale), une piste évoquée avec nos professeurs serait un problème d'oscillateurs couplés (les vibrations de l'eau et les vibrations du verre). Une modélisation du système eau (+ bulle) / verre par une association de ressorts permet d'expliquer ces phénomènes.

L'association du ressort correspondant à l'eau (+ bulle) et celui du verre est équivalent à un ressort unique tel que :

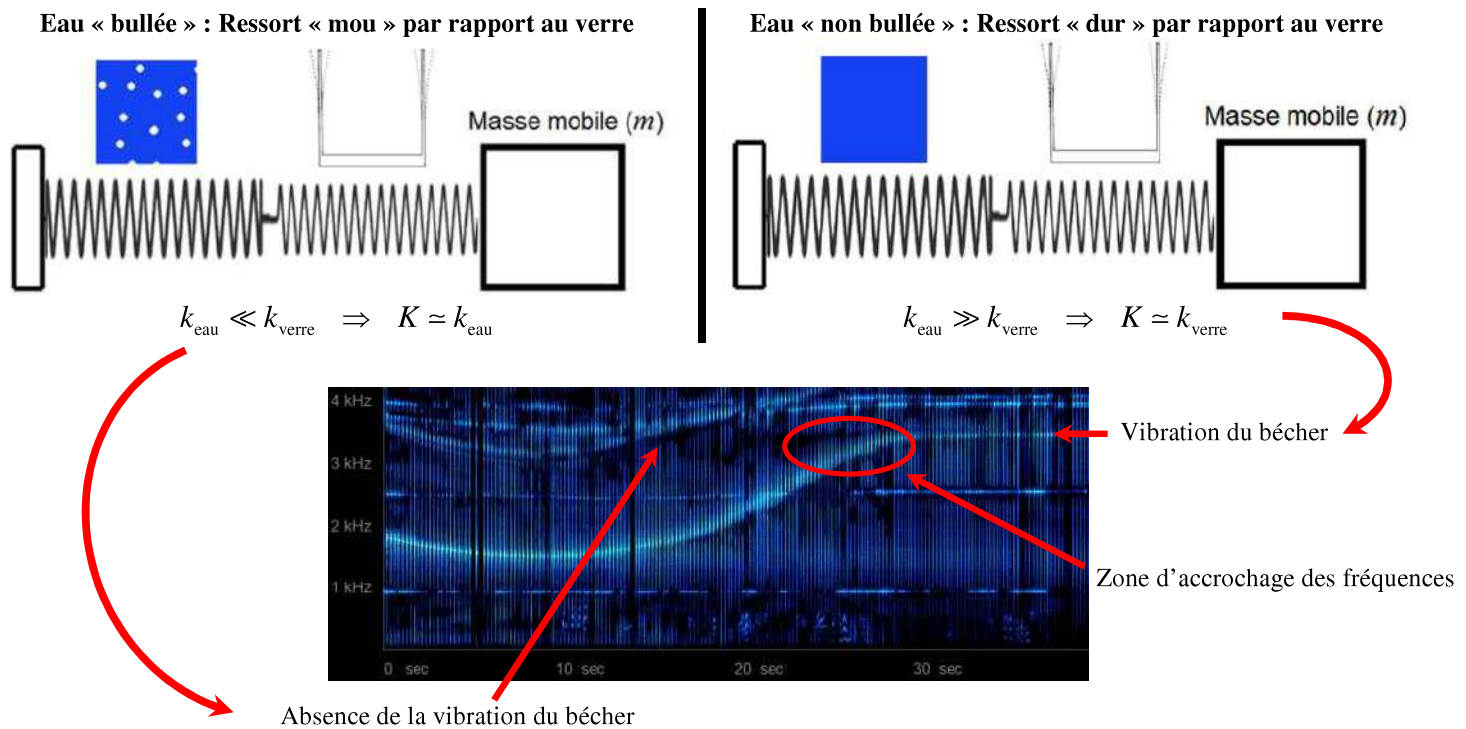


Dans le cadre de ce modèle, la fréquence de vibration du système est donnée par :  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}}$

En fonction de la quantité de bulle dans l'eau, celle-ci change compl tement de comportement en termes de raideur. Avec des bulles, l'eau devient un ressort « mou » par rapport au verre. Inversement, en l'absence des bulles, l'eau devient un ressort « dur » par rapport au verre.

Pour résumer :

- Avec des bulles :  $k_{\text{eau}} \ll k_{\text{verre}} \Rightarrow K \approx \frac{k_{\text{eau}} \cdot k_{\text{verre}}}{k_{\text{verre}}} = k_{\text{eau}}$  et la fréquence est celle de l'eau bullée  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{eau}}}{m}}$
- Sans les bulles :  $k_{\text{eau}} \gg k_{\text{verre}} \Rightarrow K \approx \frac{k_{\text{eau}} \cdot k_{\text{verre}}}{k_{\text{eau}}} = k_{\text{verre}}$  et la fréquence est celle du verre  $f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{\text{verre}}}{m}}$



L'association des ressorts permet donc au système d'avoir deux domaines de fonctionnement différents (et donc de fréquence différentes) en fonction de la quantité de bulle.

## CONCLUSION

L'ensemble de ce travail nous a permis de découvrir la démarche scientifique sur une situation amusante que tout le monde peut reproduire chez lui.

Notre modélisation donne un résultat très satisfaisant dans le cas de l'eau chaude bullée. Reste à découvrir et modéliser les autres situations de « bulles » évoquées dans notre mémoire. En effet, la dynamique de disparition des bulles n'est pas forcément la même pour les autres cas et cela donne plein de possibilités de faire des découvertes sur l'effet allasonique. Donc affaire à suivre ...



## REMERCIEMENTS

Nous remercions chaleureusement nos professeurs accompagnateurs, Hervé IDDA et Olivier POLIDORO, pour leur disponibilité, leurs conseils précieux, leur exigence scientifique et leur accompagnement constant, sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir dans de telles conditions.

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à Madame LAGADEC, Provisoire de notre lycée, pour son soutien et la confiance qu'elle nous a accordée tout au long de ce projet.