Briser la glace !

Auteurs : Brégeon Pierre   Lacroix Arthur   Latour Lou-Andréa

RÉSUMÉ

Le phénomène de résonnance est particulièrement impressionnant à grande échelle. Nous pourrions imaginer faire s'écrouler un stade de football entier si l'ensemble des supporters se mettaient à sauter en même temps à un rythme bien précis ! Néanmoins, cela reste tout aussi grisant à plus petite échelle. Savoir que des ondes absolument invisibles à l'œil nu sont capables, dans certaines conditions, d'avoir l'énergie de briser de la matière et finalement de rendre leur présence bien visible grâce à l'effet stroboscopique est passionnant à mettre en évidence.

Réussir à briser du verre à partir d'ondes acoustiques est un bon moyen de rendre compte de ce phénomène. Nous avons donc décidé de nous y confronter.

Pour réaliser ce projet, nous avons dû monter un dispositif expérimental complet composé d'une boîte remplie de mousse pour réduire les réflexions parasites extérieures puis nous avons mis en place un système de prise de vu pour essayer d'enregistrer le moment si précieux où le verre commence à danser lors de son entrer en résonnance.

Mais, avant cela nous avons dû comprendre ce phénomène sur des cas plus simples à une et deux dimensions et nous avons réalisé des dispositifs expérimentaux pour révéler concrètement certaines propriétés.

INTRODUCTION

Lors de l'élaboration de notre TPE de première qui traitait des ponts, nous avons pu étudier l'effondrement du pont de la Basse-Chaîne lié au passage d'un régiment de soldat. Nous nous sommes alors demandé comment il était scientifiquement possible de déformer autant de matière, surtout celle d'un pont considérée comme très solide. Ainsi, quand nous avons dû choisir un sujet pour nos olympiades de physique nous avons décidé de nous pencher sur ce phénomène plus que déconcertant.

Comme à notre échelle de lycéen il est compliqué d'étudier expérimentalement un vrai pont entrant en résonnance nous avons eu l'idée de nous concentrer sur un objet bien plus banal…

Le “mythe” de la Castafiore, qui pourrait soi-disant briser du verre, dans les bandes-dessinées Tintin, est très répandu. Mais qu'en est-il réellement ? Peut-on imaginer casser un verre à l'aide du son de sa voix, ou d'une onde sonore, ou n'est-ce qu'une illusion d'Hergé, en d'autres termes : peut-on réellement briser un verre à l'aide d'une onde sonore ? C'est à cette expérience connue que nous allons nous confronter.

Nous essaierons d'étudier le cadre dans lequel ceci est réalisable, nous en expliquerons les causes, notamment avec des applications dans les 3 dimensions, puis nous présenterons la manière dont nous avons construit notre dispositif expérimental, et comment nous avons réussi à briser notre verre.

Table des matières

I. Applicationsà une et deux dimensions

Présentation générale : les ondes

Premièrement, nous allons commencer par définir les caractéristiques des notions importantes de notre sujet.
Les ondes sont au centre de nos expériences, celles-ci sont caractérisées par deux paramètres principaux :

- leur période spatiale aussi appelée « longueur d'onde » s'exprime en mètres (*m*) et correspond à la distance lambda (λ) parcourue par l'onde pendant une durée T.
- leur période temporelle s'exprime en seconde (*s*), elle correspond à la plus petite période entre deux vibrations identiques en un point donné.

Ces deux caractéristiques sont liées par une formule comprenant la vitesse de propagation qui s'exprime en mètres par secondes ($m.s^{-1}$) et se note *v* : $v = \frac{\lambda}{T}$

Une onde acoustique est une perturbation mécanique qui se propage dans un milieu matériel, elle le compresse puis le dilate. Ces ondes de pression peuvent se diviser en deux groupes. Les ondes longitudinales, qui se caractérisent par une vibration de leurs particules qui va dans le même sens que la propagation de l'onde. L'image ci-dessous est une capture d'écran d'une vidéo montrant la propagation d'une onde longitudinale dans un milieu à deux dimensions. On peut y voir une sorte de « vague » partant du point central (lieu du départ de l'onde). Cela représente en fait l'agitation des particules. Nous observons bien qu'elles se répartissent tout autour du point donc dans toutes les directions à partir du point mais toujours dans le sens de propagation que l'onde émise. Si les composants de l'onde vibrent perpendiculairement au sens de propagation de l'onde, alors c'est une onde dite transversale. C'est le type d'ondes appliquées lors de l'expérience de la corde de Melde par exemple.

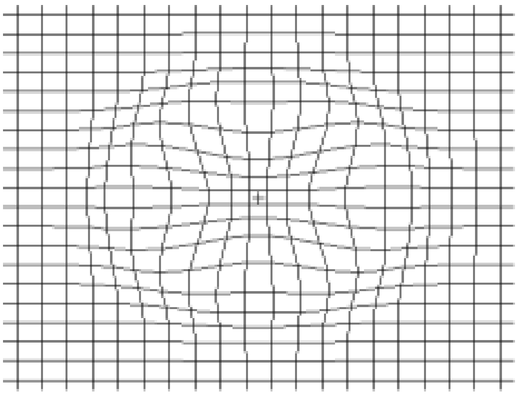


Schéma représentant la propagation d'une onde longitudinale dans un milieu à deux dimensions

Cependant une onde sonore est forcément longitudinale, puisqu'elle se propage dans le même sens que la déformation du milieu, c'est donc ce type d'onde que nous allons utiliser pour casser notre verre. Mais pour cela il faut que l'onde ait la même fréquence que la fréquence propre du verre.

Nous pouvons nous demander qu'est-ce que la fréquence propre d'un objet ?

Chaque objet possède une fréquence propre à laquelle ses molécules vibrent plus naturellement, certaines ondes sonores engendrent une telle vibration que les molécules cherchent à « s'échapper » de l'objet (comme les ondes sur l'eau qui s'étendent autour d'un point, sans limite).Or, si on fournit à un système de l'énergie régulièrement à la même

fréquence que sa fréquence propre, l'amplitude des oscillations va augmenter, on appelle cela la résonnance. Cela peut conduire à la rupture du solide. Pour que cette énergie soit fournie régulièrement et sans atténuation, il existe une forme d'onde acoustique satisfaisant ces caractéristiques : ce sont les ondes sinusoïdales. Par conséquent, l'onde que nous utiliserons pour briser le verre sera une onde sinusoïdale. Elle est la plus adaptée pour notre expérience car elle est à la base de tous les sons, elle est donc considérée comme étant « pure ».
Le son « pur » produit par cette onde peut être défini par :

- sa fréquence qui est définie comme le nombre de fois qu'un système périodique se reproduit (ici la compression et la dilatation du milieu) par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz) et se note *f*. La fréquence est également l'inverse de la période temporelle, nous pouvons donc écrire :
$$f = \frac{1}{T}$$
- son amplitude qui s'exprime en pascals (Pa), elle représente l'écart entre la surpression et la dépression acoustique. Lors de nos calculs nous allons noter cette amplitude *A.*

A. Application à une dimension

1) Les ondes stationnaires

Visuellement si l'on souhaitait observer une onde stationnaire nous aurions l'impression que certains éléments sont fixés dans le temps. En effet, lors de la propagation d'une onde le long d'une corde dont l'on va nommer les extrémités A et B (considérons que ces deux points sont fixes), la corde va subir deux types d'ondes :
- les ondes incidentes (qui se propagent du point A jusqu'au point B)
- les ondes réfléchies (qui se diffusent du point B jusqu'au point A).

Pour la plupart des longueurs d'ondes ce phénomène ne va pas être visible, mais pour certaines longueurs d'ondes bien précises la valeur de l'amplitude et de la fréquence des deux types d'ondes seront les mêmes. L'amplitude de l'onde stationnaire résulte donc de l'addition des ondes réfléchies et incidentes.

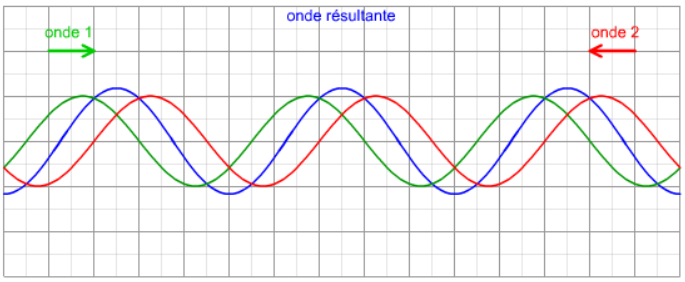
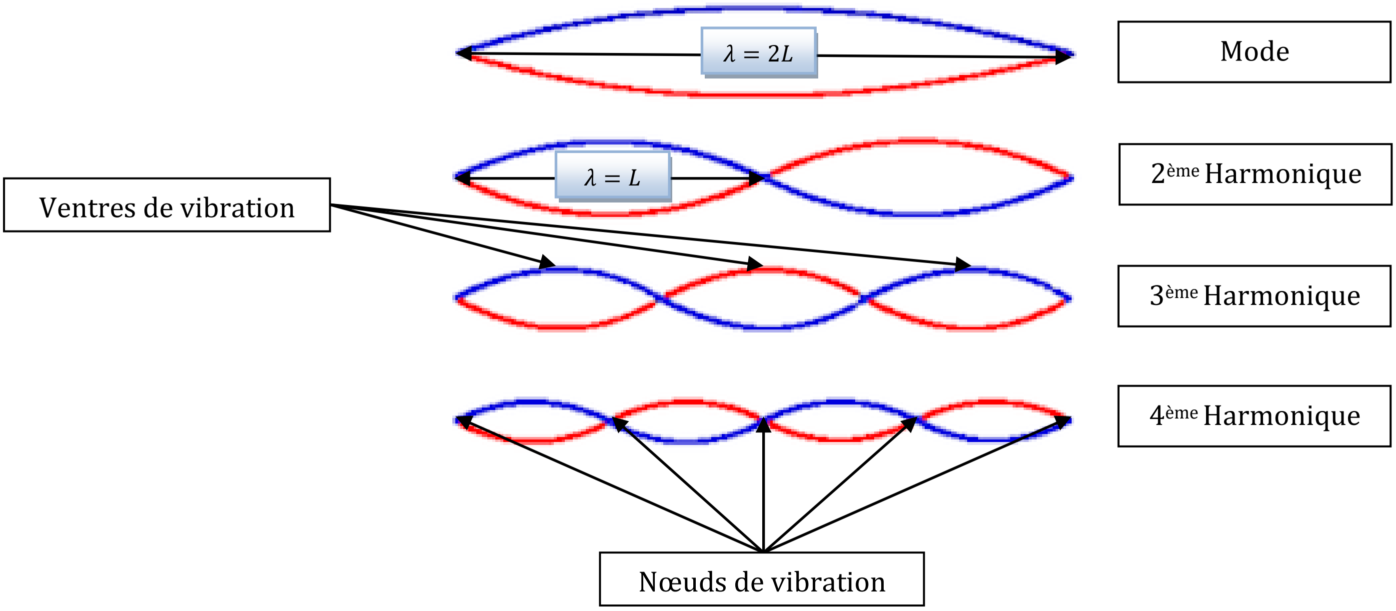


Schéma de représentant la superposition de 2 ondes se propageant en sens contraire

Analyse du schéma: l'onde 1 verte représente l'onde incidente se déplaçant de gauche à droite et l'onde 2 rouge correspond à l'onde réfléchie revenant dans le sens contraire de l'onde 1. L'onde bleue quant à elle represente l'onde stationnaire résultant des deux ondes précédentes.

A partir de cette définition nous pouvons concevoir théoriquement l'expérience célèbre de la corde de Melde avant de la réaliser. Grâce à la longueur de la corde nous pouvons normalement établir la longueur d'onde correspondant au mode fondamental, c'est-à-dire à la plus grande longueur d'onde provocant une onde stationnaire. Elle correspond au double de la distance séparant le point A du point B puisque l'amplitude maximale se localise au milieu des deux points. Quand ce mode est appliqué nous pouvons théoriquement observer deux nœuds au niveau des point fixes A et B (l'amplitude y est nulle) et un seul ventre (point où l'amplitude est maximale). En poursuivant dans cette voie, nous pouvons supposer que si nous voulons obtenir trois nœuds la longueur d'onde idéale serait égale à la taille exacte de la corde puisque c'est sur la longueur de la corde que nous avons une longueur d'onde complète. Nous pouvons donc admettre la formule suivante : $\lambda_n = \frac{2L}{n}$ où L correspond à la longueur de la corde et *n* est un entier naturel et représente le énième harmonique (un harmonique correspond au nombre de ventres dans l'onde stationnaire souhaitée). Durant l'expérience de la corde de Melde nous allons appliquer cette formule est vérifier sa véracité.

Schéma représentant les résultats théoriques de l'expérience de la corde de Melde



Avant de réaliser cette expérience il nous faut encore comprendre l'équation de d'Alembert et démontrer mathématiquement la formule trouvée graphiquement.

2) L'équation de d'Alembert unidimensionnelle

L'équation de d'Alembert sert à étudier la variation dans le temps d'un phénomène ondulatoire. Par conséquent, elle dépend de deux facteurs : de la période spatiale et de la période temporelle. Nous allons nous en servir dans le cadre des ondes se situant dans le domaine à une dimension, d'où son nom « équation à une dimension ». Dans le cas de l'expérience de Melde nous avons l'extrémité de la corde fixée (si la masse est suffisamment lourde), d'abscisse $x = L$, tandis que de l'autre extrémité est reliée à un vibreur électrique qui génère des ondes harmoniques (sinusoïdales).

On sait que l'onde notée ψ, s'écrit sous la forme $\psi(x,t) = A\sin(kx - \omega t + \phi)$
ψ est solution si l'équation de d'Alembert est vérifiée, cette équation s'écrit:

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} - \frac{1}{V^2} \times \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = 0$$

On vérifie que ψ est bien solution de l'équation de d'Alembert :

$$\frac{\partial\psi}{\partial t} = Asin(kx) \times \omega \cos(\omega t + \phi) \frac{\partial\psi}{\partial x} = Asin(\omega t) \times kcos(kx + \phi)$$

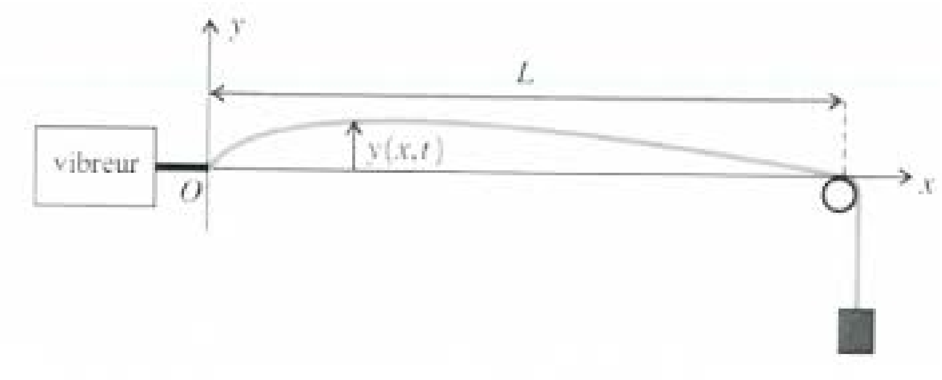
$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = Asin(kx)\omega \times (-\omega \sin(\omega t + \phi)) \frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = Asin(\omega t)k \times \left(-ksin(kx + \phi)\right)$$

Or ici $A\sin(kx - \omega t + \phi)$ représente l'onde, on a donc :

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -\omega^2 A\sin(kx - \omega t + \phi) = -\omega^2\psi$$

$$\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} = -k^2 A\sin(kx - \omega t + \phi) = -k^2\psi$$

Nous calculons ensuite la somme de $\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2} - \frac{1}{V^2} \times \frac{\partial^2\psi}{\partial t^2} = -\psi\left(k^2 - \frac{\omega^2}{v^2}\right)$ de manière à respecter l'équation de d'Alembert et dans le même temps avoir des résultats utilisables nous écrivons $\psi \neq 0$ on a donc : $k^2 - \frac{\omega^2}{v^2} = 0$soit $\omega = k \times v$



Représentation schématique de l'expérience de la corde de Melde dans un repère orthonormé (O ;y ;x) avec L pour la longueur de la corde

Nous avons donc deux conditions, les conditions aux limites telles que :

- - y(0,t)=0 quelque soit t
- - y(L,t)=0 quelque soit t

Puisque la corde de Melde est fixée à ses deux extrémités, ce sera donc une onde stationnaire pour laquelle les nœuds et les ventres sont fixes.
Cela nous donne $y(x,t) = \int(x)\, g(t)$
On obtient $f''(x) \times g(t) - \frac{1}{v^2} \times f(x) \times g''(t) = 0 \rightarrow \frac{f''(x)}{f(x)} = \frac{1}{v^2} \times \frac{g''(t)}{g(t)}$
Ici, nous avons d'un coté $\frac{f''(x)}{f(x)}$qui ne dépend que de x et de l'autre $\frac{1}{v^2} \times \frac{g''(t)}{g(t)}$qui lui dépend que de *t*.
On en conclut donc que $\frac{f''(x)}{f(x)} = \frac{1}{v^2} \times \frac{g''(t)}{g(t)} = K$avec Kune constante on peut donc écrire cette équation en deux équations à une seule variable.

$$\begin{cases} \dfrac{f''(x)}{f(x)} = K \Rightarrow f''(x) = K \times f(x) \Rightarrow f''(x) - k \times f(x) = 0 \\ \dfrac{1}{v^2} \times \dfrac{g''(t)}{g(t)} = K \Rightarrow g''(t) = k \times v^2 \times g(t) \Rightarrow g''(t) - k \times v^2 \times g(t) = 0 \end{cases}$$

Or cette constante et négative car si *k* est positif on trouve :
lim f(x)= 0 ou lim f(x)= $\pm\infty$
Cela ne correspond donc pas à ce que l'on cherche au niveau physique.
Nous prenons donc *K* négatif. *K* s'écrit donc sous la forme $K = -k^2$

Nous obtenons :

$f"(x) + k^2 f(x) = 0$

On remarque que c'est l'équivalent d'un oscillateur harmonique nous avons donc :

$f(x) = A\cos(kx + \varphi)\ g(t) = B\cos(\omega t + \varphi)$

$g"(x) + k^2 \times v^2 \times g(x) = 0$

Pour g on pose $\omega^2 = -Kv^2 = k^2v^2$ à l'aide du résultat calculé précédemment: $\omega = k \times v$ nous trouvons : $g"(t) + \omega^2 \times g(t) = 0$. On peut donc écrire :

Ici, A et B sont deux constantes (que nous réécrirons sous la forme A) nous obtenons par produit :

$$f(x)g(x) = A\cos(kx + \varphi)\cos(\omega x + \varphi)$$

À partir de cela nous pouvons déduire les modes propres de la corde, on prend x = 0 ce qui nous donne $\cos(\varphi) = 0$et d'après le cercle trigonométrique $\varphi = \frac{\pi}{2}\, ou - \frac{\pi}{2}$nous choisirons d'utiliser $-\frac{\pi}{2}$que nous pouvons réécrire :$\cos\left(kx - \frac{\pi}{2}\right) = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + kx\right) = \sin(kx)$
On prend ensuite x = L, ce qui nous donne $\sin(kl) = 0$ et sur un cercle trigonométrique $nous\ trouvons\ kL = n\pi$.
D'après nos résultats précédents,$\omega = k \times c k = \frac{\omega}{c}$or, on sait que $c = \lambda \times v$, on a donc

$k = \frac{\omega}{\lambda \times v}$. Mais nous savons également que $2\pi = \frac{\lambda}{v}$ ce qui nous donne $k = \frac{2\pi}{\lambda}$.

En remplaçant dans la formule précédente on trouve $\frac{2\pi}{\lambda}\mathrm{L} = \mathrm{n}\pi$ ce qui nous permet de conclure que $L = n \times \frac{\lambda}{2}$.

La longueur totale est donc un multiple entier de la demi-longueur d'onde, des fuseaux. C'est avec ce résultat que l'on retrouve toutes les fréquences ainsi que la fréquence propre de la corde.

3) Notre expérience de la corde de Melde

Dans le paragraphe précédent nous avons évoqué l'expérience de la corde de Melde sans réellement expliquer en quoi elle consiste. La corde de Melde est une corde

usuellement définie comme horizontale dont une des deux extrémités est reliée à un générateur B.F tandis que son autre extrémité passe par la gorge d'une poulie puis se termine par une masse suffisamment lourde pour créer une tension dans la corde de façon à ce que le point de la corde sur la poulie puisse être considéré comme fixe. Les ondes produites sur la corde par le G.B.F se propagent jusqu'à la poulie, la masse tend alors la corde, de sorte que l'onde se réfléchit et reparte dans le sens opposé, l'onde réfléchie s'ajoute alors à l'onde incidente pour créer une onde stationnaire. L'onde stationnaire possède alors des points fixes appelés nœuds et des zones d'amplitudes maximales nommées ventres. Pour notre expérience, afin de générer une fréquence précise nous avons doté notre montage d'un oscilloscope.
Les caractéristiques de notre corde étaient :

- une longueur L=173.3 cm
- une masse linéique $\mu=4.93 \times 10^{-3}$ kg.m^{-1}
- une tension mécanique $T=m_{poids} \times g=1.4995 \times 10^{-1} \times 9.81=1.47$ N

Puis nous avons commencé à appliquer différentes fréquences à la corde dans le but de trouver le mode fondamental rencontré précédemment. Nous avons alors remarqué que les ventres les plus importants se trouvaient environ à une fréquence de 5 Hz. Ce schéma, c'est à dire 2 nœuds (aux extrémités de la corde) et un ventre correspond à une fréquence bien particulière appelée fréquence fondamentale nous avons alors L= c/2. Nous avons donc calculé la fréquence fondamentale théorique de notre corde :

$$F(x) = \frac{1}{2}L \times \sqrt{\frac{T}{\mu}} = 4{,}98\ Hz$$

Nous avons également remarqué que le nombre de nœuds augmentait lorsqu'on ajoutait 5Hz à la fréquence. Par la suite nous avons commencé à prendre des mesures ciblées sur les multiples entiers de 5 et avons obtenu le tableau de valeur suivant :

Nb de ventres	f1	f2	f3	f4	Moyenne	Écart-type		Imprécision	Moy/Nb ventre
1	5,00	5,62	5,35	5,13	5,27	0,23	±	0,47	5,27
2	10,20	11,06	10,35	10,33	10,49	0,34	±	0,67	5,24
3	15,84	16,12	15,57	15,60	15,78	0,22	±	0,44	5,26
4	21,20	20,20	22,47	21,65	21,38	0,82	±	1,64	5,35
5	26,88	25,77	26,73	26,00	26,35	0,47	±	0,94	5,27
6	30,86	30,86	30,60	31,91	31,06	0,50	±	1,01	5,18

<u>Tableau de valeurs des fréquences testées</u>

Nous en avons donc conclu que l'expérience mettait en valeur la fréquence propre de la corde de Melde.
On remarque que la fréquence des oscillations ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs pour que des nœuds apparaissent, ces fréquences sont toutes des multiples de la fréquence fondamentale minimale de la corde.

Après avoir réalisé l'expérience nous avons voulu vérifier si nos résultats étaient proches des calculs théoriques. En reprenant les formules trouvées précédemment nous avons réalisé le tableau ci-dessous :

$f_{théorique}1=$	4,98
$f_{théorique}2=$	9,97
$ft_{héorique}3=$	14,95
$f_{théorique}4=$	19,93
$f_{théorique}5=$	24,92
$f_{théorique}6=$	29,90

Tableau des valeurs des fréquences théoriques en Hertz

Nos valeurs théoriques sont très proches de nos valeurs de fréquence expérimentales ce qui nous permet de conclure que nos formules et calculs sont justes.

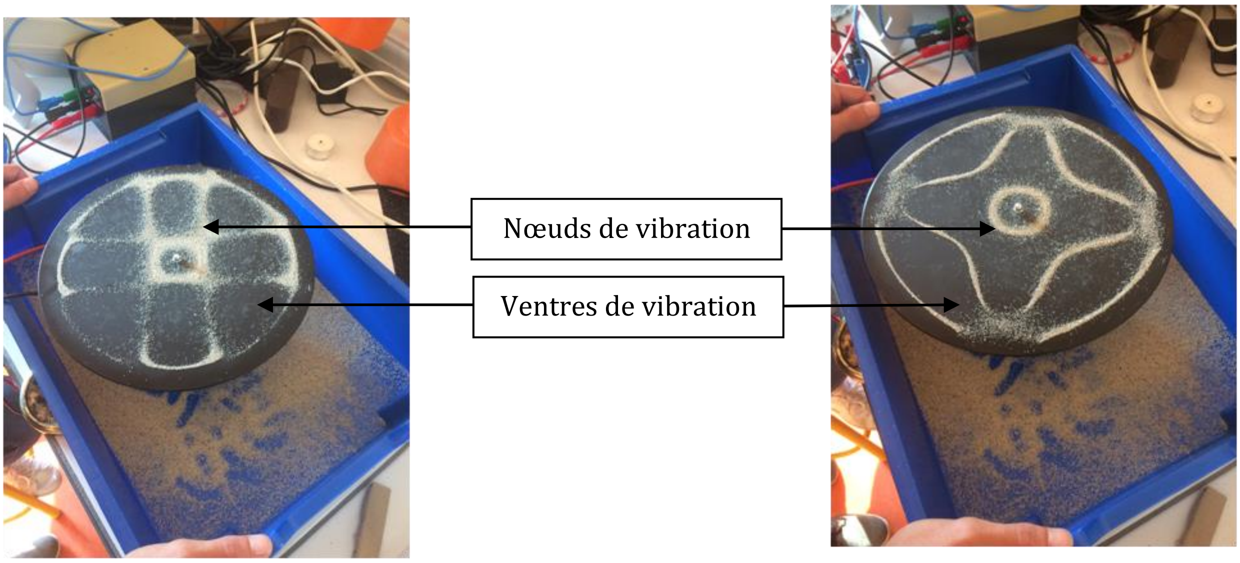
B. Application à 2 dimensions : Les plaques de Chladni

Dans la continuité de l'étude sur la corde de Melde, nous avons brièvement étudié les plaques de Chladni pour comprendre les notions de nœud et de ventre de vibration dans un plan à deux dimensions. Cela nous a également permis de découvrir un principe essentiel pour notre projet final : la cymatique. Elle permet de mettre visuellement en évidence le son par la mise en vibration d'un support. Ce phénomène a été étudié par un mathématicien allemand Ernst Chaldni au 18ème siècle. Il eut l'idée de déposer du sable en fine couche sur des plaques métalliques et de les faire vibrer à l'aide d'un archet, il remarqua la formation de « motifs » plus ou moins complexes selon l'endroit où il positionnait l'archet.

Dans le musée de notre lycée nous possédons d'anciennes plaques de Chladni nous avons décidé de nous en servir pour reproduire l'expérience.

Notre dispositif expérimental est composé d'un Générateur Basse Fréquence (GBF) qui remplace l'archer anciennement utilisé pour faire vibrer les plaques. Le son ne provenait donc pas des bords de la plaque comme l'expérience d'origine mais de son centre.

Voici quelques photos des figures que nous avons obtenues :



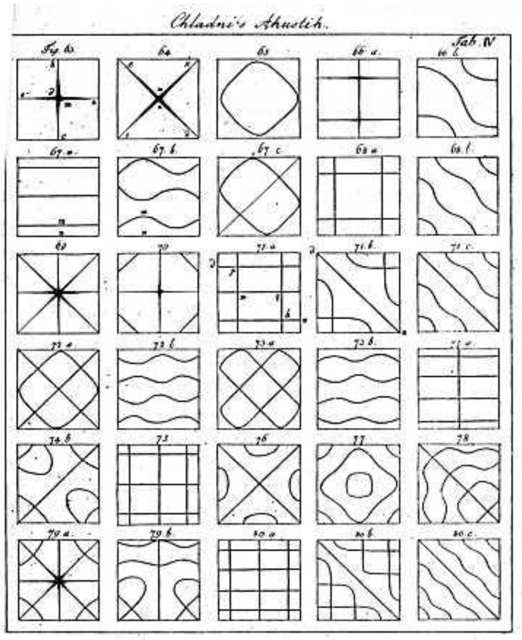
<u>Photographie de deux figures de Chladni obtenues</u>

Sur les deux clichés, nous observons à chaque fois que le sable se place en des points précis, formant des alignements (ici circulaires). Les points sur lesquels le sable se regroupe s'appellent nœuds de vibrations, et les parties sans sable sont les parties agitées, appelées ventres de vibration. Le sable est alors expulsé des ventres et se concentre dans les nœuds. Durant l'expérience nous avons également brièvement noté que plus nous augmentions la fréquence plus les figures devenaient complexes.

Étudions brièvement la modélisation de ces lignes nodales. La plaque de Chladni est une membrane, dont on essaie de faire vibrer les points autour de leur position initiale, ou position normale initiale. Nous pouvons donc modéliser le profil de la plaque avec une fonction *h*, dépendant des coordonnées *x* et *y* du point étudié et du temps *t*, noté *h(x,y,t)*, définie par:

$$h(x, y, t) = 2A\sin(k_x x)\sin(k_y y)\sin(\omega t)$$

Le plan étant à deux dimensions, l'onde peut ici se déplacer sur l'axe des *x* et ou *y* il existe donc deux composantes du vecteurs d'onde *k*. De la même manière que pour la corde de Melde, les nœuds se forment là où l'amplitude est nulle, et les ventres se forment là où l'amplitude est maximum. De plus, on remarque que comme pour Melde il existe une fréquence propre, et que des figures se créent à ses multiples.



<u>Série de schémas représentant les possibilités de répartition du sable sur la plaque</u>

La modification de la fréquence de vibration fait évoluer la figure formée par le sable. Ces figures se forment car la plaque possède différents modes de vibration, c'est à dire que les différentes parties de la plaque ne vibrent pas à l'unisson. Pour une fréquence donnée certaines parties ont une amplitude forte tandis que d'autres ont une amplitude très faible. Cela est due au fait que les ondes sont appliquées en un point donné. Les grains de sable décollent de la plaque avant de retomber et de rebondir. Ces rebonds successifs vont amener les grains dans des zones de faible vibration où ils ne bougeront plus. Les figures géométriques apparaissent donc aux zones où les grains ne rebondissent pas ou très peu. Cependant les différents endroits de la plaque ne sont sensibles qu'à une fréquence particulière, appelée fréquence propre. Par conséquent les lieux de fortes et faibles amplitudes ne sont pas les mêmes, c'est pour cela qu'il existe de nombreuses figures différentes des plaques de Chladni.

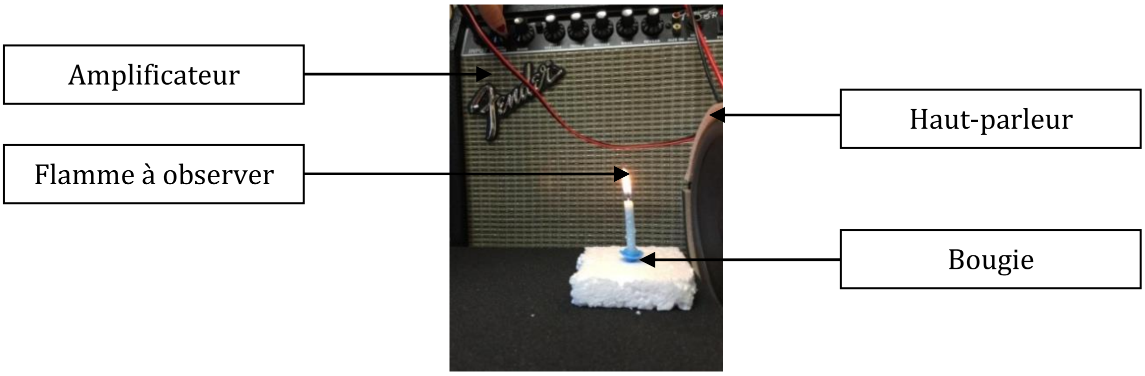
Ainsi, nous avons compris que les nœuds de vibration étaient des points « stationnaires », sur lesquels l'onde ne provoque aucun déplacement de matière. Les ventres sont en revanche les parties les plus « agitées », et celles ou passe l'onde, puisque le sable n'y reste pas.

Mais nous n'avons pas complètement l'impression d'avoir réellement vu agir le son seul directement sur la matière sans l'aide d'un intermédiaire.

II. Applications à trois dimensions

Action concrète du son : la bougie « dansante »

Il est possible de briser un objet, dans notre cas, de briser du verre, à partir du son seulement si celui-ci a une action réelle sur la matière. Le son est une vibration mécanique d'un fluide qui se propage sous forme d'ondes longitudinales. L'être humain ainsi que beaucoup d'animaux ressentent cette vibration grâce à l'ouïe. Le son provoque une déformation du milieu matériel qu'il traverse, si celui-ci est déformable de façon réversible il reprend sa forme de suite après le passage de la perturbation. Nous avons mis en évidence cette perturbation grâce à l'expérience de la bougie « dansante ». Cette expérience est intéressante car elle révèle ce phénomène de façon assez simple : nous avons juste placé une bougie devant un haut-parleur puis propagé une onde sonore à l'aide de notre haut-parleur. Nous avons alors constaté une déformation du milieu traversé.



Montage expérimental de la bougie « dansante »

Durant l'expérience nous avons remarqué que la bougie suivait les impulsions qu'envoyaient le haut-parleur, la flamme à l'origine verticale par rapport au sol se penchait presque jusqu'à être horizontale. Si d'un coup nous envoyions une impulsion beaucoup plus forte que les autres, la bougie s'éteignait. Cela révèle bien que le son a une action directe sur les éléments.

Ce sont les variations de la pression qui constituent un son. Dans un milieu fluide compressible la variation de pression se propage sous forme d'une onde. Le son est une onde mécanique. Une source sonore est un objet vibrant, comme un instrument de musique ou un haut-parleur. Cet objet est à l'origine d'une vibration de l'air. Les solides peuvent également en vibrant transmettre un son c'est le cas de notre verre. La vibration s'y propage, comme dans les fluides avec une faible oscillation des atomes.

A. Fréquence de résonance du verre

Le phénomène de résonance se produit lorsqu'une fréquence proche de la fréquence propre du système étudié lui est appliquée. Le système va alors posséder une amplitude oscillatoire de plus en plus élevée. L'exemple le plus simple à expliquer est celui de la balançoire. Pour qu'un enfant réussisse à se balancer il doit soumettre des impulsions au système "balançoire". S'il fait cela de façon périodique tout en étant proche de la fréquence "propre", alors il va réussir à faire prendre de la hauteur à la balançoire.

Un système pouvant entrer en résonance est un système sensible à certaines fréquences et est normalement capable d'accumuler de l'énergie cinétique ou potentielle. L'énergie cinétique étant égale à l'énergie nécessaire pour mettre un système au repos en mouvement. L'énergie potentielle quant à elle est liée aux interactions d'un système physique, elle se transforme régulièrement en énergie cinétique.

Notre système "verre" normalement fixe et au repos va entrer en interaction avec le son (présence de l'énergie potentielle), puis il va se mettre en mouvement en entrant en résonance (présence de l'énergie cinétique).Pour essayer de casser le verre, nous avons d'abord dû trouver sa fréquence pour qu'il entre en résonance. Notre dispositif expérimental pour réaliser cette mesure est composé d'un micro, d'un verre, d'un marteau diapason, d'un montage à amplificateur, d'une console.

Nous avons essayé de trouver des fréquences sur six verres possédant une épaisseur et un diamètre différent. En effet, suite aux difficultés que nous avons rencontrées, nous nous sommes demandé si le fait de changer la forme ou la composition du verre (verre simple, cristallin, ou cristal) pouvait faciliter la casse du verre.

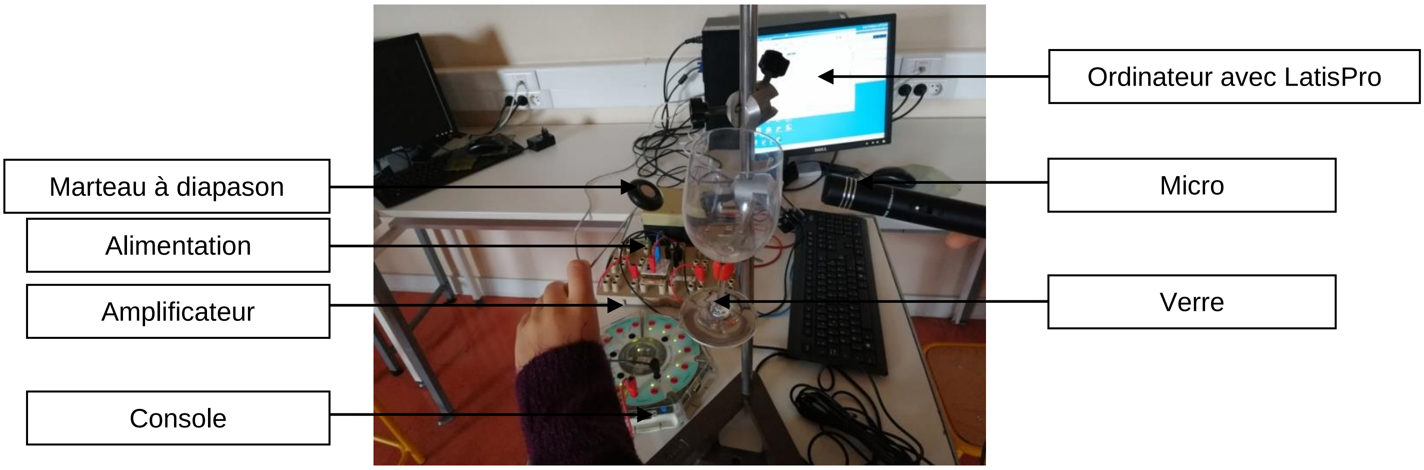
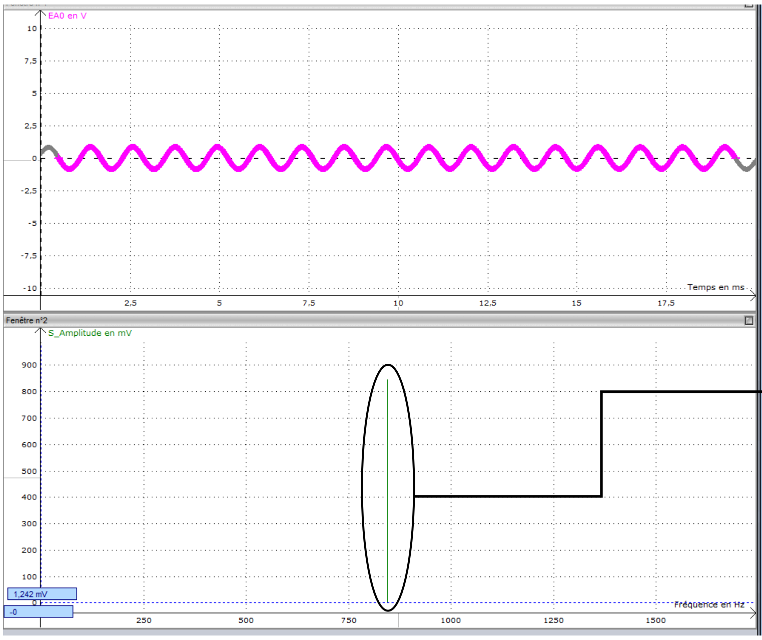


Image de notre montage pour mesurer la fréquence propre du verre



Nous avons agrandi le « pic » le plus grand de ce qu'a capté le micro (courbe du bas) pour obtenir avec plus de précision la fréquence propre du verre. Ce pique le plus grand correspond au son le plus présent lorsque l'on excite le verre avec le marteau. Nous pourrions dire que c'est la « note » produite par le verre.

Exemple de courbe obtenue sur LatisPro avec notre montage

Nous avons réalisé un tableau à partir des séries de mesures réalisées sur les 6 verres (Annexe 1).

Nous avons choisi de tester la fréquence du verre de deux façons différentes. La première, en frappant simplement dessus avec le marteau diapason. Et la seconde en faisant « chanter » le verre avec notre doigt en l'humidifiant. Par la suite nous n'avons gardé que les mesures obtenues avec le marteau car elles étaient plus précises.

B. Mise en place de l'expérience

1) Création d'une boîte

Suite à l'étude des fréquences nécessaires à la casse du verre, nous avons rapidement été confronté à un problème de taille : non seulement le son produit par le verre est un son extrêmement aigu, mais en plus, il est nécessaire de le produire à un volume assez fort, impliquant ainsi une gêne voire douleur pour nos oreilles, et celles du lycée. Nous avons donc décidé de concevoir, sur les conseils de nos professeurs, une boîte insonorisée.

En ce qui concerne la taille de la boîte, nous avons dû prendre en compte la taille des éléments que l'on souhaitait mettre dedans lors de l'expérience : soit le haut-parleur, une caméra, un micro, le verre, un laser et sa caméra CDD. Tout en prenant en compte que le verre doit tomber sur un nœud de fréquence. La boîte devait donc être assez grande.

Nous avons placé dans la boîte des blocs de mousse d'une épaisseur de cinq centimètres, en espérant que celle-ci absorbe le son émis et limite les réflexions possibles.

Dans la boîte nous avons également directement placé le haut-parleur en le fixant sur une planche.

En ce qui concerne l'éclairage, nous avons opté pour des rubans LED que nous avons collé le long d'un tasseau.

Pour pouvoir observer le verre, nous avons placé une GO Pro sur le sommet de la boîte, la caméra est amovible tout comme le verre qui coulisse le long d'une tige filtée. Nous avons choisi cette caméra pour son nombre d'image par seconde.

Photographies de la création de la boîte et de son aménagement

2) Recherche de la position idéale du verre

Avant d'essayer de casser le verre nous avons voulu trouver la bonne distance entre lui et le haut-parleur. Pour ce faire, nous avons mis une paille dans le verre et nous avons tenté de la faire entrer en résonance.

Grâce à la caméra placée au-dessus nous pouvions voir en temps réel ce qui se déroulait à l'intérieur de la boîte. Ainsi, nous avons pu constater que la paille bougeait légèrement mais pas suffisamment pour aller jusqu'à casser le verre (peu importe sa position dans la boîte). Le haut-parleur correspond à un nœud de vibration. Ainsi la longueur la plus adaptée serait de 42,5 cm. Par conséquent nous avons positionné le verre à une distance de 42,5 cm, mais cela n'a rien changé… Le verre ne vibrait toujours pas. Finalement nous avons collé le verre au haut-parleur comme nous avons pu l'observer dans d'autres vidéos Youtube montrant cette expérience et le verre s'est mis à vibrer légèrement.

C. L'expérience et ses difficultés

La vibration du verre lorsqu'il rentre en résonnance est très difficile à observer. Nous avons donc imaginé plusieurs moyens de rendre compte de cette vibration à l'œil nu.

1) La technique de la paille

La première est de mettre une paille dans le verre de manière à ce que celle-ci bouge quand le verre vibre. Ainsi, nous pensions pouvoir voir si nous étions sur la fréquence propre du verre grâce au mouvement de la paille.

Le seul problème de cette technique est qu'il était difficile d'affiner la fréquence car on ne voyait pas de modification importante du comportement de la paille, certes nous pouvions voir s'il vibrait mais pas à quelle fréquence il vibrait le plus. Nous ne pouvions donc pas comparer précisément deux fréquences proches. Or, pour casser le verre il nous faut des mesures précises.

Photographie de l'expérience de la paille sur un de nos verres

Cette technique à tout de même pu nous permettre d'éliminer un de nos verres, d'aucune façon il n'entrait en résonance sûrement à cause de son épaisseur. (Voir annexe 1)

2) L’expérience du pendule

Nous avons imaginé une autre technique pour affiner nos résultats. Celle-ci consiste à mettre un pendule qui touche légèrement la face du verre opposée à celle exposée au haut-parleur. Théoriquement, nous pensions que lorsque nos verres allaient entrer en résonance nous pourrions observer le pendule se balancer avec une amplitude de plus en plus importante. Quand nous aurions dépassé la fréquence propre du verre le pendule devait selon nous se balancer avec une amplitude moindre. En jouant avec les fréquences nous pensions trouver facilement les fréquences propres de nos verres.

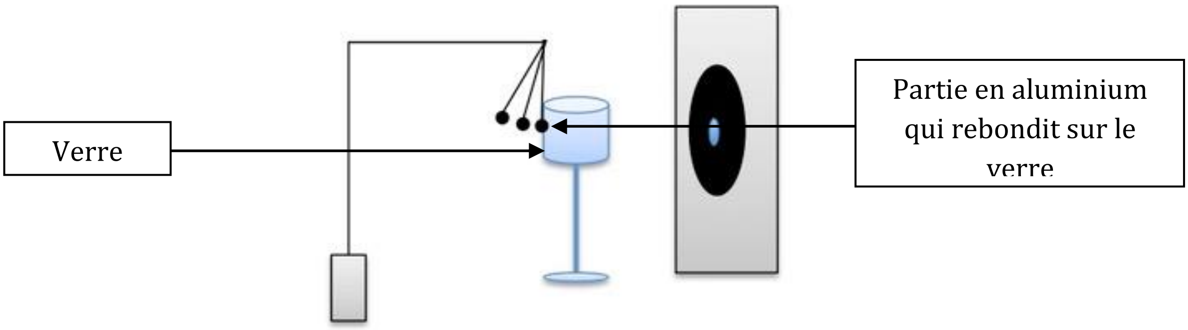
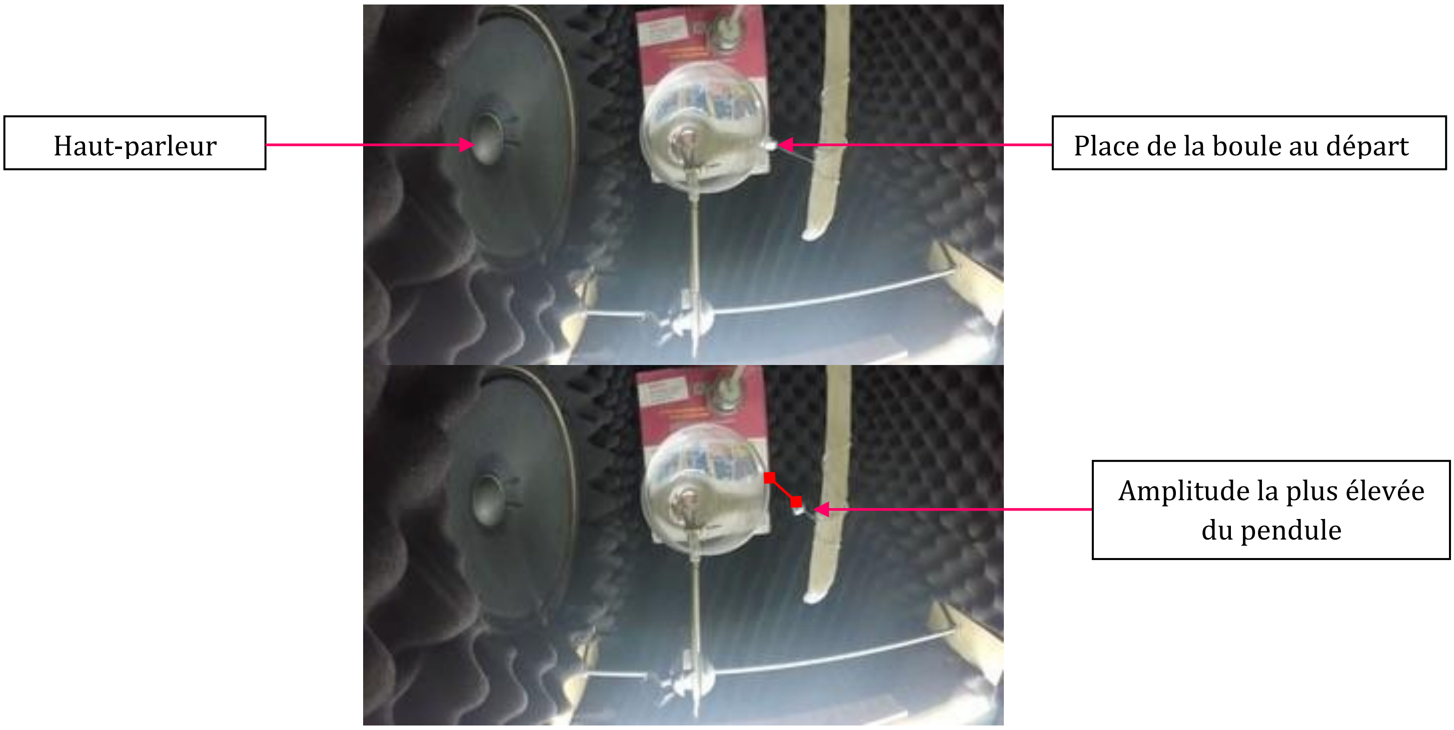


Schéma théorique de l’expérience

Pour appliquer cette théorie expérimentale nous avons pris un pendule déjà existant dans le lycée (qui sert initialement à réaliser des expériences d’électrostatiques) avec un embout en aluminium assez léger, nous avons gardé notre montage pour tester les verres.



Capture d’écran d’une vidéo où le vers entre en résonance

Au cours de l’expérience nous avons bien pu confirmer que nos verres entraient en résonance mais certains plus que d’autres. Cela nous a permis de voir la fragilité de deux d’entre eux particulièrement (voir annexe 1). Mais même en envoyant la fréquence propre trouvée de cette façon nous n'arrivions pas à faire céder nos verres... Nos fréquences n'étaient donc pas le problème.

De plus, cette technique nous a bien permis de comparer les fréquences en fonction de l'amplitude du pendule et donc d'affiner nos mesures. Nous voyons donc que le verre vibre plus ou moins fort en observant le mouvement du pendule mais nous ne voyons toujours pas le verre vibrer en direct de la caméra. Or l'agitation du pendule étant importante nous en concluons que c'est la vitesse de vibration du verre qui est trop importante pour être captée à l'œil nu.

3) L'expérience d'optique

Devant la dure réalité de nos échecs pour casser les verres et par envie de démontrer que le verre se déformait bien, avec l'aide nos professeurs référents nous avons imaginé une autre expérience, d'optique cette fois-ci :

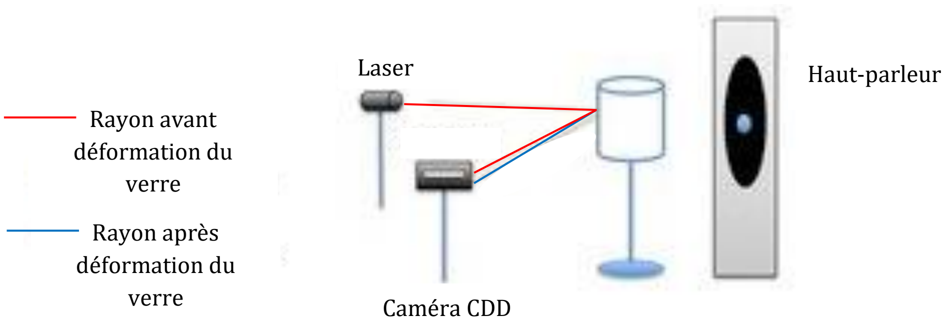
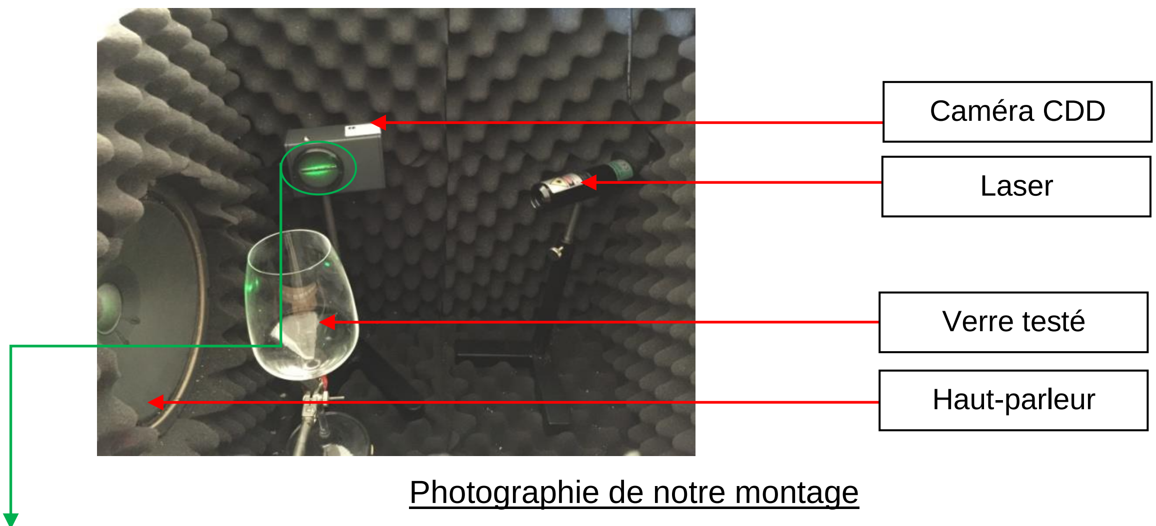


Schéma théorique de notre expérience avec le laser et la caméra

Nous avions pour but de mesurer la déformation du verre causée par l'onde de façon précise. Par conséquent, nous avons mis en place une expérience avec un laser et une caméra CCD. Dans cette expérience le faisceau du laser, ou rayon incident se réfléchit sur le verre et frappe une caméra CCD. Par la suite, nous démarrons notre haut-parleur sur la fréquence propre du verre afin de le faire vibrer. En théorie, nous aurions ainsi mesuré l'écart entre la position du rayon avant et pendant la vibration du verre. Malheureusement, dans la pratique, ce fût plus compliqué, effectivement le rayon réfléchi formait une "tâche", la caméra CCD ne pouvait donc pas effectuer de mesure car le diamètre du laser déformé était beaucoup trop grand, par conséquent nous n'avons pas pu obtenir des données chiffrées précises espérées. Toutefois, nous avons noté une modification de la position du rayon réfléchi lorsque le verre était soumis à une onde ayant pour fréquence la fréquence propre de celui-ci. Le verre se déforme donc bien.

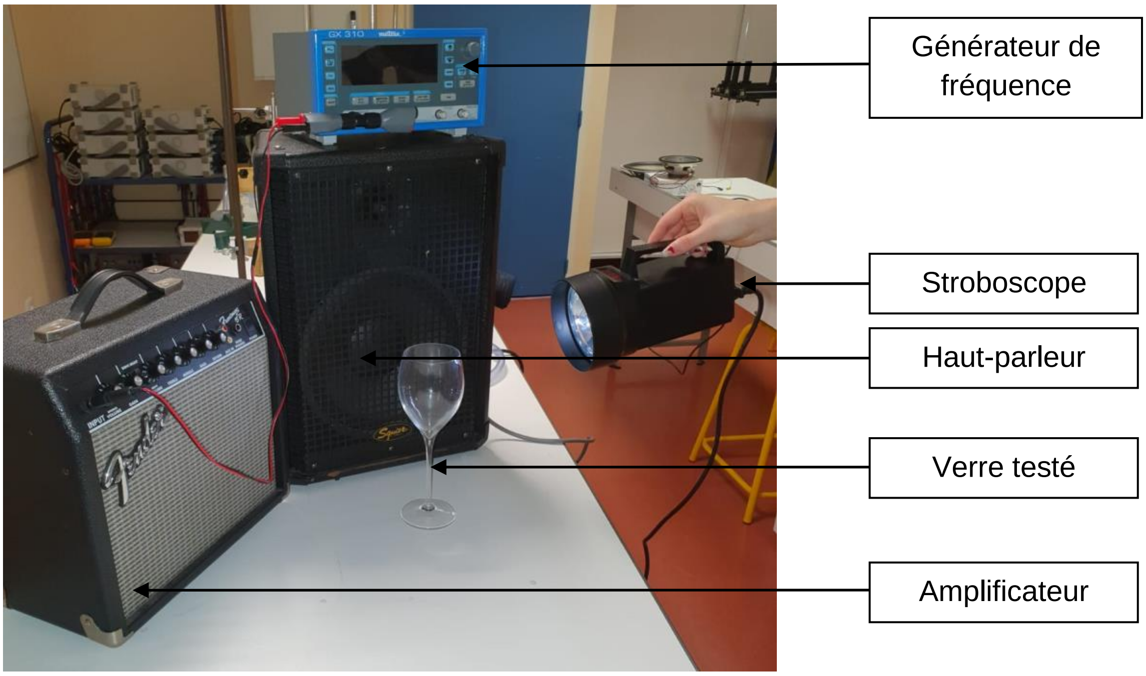


Photographie de notre montage

Ici, nous voyons bien la « tâche » que forme le rayon réfléchi sur la caméra

4) Étude de l'effet stroboscopique

Ainsi comme pour la corde de Melde nous avons eu recours à un stroboscope. La stroboscopie permet d'observer les phénomènes périodiques dont la fréquence est trop élevée pour l'œil au moyen d'un stroboscope. Un stroboscope est un appareil produisant une alternance lumineuse sous forme de flashs réguliers. En réglant la fréquence de ces flashs sur la fréquence propre du phénomène observée celui-ci apparaît alors comme fixe, ou ralentit, il devient alors observable car les flashs réguliers du stroboscope font s'imprimer les images sur notre rétine plus longuement. On appelle ça l'effet stroboscopique.



Photographie de notre expérience avec le stroboscope

Avant d'éteindre la lumière, nous avons fait délivrer au haut-parleur la fréquence propre du verre à l'aide de notre générateur de fréquence et de notre amplificateur. Nous avons replacé notre pendule devant le verre pour être sur qu'il entrait bien en résonance. Lorsque se fût le cas, nous avons réglé le stroboscope sur la bonne fréquence et éteint la lumière. Nous avons filmé la suite avec un de nos téléphones. La vidéo obtenue n'est pas très concluante et le mouvement du verre est tellement infime que nous ne sommes pas sur que le léger décalage que nous voyons soit le fruit de la déformation du verre ou de la mauvaise qualité de la vidéo.

5) Mais alors... Pourquoi nos verres ne cassent-ils pas ?

Nous pensons que cela est dû à l'amplificateur qui déforme la sinusoïdale que nous souhaitons envoyer et qui en plus de cela lui ajoute des harmoniques à la mauvaise fréquence.

Photographie de l'oscilloscope

Pour mettre cela en évidence nous avons branché un oscilloscope sur le générateur de fréquence et sur un micro que nous avons placé dans la boîte en face du haut-parleur.

Sur la photographie ci-contre de ce que nous obtenons, nous voyons en jaune la courbe résultant du générateur de fréquence. Elle correspond à ce que nous souhaitons.

La courbe bleue correspond à ce que reçoit le micro... et donc le verre lors de notre expérience. On ne peut plus vraiment parler de courbe sinusoïdale...

CONCLUSION

Dans ce rapport nous avons monté un dispositif expérimental pour casser un verre. N'ayant pas réussi, nous avons mis en place plusieurs expérience pour améliorer nos résultats et notamment l'entrer en résonance du verre.

Nous pensons finalement que notre échec provient en fait de notre amplificateur. Dans le peu de temps qu'il nous reste avant l'oral nous allons continuer d'essayer de casser un de nos verre, peut être avec un autre amplificateur.

Ainsi, nous avons pu acquérir une certaine connaissance sur les ondes et leur fonctionnement mais nous nous sommes également rendu compte de toute la complexité (dû aux contraintes matérielles par exemple) et de la précision nécessaire à la réalisation d'expériences.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier les personnes ayant permis de porter à bien notre projet, en commençant par nos professeurs encadrants. Ils ont su nous guider tout au long de l'année et ont beaucoup investi de leur temps dans notre projet.

Nos remerciements vont également aux personnels du laboratoire du lycée qui ont toujours su répondre rapidement à nos demandes de matériel et qui ont toujours veillé au bon déroulement de nos expériences.

De plus, nous tenons à remercier le Conservatoire Municipal de Périgueux (la Visitation) pour son prêt de matériel sonore.