LP2I – *Lycée Pilote Innovant International*

Vibrer pour peser

Projet présenté par :

AGUILLON Amy

BREMAUD Alban

FLOQUET Balthazar

Résumé :

Depuis quelques années, le CEA met au point des micros poutres vibrantes, dont les chercheurs et les ingénieurs se servent comme de véritables détecteurs. De petites tailles et hyper sensibles, ils sont capables de reconnaître des molécules à partir d'une vibration mécanique.
Nous avons cherché à comprendre le phénomène physique exploité par le CEA à ce sujet. Ceci est passé dans un premier temps par une modélisation de la micro poutre par une corde de guitare tendue, puis fixée à une seule de ses extrémités. Nous avons aussi voulu comprendre à quels critères devaient répondre les poutres pour atteindre la sensibilité voulue, ce qui nous a conduit à réaliser un très grand nombre de mesures.
Durant tout notre projet, nous avons dû améliorer nos dispositifs expérimentaux pour que nos mesures soient significatives et exploitables. Enfin, forts de toutes les connaissances que nous avons pu acquérir lors de notre projet, nous avons conçu des applications possibles de ces poutres vibrantes.

Sommaire :

I – Introduction

II – Comment la corde vibre-t-elle après l'ajout d'une masse ?

III - Et si nous nous intéressions maintenant à la sensibilité de ce dispositif ?

IV – Quelles applications peuvent être envisagées à notre échelle ?

V - Conclusion

I - Introduction :

Le CEA, comme d'autres instituts de recherche, édite des articles pour le grand public, dont nous faisons partie en tant qu'élèves. Plusieurs d'entre eux nous ont interpelés, tel que celui présenté ci-dessous :

UN PESE-MOLECULE QUI FAIT VIBRER

Peser une par une les grosses molécules afin de les identifier ? C'est désormais possible. Des chercheurs du CEA-Leti et du Caltech[1] inventent le premier détecteur mécanique capable de mesurer leur masse en temps réel. Ce nanocomposant ou NEMS• fonctionne grâce à une « poutre » vibrante, pareille à une balance ultrasensible.

• **NEMS :** nanosystème comprenant un ou plusieurs éléments mécaniques libres de se mouvoir sous l'effet d'une force d'origine électrique, pour réaliser une fonction de capteur ou d'actionneur. Issu de l'anglais Nano-Electro-Mechanical System.

• **Piezo-résistif :** adjectif qualifiant un élément électrique dont la résistance varie sous l'effet d'une contrainte (force) mécanique.

Mesurer la masse d'un virus ou d'une protéine reste un exercice difficile. Ces informations sont pourtant très utiles pour établir des diagnostics médicaux. De nos jours, les chimistes n'ont guère d'autres solutions que de casser les grosses molécules en petits morceaux pour les peser à l'aide d'un spectromètre de masse. Mais la méthode est risquée : rien ne garantit que l'échantillon à analyser ne soit pas dénaturé au terme de ces opérations ! D'où l'idée d'une sorte de pèse-molécule individuel, inventé par les physiciens grenoblois et américains.

Le poids, une affaire de fréquence

Ce dispositif high-tech fonctionne sur le principe de la corde de guitare. *« Une corde de guitare vibre à une fréquence bien déterminée, mais si elle est alourdie par un objet, alors sa note change et passe de l'aigu au grave,* explique Laurent Duraffourg, chercheur au CEA-Leti à Grenoble. *En mesurant cette différence de fréquence, on peut remonter au poids et à la position de l'objet. »* Dans un détecteur imaginé par l'équipe, la corde de guitare a été remplacée par une poutre en silicium de 1 à 10 micromètres de long qui, placée entre deux plots, est capable de se mettre en mouvement sous l'effet d'un champ électromagnétique. Des jauges « **piezo-résistives**• » s'y substituent à l'oreille du musicien. Et ça marche : dans une publication parue dans *Nature nanotechnology*[2], les scientifiques montrent qu'ils ont pu déterminer, en temps réel, non seulement la masse d'une molécule d'immunoglobuline (IgM) mais également celle des versions hybridées, plus lourdes, de cet anticorps produit par les cellules immunitaires du sang. De quoi ouvrir bien des perspectives dans le domaine de la biologie et du diagnostic médical.

Vahé Ter Minassian

CEA-Leti

Le Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information est un centre de recherche appliquée en microélectronique et en technologies de l'information de la santé. Au sein du campus d'innovation Minatec à Grenoble, il est l'interface entre le monde industriel et la recherche.

En effet, on a pu y lire qu'il est possible de peser de la matière, qui plus est, 1 molécule, au moyen d'une poutre vibrante. Comment est-ce possible ?

<u>Comment est-il possible de peser la matière au moyen d'une poutre vibrante ? Quelles conditions doivent satisfaire ces poutres pour avoir une sensibilité suffisante compte tenu de l'usage que l'on veut en faire, et quelles sont les applications possibles que l'on peut envisager, aussi bien sur un plan microscopique qu'à une échelle plus humaine ?</u>

Pour répondre à ces questions, nous avons choisi de suivre l'analogie proposée dans l'article, à savoir que le dispositif élaboré au CEA (le « MEM » Micro – Electro – Mechanical System) est analogue à une corde de guitare.
Au cours de notre projet, nous avons alors commencé par étudier la façon qu'a une corde de guitare de vibrer. Puis nous avons cherché à comprendre la physique qui explique qu'à partir de cette vibration, il est possible de peser de la matière. Nous avons ensuite cherché à déterminer quels doivent être les meilleurs paramètres du dispositif pour que ce nouveau type de balance soit efficace. Nous terminerons ce mémoire en présentant des applications possibles qui découlent de notre étude.

L'originalité de ce projet se trouve dans la démarche que nous avons suivie pour travailler sur la sensibilité de notre dispositif, ainsi qu'au niveau des applications que nous avons imaginées. Il est en effet par exemple peu courant de chercher à mesurer une densité en faisant vibrer une corde. C'est toute notre étude qui a pu nous conduire jusque-là.

Une vidéo de 5 minutes de notre projet est disponible en suivant le lien : http://dai.ly/k5eVmTjwadcN4PqeD0z

II – Comment la corde vibre t-elle après l'ajout d'une masse ?

1) Modes propres de vibration de la corde :

Puisque l'idée lors de ce projet est d'étudier la variation de la fréquence à laquelle vibre une corde en fonction de la masse de l'objet qu'on lui accroche dessus, il faut comprendre comment vibre une corde « à vide », c'est-à-dire sans autre masse que la sienne.

Pour réaliser cette étude, nous avons utilisé le matériel dont nous disposons au lycée : un vibreur de Melde. Il s'agit d'un dispositif qui vibre à une fréquence que l'on choisit grâce à un générateur de fréquence.
Ce vibreur est relié à une corde tendue (figure 1), fixée à son autre extrémité de sorte que celle-ci soit immobile.
En faisant varier la fréquence, il apparaît que la corde vibre uniquement selon certaines fréquences qui, ne dépendant que des caractéristiques de la corde, sont appelées modes propres de vibration de la corde.
Voici les fréquences auxquelles vibre la corde, et l'allure de la corde au cours du temps dans chacun de ses modes propres de vibration (colonne 2 du tableau ci-dessous) :

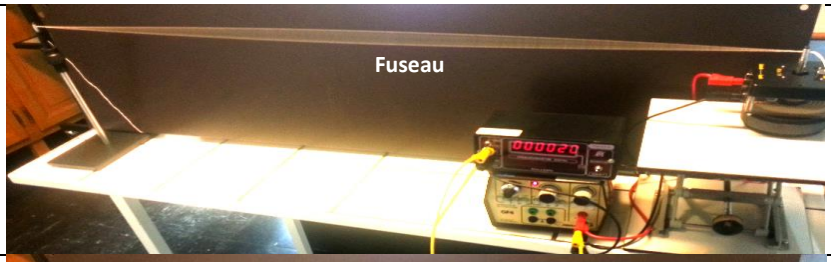
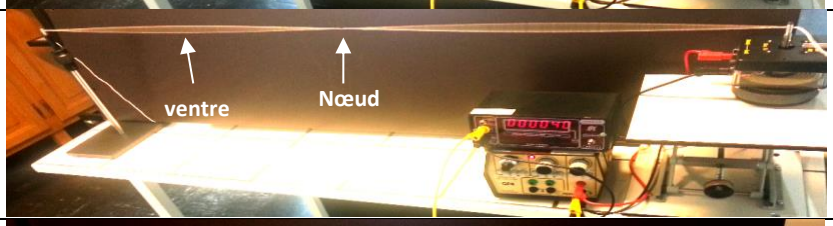
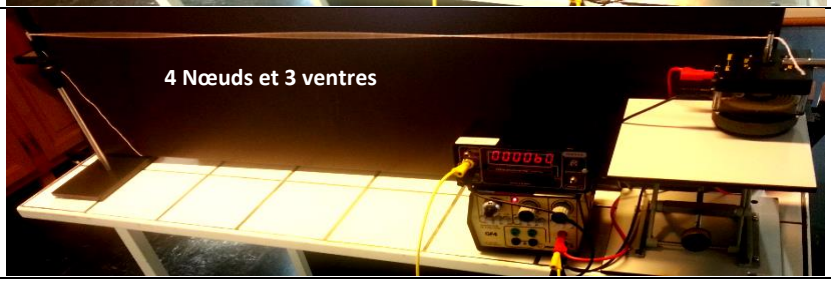
Fondamental = Harmonique 1	$F_1 = 20$ Hz Mode		$\lambda_1 = 2L = \frac{2L}{1}$
Harmonique 2	$F_2 = 40$ $F_2 = 2F_1$		$\lambda_2 = L = \frac{2L}{2}$
Harmonique 3	$F_3 = 60$ $F_3 = 3F_1$		$\lambda_3 = \frac{2L}{3}$
	$F_n = nF_1$		$\lambda_n = \frac{2L}{n}$

Figure 1 : modes propres de vibration d'une corde reliée à un vibreur de Melde.

Chacun des modes propres de la corde fait apparaître un ensemble de nœuds et de ventres de vibrations.

En mesurant les fréquences et les longueurs d'onde des vibrations s'installant sur la corde pour ces différents modes, on observe, dans les colonnes 1 et 3, que $F_n = nF_1$ et $\lambda_n = \frac{2L}{n}$.

D'autre part, les fréquences propres dépendent de la tension de la corde, car si on tend davantage la corde, on observe un décalage en fréquence du mode fondamental et de toutes les harmoniques suivantes.

En se documentant sur la relation entre la fréquence et la tension de la corde, nous avons trouvé que les fréquences de vibration de la corde dépendent de sa tension T ainsi que de sa masse linéique µ, selon la relation :

$$F_n = \frac{k}{2L}\sqrt{\frac{T}{\mu}}$$ où k est le numéro de l'harmonique.

Bref, avec un vibreur de Melde, il nous a été possible de forcer une corde à vibrer successivement selon plusieurs de ses modes propres. Le vibreur entre alors en résonance avec la vibration de la corde. On dit aussi que les fréquences en question sont des fréquences de résonance.

Mais si on donne un coup sur la corde, celle-ci se met alors à vibrer selon tous ses modes en même temps. Cela doit forcément complexifier l'allure de la corde durant la vibration. Nous nous sommes dit que pour que nos expériences réalisées sur la corde de guitare soient le plus facilement exploitables, il fallait trouver le moyen d'exciter la corde de guitare selon un seul de ses modes propres. Et pour des raisons de contraintes mécaniques, le dispositif avec le vibreur de Melde n'était pas du tout adapté à la situation.

Après quelques recherches, nous avons par contre vu dans un livre que notre objectif était réalisable en faisant parcourir un courant dans la corde de guitare métallique, elle-même disposée dans un champ magnétique. En effet, il s'exerce alors sur la corde une force, appelée force de Laplace, orthogonale à la direction du courant et du champ magnétique, et dont le sens dépend du sens du courant électrique. Ainsi, en utilisant un courant alternatif, cette force déplace la corde et la fait vibrer à la même fréquence que celle du courant électrique. Nous avons donc réalisé le dispositif suivant (figure 2) :

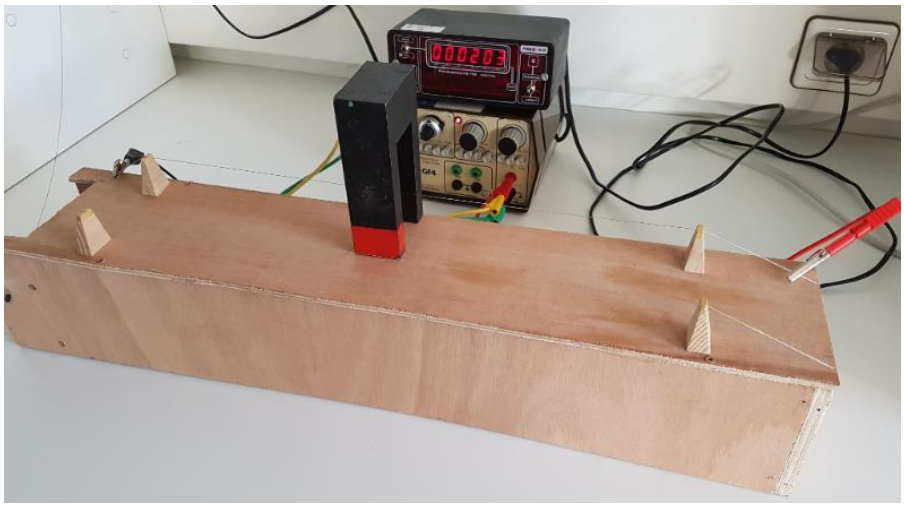


Figure 2 : Dispositif expérimental que nous avons conçu pour faire vibrer des cordes de guitare.

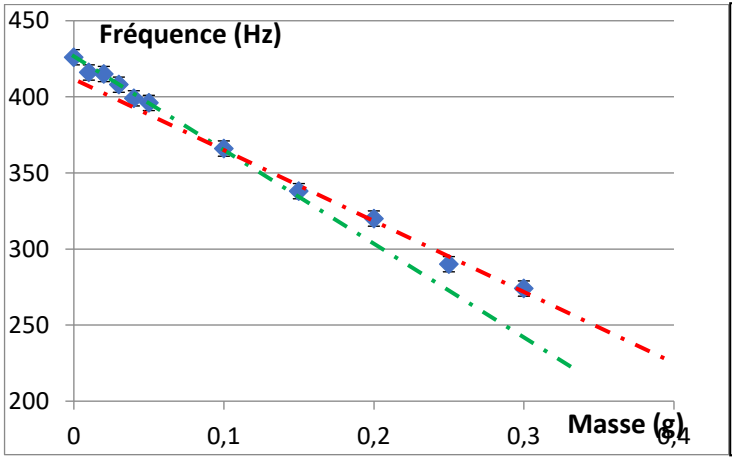
2) Vibration de la corde lestée d'une masse

a – Résultats expérimentaux :

Notre dispositif de travail étant ainsi trouvé, entrons dans le vif du sujet. Nous avons forcé une corde de guitare à vibrer selon son monde fondamental. Puis nous avons accroché une petite masse de Patafix sur la corde. Et comme l'annonce l'article du CEA, la corde s'arrête bien de vibrer, et il faut alors diminuer la fréquence du courant délivré par le générateur pour voir à nouveau la corde vibrer selon son mode fondamental.

Remarque : Une vidéo de l'expérience a été déposée sur internet à l'adresse suivante : http://dai.ly/k7INy1yXpZzFpGqeAqK. On y voit dans un premier temps la recherche de la fréquence du mode fondamental en utilisant l'application « FFT spectrum analyser ». On règle ensuite la fréquence du courant délivré par le générateur sur cette fréquence, mais on s'est aperçu qu'il fallait systématiquement que cette fréquence d'excitation soit plus faible que la fréquence du mode fondamental déterminé simplement en tapant sur la corde. Nous pensons que cela est dû au fait que lorsqu'un courant circule dans la corde, elle s'échauffe par effet joule, ce qui la détend. Nous avons vu que ce phénomène est instantané, et que la fréquence propre de la corde est donc immédiatement stabilisée, ce qui nous a rassuré car les expériences que nous comptions faire par la suite n'auraient sinon pas été très fiables.

Si on reproduit l'expérience avec des masses de Patafix différentes, on obtient les résultats suivants (figure 3) :



On constate que plus la masse est importante, plus la fréquence de résonance du système décroît. Cette décroissance est légèrement plus forte pour les petites masses (pointillés verts) que pour les grandes (pointillés rouges). L'incertitude sur la mesure est très faible et non représentable concernant les masses utilisées.
La fréquence de résonance de la corde est également déterminée avec une très grande précision lors de l'utilisation de faibles masses de Patafix. Elle reste suffisamment faible lors de l'utilisation de masses plus grandes, à tel point le que la dimension du point représente à lui seul l'incertitude sur la mesure de la fréquence.

Figure 3 : Variation de la fréquence de vibration (longueur et tension de corde constante) en fonction de la masse de Patafix accrochée.

Après avoir constaté ces résultats, nous avons voulu répondre à la question suivante :

b - Pourquoi le fait d'accrocher une masse à la corde modifie sa fréquence de vibration ?

Après avoir modifié la fréquence du générateur, la corde lestée de la masse de Patafix se remet à vibrer, selon un nouveau mode fondamental. L'allure de la corde est donc toujours la même que s'il n'y avait pas de masse : on a toujours un ventre au milieu de la corde et la corde semble bien symétrique de part et d'autre de ce ventre. Donc la longueur d'onde de ce nouveau mode fondamental est la même que celle du mode fondamental sans la masse.

Mais comme on sait d'autre part que $\lambda = \frac{v}{F}$, on peut dire que si F diminue lorsqu'on accroche la masse, alors la célérité v de l'onde diminue également pour que λ soit constante.
Le fait que la célérité diminue avec la masse semble assez compréhensible de façon intuitive. Nous pouvons approfondir ce point-là. En effet, des études montrent que la célérité d'une onde sur une corde dépend de la tension T de la corde et de sa masse linéique μ :

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Peut-on alors considérer que la masse accrochée à la corde revient à augmenter sa masse linéique ?

Comme nous savons que $v = \lambda \times F$, nous pouvons écrire pour le mode fondamental :

$$F = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Dans cette expression, si on dit que la masse linéique μ est

$$\mu = \frac{masse\ corde\ +\ masse\ Patafix(\Delta m)}{L} = \mu_0 + \frac{\Delta m}{L}$$

L'expression de la fréquence devient :

$$F = \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu_0 + \frac{\Delta m}{L}}} = \frac{1}{2L} \times \sqrt{\frac{T}{\mu_0\left(1 + \frac{\Delta m}{\mu_0 L}\right)}} = F_0 \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Delta m}{\mu_0 L}}}$$

On peut alors tracer F en fonction de Δm de façon théorique et comparer ces valeurs aux fréquences mesurées expérimentalement en faisant varier la masse de Patafix accrochée sur la corde (figure 4) .

Voici ci-dessous le graphique que l'on obtient :

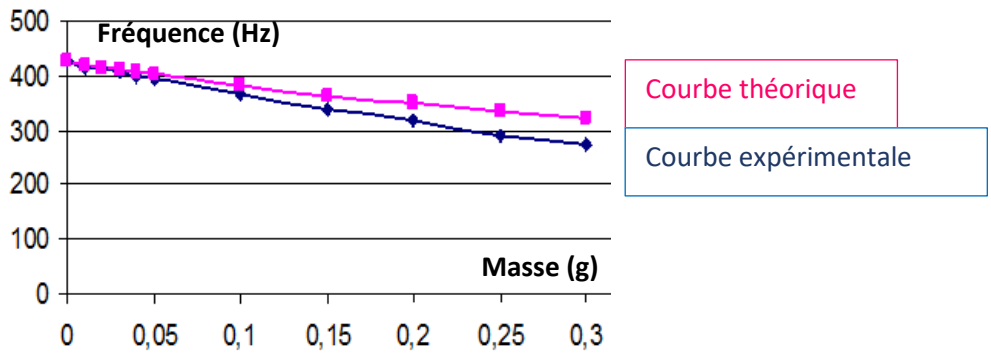


Figure 4 : Comparaison entre la variation théorique de la fréquence en fonction de la masse linéique, et la variation expérimentale de la fréquence en fonction de la masse ajoutée.

La courbe rose représente la variation théorique de la fréquence de résonance en fonction de la masse linéique, alors que la courbe bleue représente la variation expérimentale de la fréquence de résonance de la corde en fonction de la masse de pâte à fixe ajoutée. On remarque une différence entre les deux courbes, d'autant plus grande lorsque la masse de pâte à fixe augmente. Ainsi, même si les deux courbes sont globalement décroissantes, on voit qu'on ne peut pas réduire la situation en disant que la masse ajoutée se comporte comme une augmentation de masse linéique.

Par contre, il est clair que cette masse diminue la célérité de l'onde. Or la célérité d'une onde ne dépend que du milieu dans lequel elle se propage.
On peut donc en conclure que le fait d'accrocher une masse revient à changer suffisamment le milieu pour le considérer comme différent, et vibrant alors à une fréquence de résonance différente.

III - Et si nous nous intéressions maintenant à la sensibilité de ce dispositif ?

Le fait que le CEA ait réussi à peser une molécule de 10^{-15} g montre à quel point ce dispositif est sensible ! Comment peut-on atteindre une telle sensibilité ? Autrement dit, de quoi dépend la sensibilité d'un tel dispositif ?

Nous avons, avec la corde de guitare, la possibilité de modifier la tension de la corde, de travailler avec une corde de masse linéique différente, ou encore de modifier la longueur de la corde, ce qui revient à chaque fois à modifier la fréquence propre de vibration de la corde, puisque les longueurs d'ondes des modes propres sont quant à elles fixées par la géométrie de la corde.
Mais pour commencer, y a-t-il un endroit préférable pour accrocher la masse sur la corde ?

1) A quel endroit stratégique accrocher la masse ?

Pour cette expérience, nous avons choisi de travailler avec une corde de 40 cm de longueur. Etant donné que la corde, sans masse accrochée dessus, vibre à sa fréquence fondamentale de 426 Hz, le plus gros écart de fréquence obtenu en accrochant la masse dessus est observé lorsque la masse est au milieu de la corde, soit à 20 cm de son extrémité (figure 5). La sensibilité maximale du dispositif est donc obtenue en disposant la masse au milieu de la corde. **Pour autant, par la suite, dans les différentes expériences à venir, nous n'allons pas accrocher la masse au milieu de la corde**.

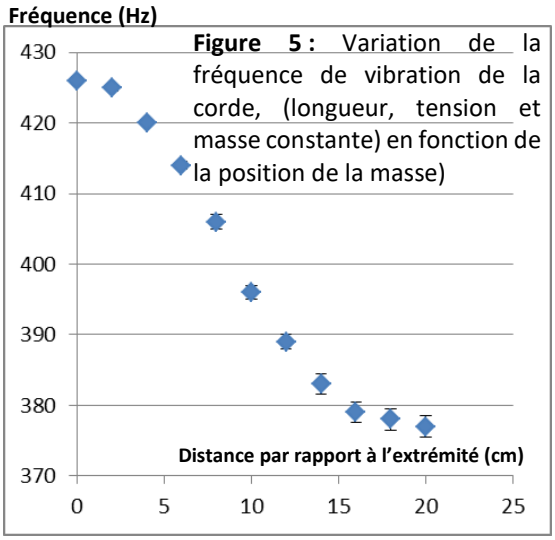


Figure 5 : Variation de la fréquence de vibration de la corde, (longueur, tension et masse constante) en fonction de la position de la masse)

En effet, ce que ne montre pas la figure 5, c'est que plus la masse se rapproche du centre de la corde, et moins la corde vibre avec une grande amplitude. La masse accrochée représente alors une plus forte contrainte pour la corde, ce qui rend plus délicate l'observation de la vibration de la corde.
Alors où accrocher la masse ?
Pour répondre, il a fallu tenir compte d'autres paramètres. Nous nous sommes aperçus, en faisant des analyses spectrales des sons produits par la corde, que parfois, alors que l'on force toujours à faire vibrer la corde selon son mode fondamental, elle vibre également selon ses harmoniques supérieures avec parfois une amplitude bien plus grande que le fondamental. Nous avons constaté que cela se produisait lorsque la masse était positionnée au tiers de la corde, au quart, au cinquième, au 2 cinquième… c'est-à-dire exactement au niveau des nœuds de vibration des différents modes propres de vibration de la corde. Nous pensons que le fait que la masse appuie sur la corde au niveau de l'un de ces nœuds favorise le mode de vibration correspondant. Nous devons éviter cela car le fait de positionner la masse au niveau d'un nœud, c'est-à-dire à un endroit où la corde ne vibre pas, ne permettra pas de faire changer la fréquence de vibration de la corde. Et il est alors à craindre que cela diminue la sensibilité de la corde quant à sa capacité à détecter la masse accrochée. Nous avons alors accroché systématiquement la masse à mi-chemin entre les nœuds 3 et 4 des 3ième et 4ième harmoniques, comme le montre le schéma ci-dessous (figure 6), quelle que soit la longueur de la corde utilisée lors de nos expériences.

Figure 6 – Position des nœuds et des ventres des premiers harmoniques (N= Nœud, V=ventre)

Remarque : Nous pensions, après avoir observée la courbe figure 5, utiliser le point d'inflexion qu'elle présente pour y positionner la masse. Mais finalement, cela ne se justifie pas du tout, puisque ce point représente un nœud pour l'harmonique N4. En positionnant alors la masse en ce point, on encouragerait cet harmonique au détriment du mode fondamental. D'autre part, la propriété mathématique que présente le point d'inflexion n'a pas vraiment de lien avec notre argument physique.

Une fois la masse accrochée à cet endroit de la corde, comment faire en sorte que la sensibilité du dispositif soit la meilleure ? Que pouvons-nous modifier dans notre dispositif pour chercher à obtenir une meilleure sensibilité ?

Nous pouvons modifier la fréquence de vibration du mode fondamental de la corde. Et pour cela, nous avons plusieurs possibilités : soit on modifie la longueur de la corde, soit sa tension, soit sa masse linéique en changeant le diamètre de corde. C'est ce que nous avons fait, en essayant du mieux possible de ne faire varier qu'un seul de ces paramètres à la fois.
Mais avant de se lancer dans ces expériences, nous avons décidé d'automatiser la recherche de la fréquence. Cela permet à la fois de rendre la tâche moins fastidieuse, plus précise et cela nous a paru particulièrement intéressant de prendre le temps de faire cela pour rendre les applications envisagées plus pratiques.

2) Recherche automatique de la fréquence de vibration de la corde de guitare :

On voit sur la photo (figure 7) que cette fois-ci, au lieu que ce soit le générateur qui délivre le courant sinusoïdal, une carte Arduino s'en occupe. Mais comme le courant délivré par la carte a une faible intensité, nous l'envoyons dans un amplificateur avant de l'envoyer dans la corde de guitare. Par ailleurs, un microphone est disposé dans la caisse de résonance.
Il nous restait alors à écrire le programme qui nous permettrait de trouver la fréquence propre de vibration de la corde, et qui soit à même de trouver la nouvelle fréquence de résonance une fois la masse de Patafix accrochée dessus.

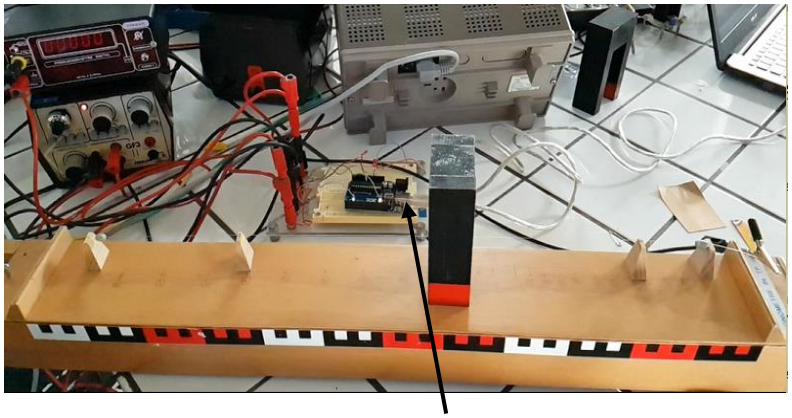


Figure 7 : Dispositif avec la carte Arduino pour automatiser la recherche des fréquences de résonance.

Le principe du programme est le suivant : la carte délivre un courant dont nous choisissons la fréquence. Cette fréquence décroît de 1 Hz toutes les 10 secondes. En parallèle, le microphone mesure l'intensité sonore et l'information est envoyée à la carte Arduino. Si l'amplitude du signal issu du micro est inférieure à un seuil que nous choisissons, la fréquence continue de décroitre à raison de 1Hz toutes les 10 secondes. Dans le cas contraire, on entre dans la deuxième phase du programme : la fréquence se stabilise autour de la fréquence de résonance. Si alors on accroche une masse sur la corde, celle-ci s'arrête de vibrer et le programme retourne dans la première phase, avec une décroissance de la fréquence toutes les 10 secondes jusqu'à trouver la nouvelle fréquence de résonance. Le programme est donné en annexe. Il comporte 5 pages, et s'accompagne de 2 autres programmes permettant de piloter en temps réel le programme Arduino et d'afficher les résultats sous forme graphique.

Remarque : Cela dit, en analysant le signal produit par la carte Arduino, il s'avère que nous n'avons pas un signal sinusoïdal, mais carré, comme le montre l'acquisition suivante (figure 8). Il nous a alors fallu disposer un filtre passe bas entre la carte et la corde de guitare pour laisser passer uniquement la composante fondamentale du signal. Nous avons pour cela réalisé un circuit RC, visible sur l'image de la figure 9. Nous obtenons alors, après filtration, le signal figure 10.

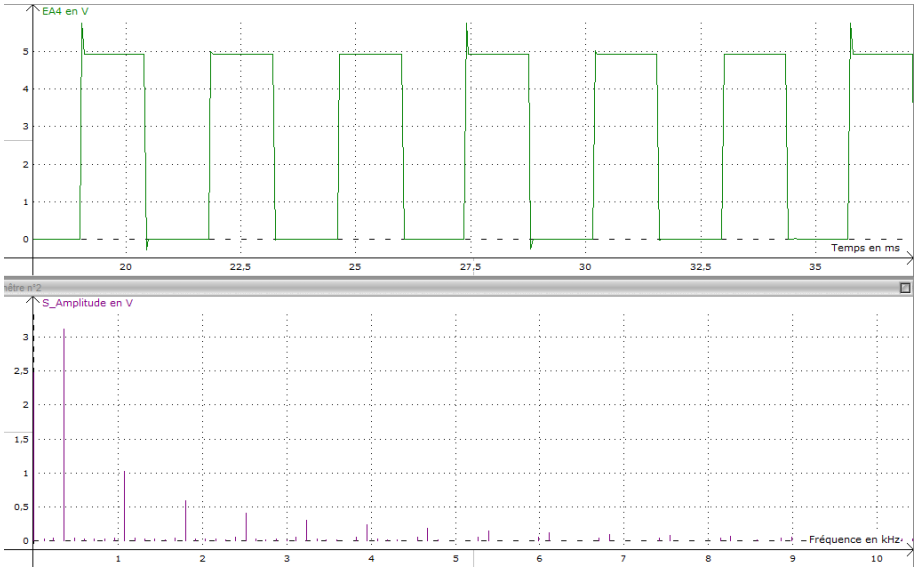


Figure 8 : signal carré issu de la carte Arduino

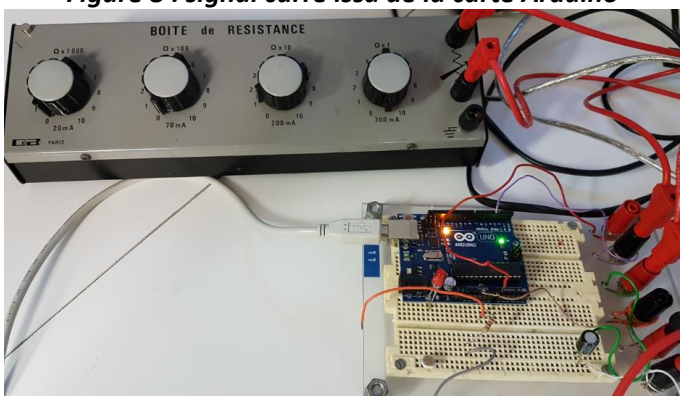


Figure 9 Filtre RC passe bas, composé d'une résistance et d'un condensateur.

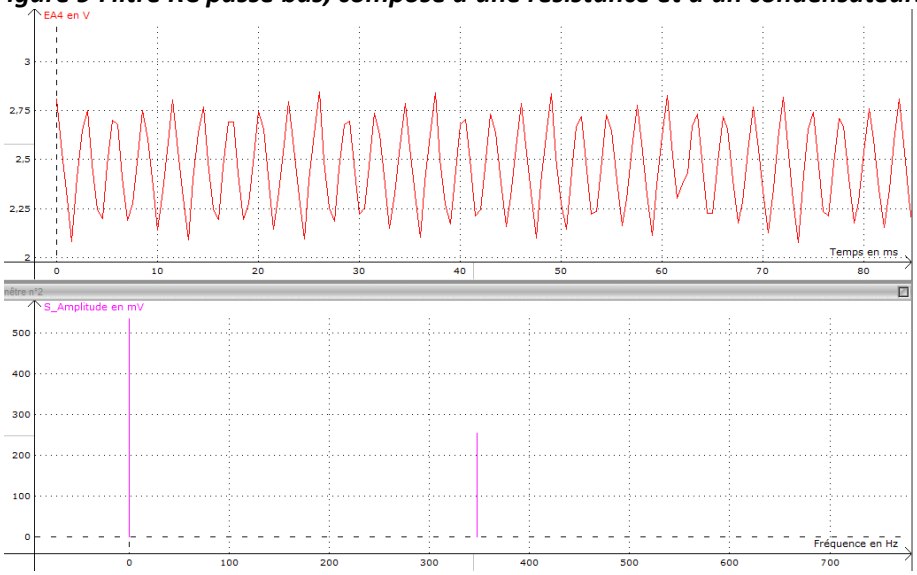


Figure 10 - Signal carré filtré issu de la carte Arduino.

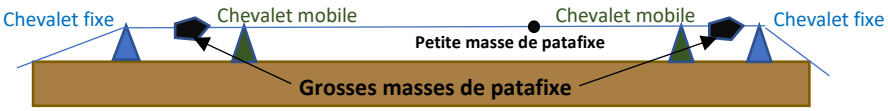
Nous avons filmé l'expérience afin que vous puissiez voir le programme fonctionner. La vidéo est alors déposée sur internet, et est visible en suivant le lien : http://dai.ly/k2VZ0Gp2e6CB9SqeDm

3) La sensibilité de la corde vibrante dépend-t-elle de sa fréquence propre de vibration ?

Pour répondre à cette question, nous avons voulu mesurer la variation de fréquence engendrée par l'ajout d'une masse variable de Patafix, pour différentes longueurs de cordes.
Dans cette partie, nous avons fait le choix de ne travailler qu'avec le mode fondamental de vibration de la corde.

a- Evolution de la fréquence de vibration de la corde en fonction de la longueur L de la corde pour différentes masses de Patafix (cordes tendues avec des tension égales) (figure 11).

Tout est dit dans le titre.
Remarque : Précisons que pour réaliser les différentes mesures qui suivent, nous ne déplacions pas la masse, et ce pour 2 raisons : tout d'abord, il peut arriver qu'en enlevant la masse de Patafix de la corde, un peu de cette pâte reste accrochée sur la corde, comme on travaille avec des masses extrêmement faibles, cela aurait rendu nos résultats peu fiables. D'autre part, comme on veut toujours positionner la masse exactement au même endroit relativement aux 2 chevalets, il était beaucoup plus simple de déplacer les chevalets pour réduire les dimensions de la corde.
Nous avons donc positionné une masse de Patafix, modifié la position des chevalets pour travailler avec des longueurs de corde allant de 40 à 5 cm, puis changé la masse, et ainsi de suite.
Deux autres remarques : le fait de déplacer les chevalets changeait l'angle d'inclinaison de la corde à ses extrémités, ce qui modifiait alors la tension alors que l'on souhaitait qu'elle reste constante. Nous avons alors minimisé au maximum cette variation de tension en positionnant deux autres chevalets fixes, dont le but était de minimiser l'angle entre la corde et les chevalets mobiles.



Ce faisant, nous nous sommes aperçus que les tronçons de cordes situés entre les chevalets fixes et mobiles pouvaient vibrer, rendant compliqué l'exploitation de nos mesures. Nous avons alors disposé une très grosse masse de Patafix sur ces tronçons pour éviter cela.
Voici alors les résultats obtenus, après plusieurs heures de mesures.

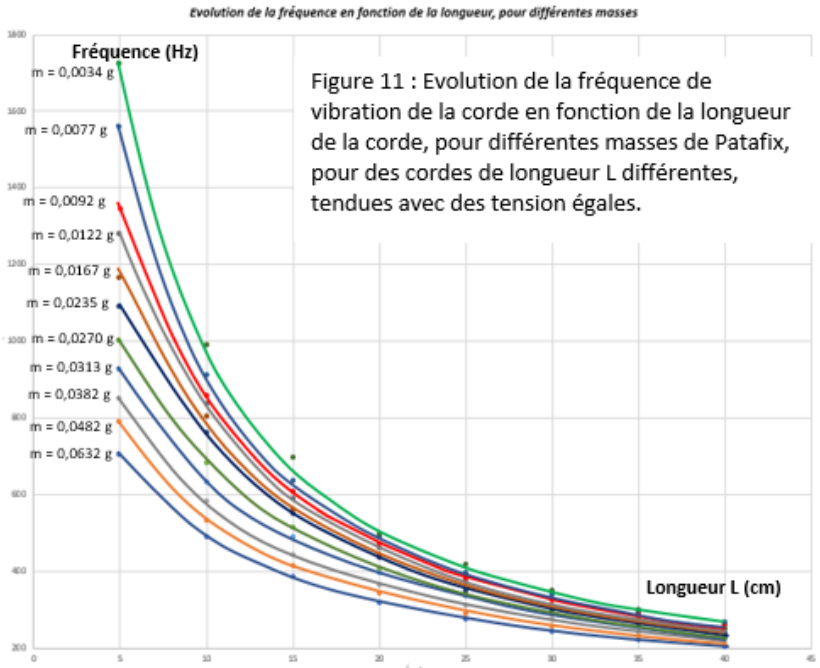


Figure 11 : Evolution de la fréquence de vibration de la corde en fonction de la longueur de la corde, pour différentes masses de Patafix, pour des cordes de longueur L différentes, tendues avec des tension égales.

On remarque que quelle que soit la masse accrochée à la corde, plus la corde est petite, et plus la variation de fréquence est grande, ce qui montre d'ores et déjà que travailler avec un système de faible longueur, et donc vibrant à plus haute fréquence, sera d'autant plus sensible.

Comment varie la sensibilité maximale en fonction de la longueur ?

Pour répondre à cette question, nous avons exploité les résultats expérimentaux en plusieurs étapes :

1) Nous avons tracé l'évolution de la fréquence en fonction de la masse pour les différentes longueurs de cordes (figure 12)
2) Nous avons cherché la sensibilité maximale de la corde
3) Nous avons ensuite tracé l'évolution de la sensibilité maximale en fonction de la longueur de la corde

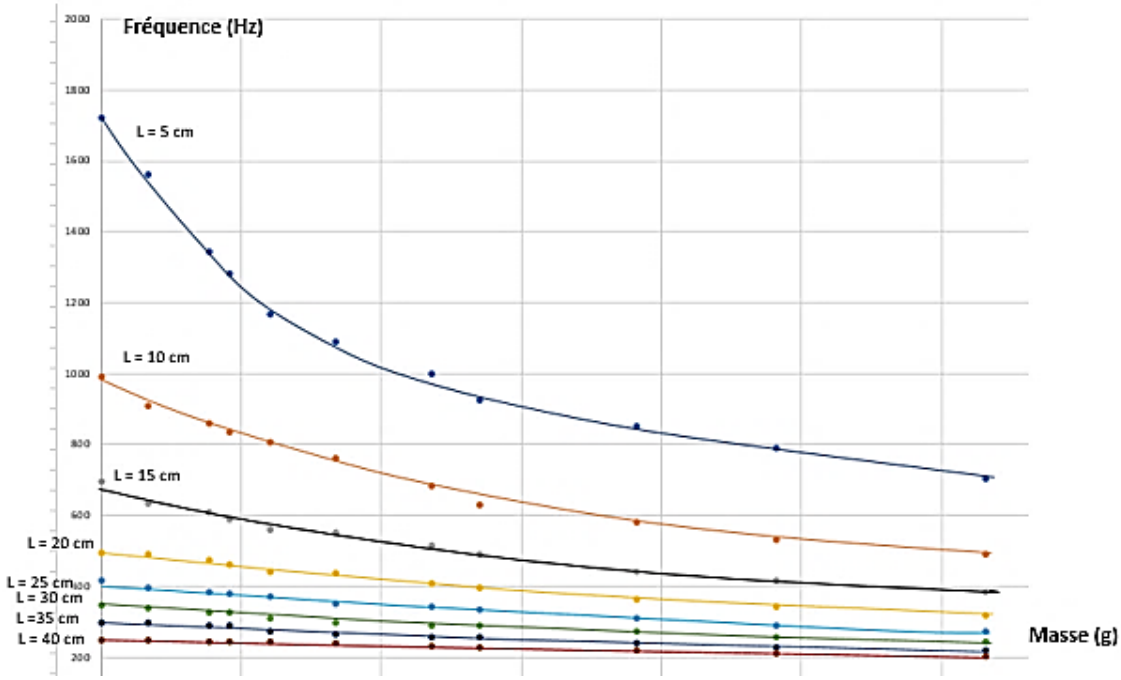
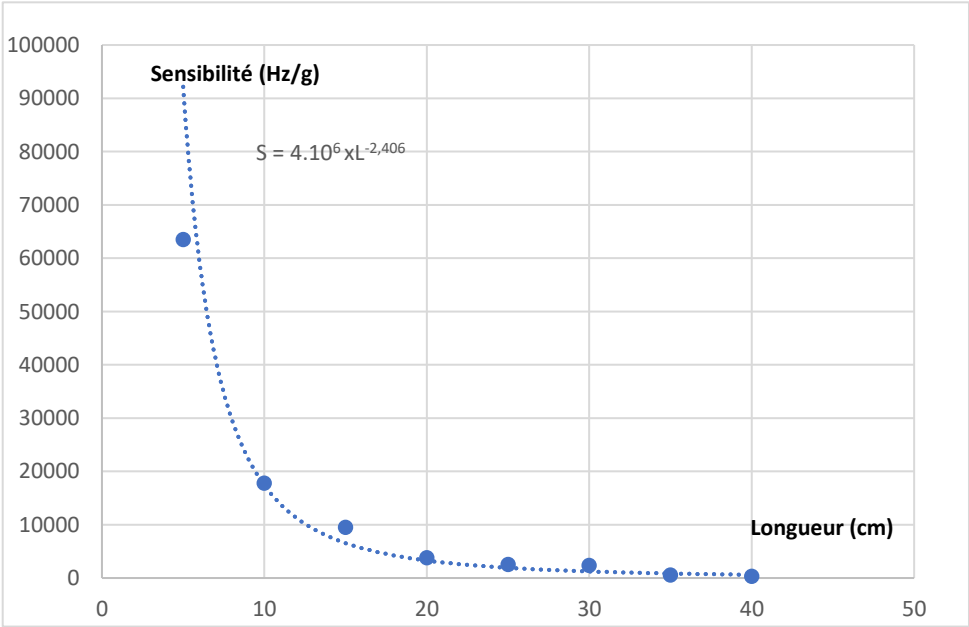


Figure 12 : Variation de la fréquence en fonction de la masse, pour différentes longueurs de corde

Une corde sera d'autant plus apte à différencier des masses que le rapport **ΔF/Δm** sera grand. Nous pouvons alors définir la sensibilité S de la corde par le rapport **ΔF/Δm.** Les courbes de la figure 9 nous permettent alors d'évaluer cette sensibilité, pour chacune des cordes. Puisque cela revient à évaluer la pente des courbes, nous voyons que la sensibilité maximale est atteinte pour la corde de plus faible longueur, et pour des masses faibles. Nous avons alors évalué la sensibilité maximale S_{max} pour chacune des longueurs de corde.



Sur la figure 13, on a alors tracé S_{max} en fonction de L. La sensibilité maximale de la corde augmente donc lorsque la longueur de la corde diminue, ce qui revient aussi à dire qu'elle augmente lorsque la fréquence de vibration à vide est grande.
Cette courbe est particulièrement intéressante, car elle nous permet de nous rendre compte à quel point il est intéressant de travailler avec des cordes de très faibles longueurs, comme on le fait au CEA.

Nous avons voulu approfondir l'exploitation de nos résultats :
Nous savons qu'au CEA, il a été possible de peser une molécule d'immunoglobuline d'environ 10^{-15} g. Compte tenu de la courbe que nous obtenons, la sensibilité varie en fonction de la longueur de la corde selon la relation :

$$Sensibilité = 4.10^{6} \times L^{-2,4} \quad \text{(en Hz/cm)}$$

Si on suppose qu'une variation de 1Hz suffit à détecter une masse, on voudrait donc atteindre une sensibilité égale à $1/10^{-15}$, soit 10^{15} Hz/g pour détecter la molécule d'immunoglobuline.

Il faudrait alors que notre corde ait une longueur d'environ 200 µm pour parvenir à mesurer la masse d'immunoglobuline. Or, c'est justement l'ordre de grandeur des dimensions des dispositifs permettant de réaliser cette mesure, comme le montre la photo suivante figure 14 :

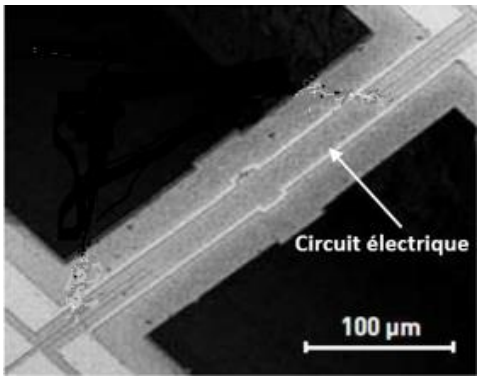


Figure 14 : poutre vibrante « MEM » fixée à ses deux extrémités.

Comme nous l'avons souligné au cours de ce paragraphe, la sensibilité augmente avec la fréquence à vide de la corde, ce que nous avons fait en modifiant la longueur de la corde, tout en maintenant sa tension constante.
Mais finalement, quel paramètre est important pour avoir une meilleure sensibilité ? Est-ce la fréquence à vide de la corde, ou bien sa longueur ?

Pour répondre à cette question, nous avons fait varier la fréquence en maintenant la longueur constante, donc en faisant varier la tension de la corde.

b- Variation de la fréquence en fonction de la tension, pour différentes masse accrochée (figure 15).

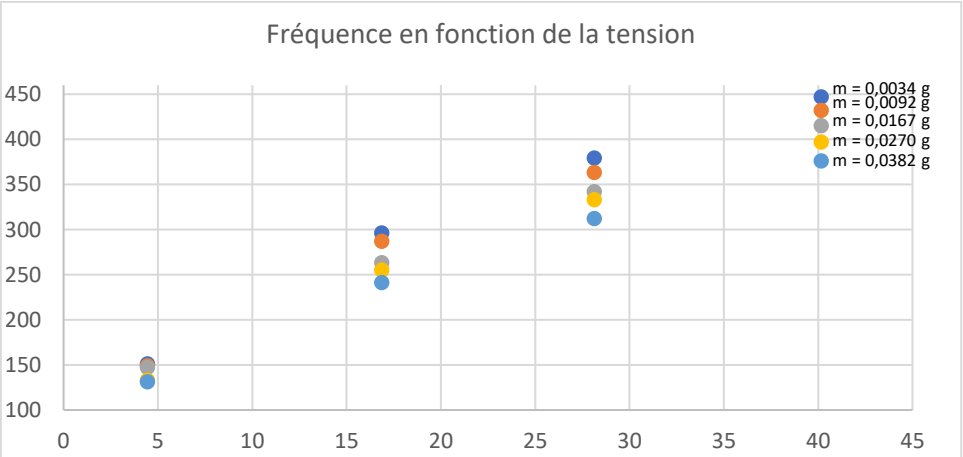


Figure 15 : Evolution de la fréquence en fonction de la tension (L fixe 35 cm) pour différentes masses

Les résultats montrent bien que pour une corde de même longueur, plus la tension de la corde est grande, donc plus la fréquence à vide est grande, et plus la variation de fréquence par ajout de masse sera grande. La fréquence semble donc être le paramètre important à gérer au départ. Et pour cela, on a le choix d'agir sur la tension, ou bien sur la longueur du dispositif. Cela dit, il semble plus facile d'agir sur la longueur du dispositif que sur la tension ; en effet, quelle devrait être la tension pour atteindre la même sensibilité que celle obtenue en agissant sur la longueur ? Voyons cela…

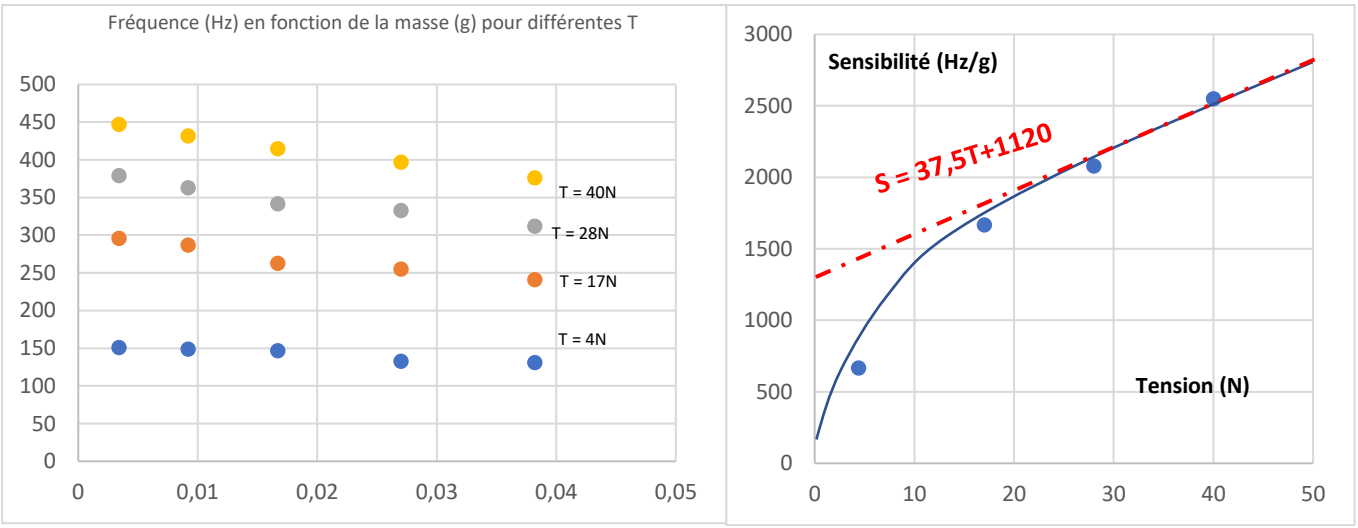


Figure 16 : à gauche : évolution de la fréquence en fonction de la masse, pour des cordes de mêmes longueurs mais de tension T différentes – A droite : évolution de la sensibilité de la corde en fonction de la tension.

Les tensions à exercer sont trop énormes pour être supportables : d'après nos mesures (figure 16), il faudrait une tension de l'ordre de $10^{13}\,N$:

$$S = \frac{\Delta F}{\Delta m} = 37{,}5 \times T + 1120 \Leftrightarrow T = \left(\frac{\Delta F}{\Delta m} - 1120\right) \times \frac{1}{37{,}5} = \left(\frac{1}{10^{-15}} - 1120\right) \times \frac{1}{37{,}5} = 2{,}6.10^{13}\,N$$

Remarque : nous avons fait le choix, dans le raisonnement précédent, de travailler avec l'asymptote oblique de la courbe montrant l'évolution de la sensibilité. En effet, physiquement, on aurait du mal à justifier que la sensibilité tende vers une limite fixe en augmentant la tension, et la courbe obtenue se rapproche d'une droite pour des fortes tensions.

Nous avons voulu finir cette étude de sensibilité du dispositif par un dernier point :

c - Est-ce que seule la fréquence est capable à elle seule de définir la sensibilité du dispositif ?

La question se pose effectivement, puisque comme on le soulignait, le fait de diminuer la longueur de corde ou d'augmenter la tension revient à augmenter la fréquence propre de vibration de la corde à vide, et cela permet une augmentation de la sensibilité. Est-ce qu'alors, si on travaille avec une corde vibrant à vide toujours à la même fréquence tout en travaillant avec des longueurs et des tensions différentes, la sensibilité varie ?
Pour répondre à la question, nous avons décidé cette fois-ci de travailler, avec comme condition initiale, la fréquence à vide (sans masse) constante, et en modifiant la longueur et la tension de la corde (figure 17).

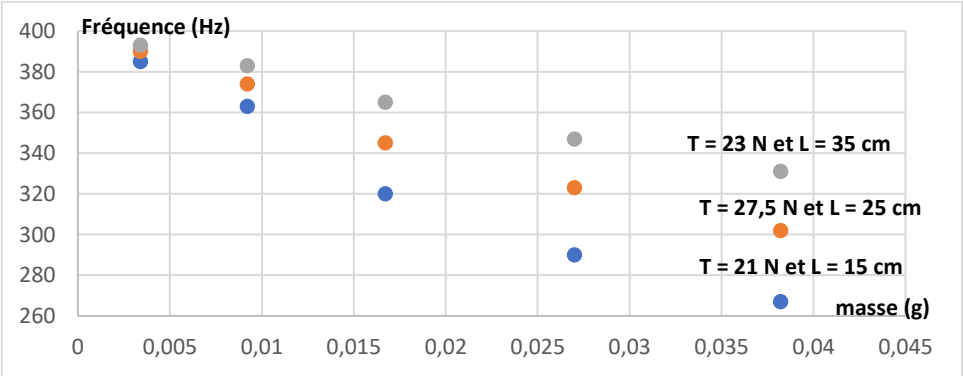


Figure 17 : Evolution de la fréquence de vibration en fonction de la masse pour des cordes vibrantes avec des fréquences fondamentales à vide identiques, mais de longueur L et tension T différentes.
Les résultats sont clairs : à fréquence à vide identique, la sensibilité de la corde varie en fonction de sa longueur ou de sa tension. Vu les études précédentes, puisque la diminution de tension tend à diminuer la sensibilité de la corde et que les résultats de la figure 17 montrent que la sensibilité augmente tout de même,

c'est que la longueur de la corde a plus d'influence que la tension. La longueur doit être le paramètre le plus influant ici, et donc le paramètre sur lequel il faut agir.

<u>Conclusion : qu'est-il préférable de faire ?</u>

Finalement, on a tout à gagner à travailler avec un dispositif vibrant de petite dimension dont la fréquence de vibration propre est la plus grande possible.

4) Quelles sont les limites de notre dispositif ?

Nous nous sommes dit que les forces de frottements doivent perturber nos résultats. En effet, de façon intuitive, les forces de frottements, au même titre que la masse accrochée, sont une contrainte de plus qui pourrait bien faire diminuer la fréquence de vibration du système. Il s'agirait de forces de frottements du type fluide, donc liées à la vitesse de déplacement de la corde. Or, d'une masse à une autre, l'amplitude de vibration de même que la fréquence de vibration n'étant pas les mêmes, la vitesse de déplacement de la corde et par suite les forces de frottement appliquées à la corde et à la masse accrochée seront différentes dans ces situations différentes. Un terme variable dû aux forces de frottements contribuerait à la diminution de fréquence observée, et cela engendrerait une erreur sur la valeur de la masse qu'on cherche à peser.

Nous avons alors voulu évaluer l'impact des forces de frottements sur la fréquence de résonance du dispositif. Mais comment faire cela ?

Nous avons alors appris qu'un système vibrant, forcé à vibrer à une fréquence imposée par un excitateur, et soumis à des forces de frottements du type visqueux, peut voir sa fréquence propre de vibration diminuer si les forces de frottements sont suffisantes. Il existe alors un facteur qui permet de mettre cela en évidence : le facteur de qualité.

Si le facteur de qualité est supérieur à 10, des études théoriques montrent que la fréquence de résonance n'est pas affectée par la présence des frottements de type fluide. Dans le cas inverse, en présence de force de frottements, la bande de fréquence conduisant à une oscillation du système s'élargie et la fréquence de résonance diminue.
Pour étudier l'impact des frottements sur les fréquences de vibration de la corde, nous avons alors cherché à évaluer le facteur de qualité de la corde à laquelle nous avons accroché des masses différentes, de plus en plus lourdes (figure 18). De façon pratique, pour faire cela, nous avons fait varier la fréquence du générateur, et nous avons mesuré l'amplitude du signal enregistré par le microphone.

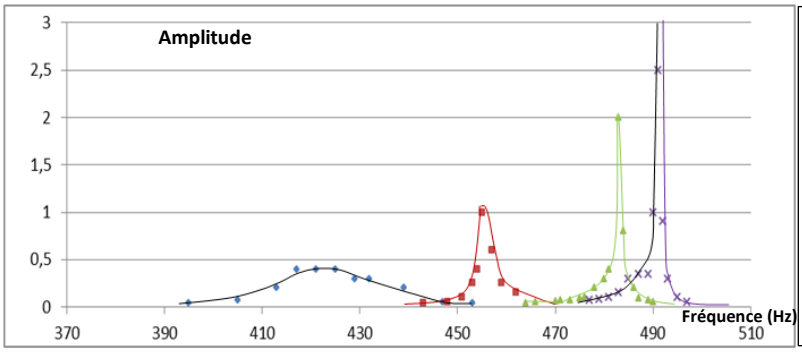


Figure 18 :

De gauche à droite :
Courbe de résonance de la corde avec une masse de 0,1 g (en bleu)
Courbe de résonance de la corde avec une masse de 0,05 g (en rouge)
Courbe de résonance de la corde avec une masse de 0,01 g (en vert)
Courbe de résonance de la corde à vide (en violet)

On constate que la courbe de résonance se décale d'autant plus vers les faibles fréquences que la masse accrochée sur la corde est grande. Est-ce qu'une partie de ce décalage en fréquence est dû aux frottements ? D'autre part, la courbe s'étale également davantage lorsque la masse augmente, rendant la résonance de plus en plus floue. Cette évolution est cohérente avec l'influence d'une force de frottement sur la résonance du système vibrant. Est-ce que les frottements limitent alors la sensibilité du système ?

Le calcul du facteur de qualité va nous permettre de trancher quant à l'influence des forces de frottement. La résonance d'un système vibrant peut être pointue ou floue, ce qui peut être quantifié par le facteur de qualité. Plus la résonance est pointue, et plus le facteur de qualité est grand, et moins les frottements influent sur la fréquence de résonance.

Le facteur de qualité d'un système vibrant a pour expression : $Q = \frac{f_0}{\Delta f}$

où f_0 est la fréquence de résonance, et Δf est la bande de fréquence telle que l'amplitude des oscillations reste supérieure à l'amplitude maximale divisée par racine de 2.
Plus le facteur de qualité est élevé, et plus la résonance sera pointue. Et mieux que ça, d'après des études théoriques, si Q >10, les forces de frottements ne modifient alors pas la fréquence de résonance de façon visible. Et bien si on mesure les facteurs de qualité pour les différents pics de la courbe ci-dessus, tracés chacun d'entre eux avec des masses différentes accrochées à la corde, on trouve que le facteur de qualité est toujours supérieur à 10, donc que les forces de frottement n'ont aucune influence sur la fréquence de résonance de la corde. Les frottements ne sont donc pas responsables de la variation de la fréquence observée lorsqu'on accroche la masse sur la corde.

Pour une corde de longueur L et de tension T fixées, la fréquence de résonance du système « corde + masse » dépend donc bien uniquement de la valeur de la masse accrochée sur la corde. On retrouve une évolution qui est en adéquation avec les documents d'introduction : la présence de la masse diminue la fréquence de résonance du système.

Le fait qu'il soit possible de modifier la fréquence de vibration de la corde au moyen d'un élément extérieur (comme la masse dans nos expériences précédentes), nous a poussé à chercher des applications que l'on pourrait envisager utilisant le même principe. Peut-on mesurer une viscosité ? Une température ? Une densité ? Peut-on contrôler la masse d'un dépôt sur une électrode vibrante lors d'une électrolyse ?

IV – Quelles applications peuvent être envisagées à notre échelle ?

La corde de guitare tendue et tout le dispositif qui l'accompagne rendent l'ensemble peu pratique à manier en vue d'une application. Y a-t-il alors moyen de faire vibrer des objets plus maniables ? Oui : si on accroche une tige, une lame ou un morceau de corde de guitare à une seule de ses extrémités à un vibreur dont on peut régler la fréquence de vibration, on forcera ce système à vibrer. Mais le fait de travailler avec un morceau de corde non tendu et fixé uniquement à l'une de ses extrémités permet-il d'atteindre des sensibilités comparables à ce qu'on a obtenu pour une corde de guitare tendue à ses deux extrémités ? C'est ce que nous avons voulu savoir dans un premier temps :

<u>1) Comparaison entre la sensibilité d'une corde de guitare tendue et un morceau de cette corde non tendu et fixé uniquement à l'une de ses extrémités :</u>

Comme précédemment, nous avons donc mesuré la fréquence de résonance pour différentes longueurs de corde, en fonction de la masse. Voici le dispositif expérimental utilisé et les résultats expérimentaux obtenus (figure 19) :

A partir de ces résultats, nous avons pu calculer la sensibilité maximale (c'est-à-dire pour des masses faibles) pour chacune des longueurs de corde. Nous avons ensuite tracé l'évolution de cette sensibilité en fonction de la longueur L (figure 20) :

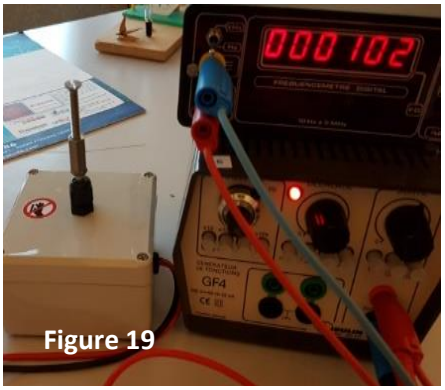
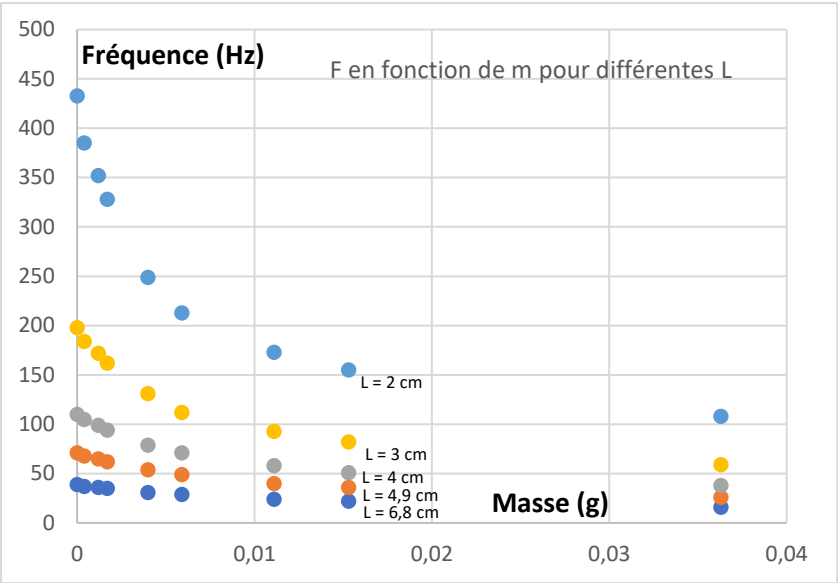


Figure 19: Vibreur et tronçon de corde



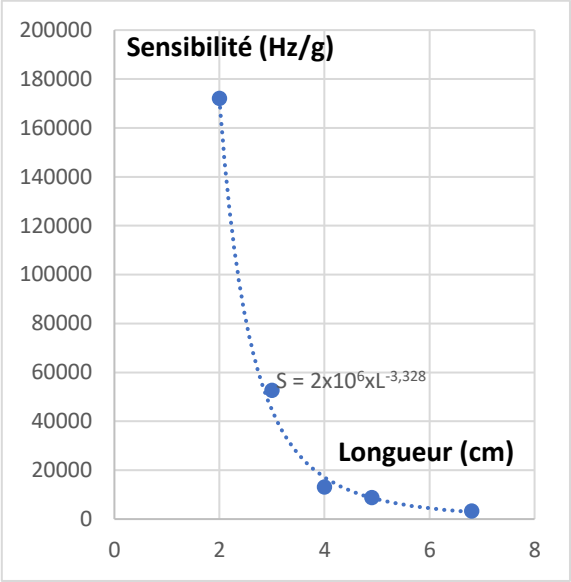


Figure 20 : Evolution de la sensibilité S du tronçon de corde en fonction de sa longueur L.

Nous avons alors pu comparer les sensibilités en fonction des longueurs de la corde, selon qu'elle est fixée à ses deux extrémités ou à 1 seule (figure 21) :

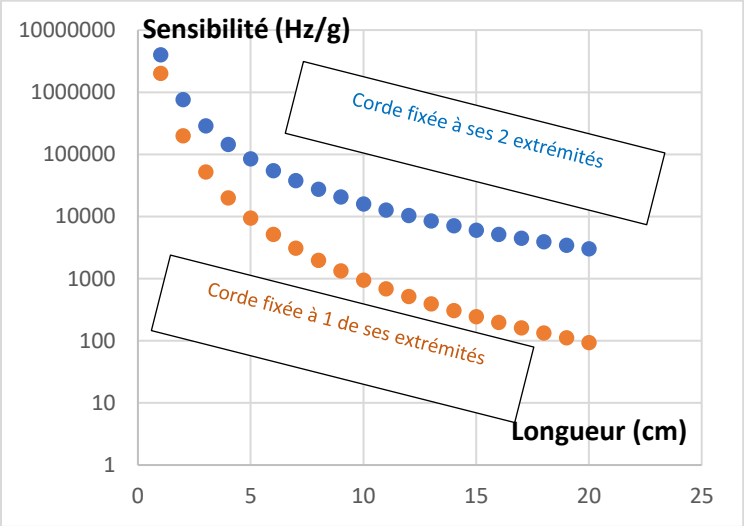


Figure 21 : comparaison des sensibilités en fonction des longueurs de la corde, selon qu'elle est fixée à ses deux extrémités ou a 1 seule.

Nous avons utilisé une échelle logarithmique pour des raisons pratiques.
On peut voir que plus la corde est petite, plus les deux dispositifs seront équivalents, ce qui n'est pas le cas pour des longueurs plus humaines. On comprend alors pourquoi le CEA travaille aussi bien avec des poutres fixées à ses 2 extrémités, qu'avec des poutres vibrantes fixées qu'à une seule d'entre elles (figure 22).

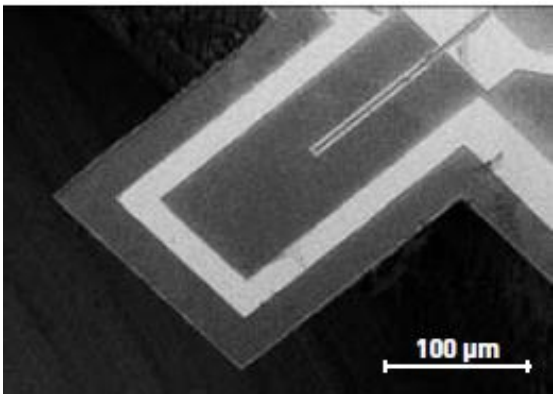


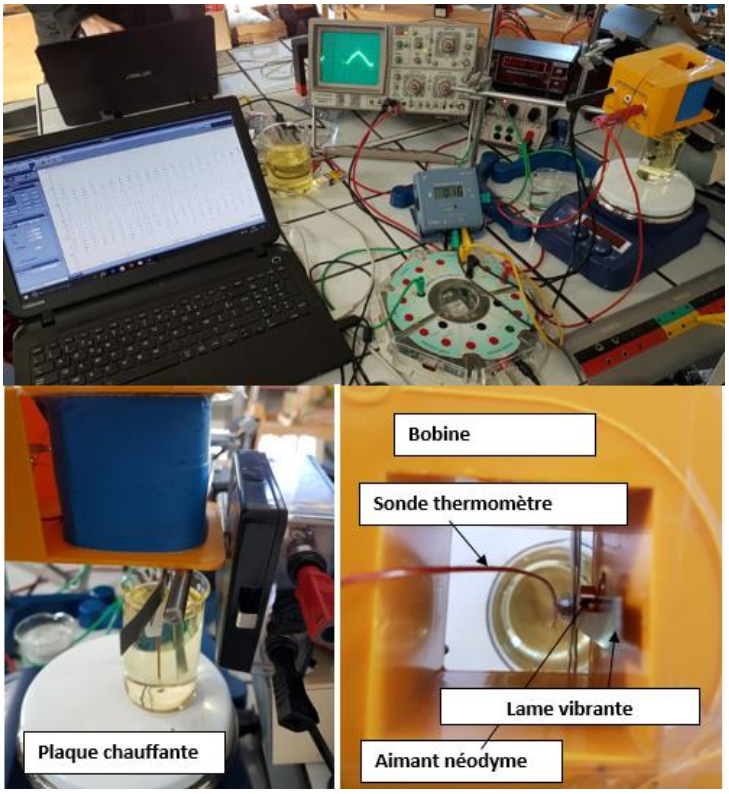
Figure 22 : on voit une languette composée d'une poutre, d'un support, et d'un circuit imprimé.

Maintenant que nous savons que nous pouvons utiliser ces poutres vibrantes, que peut-on essayer de faire avec ?

2) Peut-on mesurer une viscosité ?

Nous nous sommes dit qu'il devait être possible de mesurer la viscosité en faisant vibrer une lame dans de l'huile. Du moins, si la viscosité de cette huile est modifiée suite à une variation de la température, il devrait être possible de l'observer grâce à notre dispositif. C'est ce que nous avons tenté de faire. Nous avons fait vibrer la lame dans une huile alimentaire, dont nous avons fait varier la température de 10 à 90°. Résultat de l'expérience : nous n'avons observé aucune variation de fréquence !

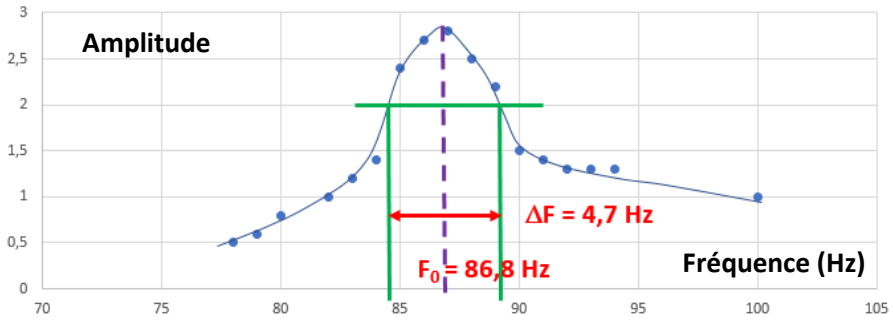
Ce résultat nous a particulièrement étonné. Comme nous l'avons appris à le faire lors de notre projet, nous avons évalué le facteur de qualité de la lame forcée à vibrer dans l'huile en traçant la courbe de résonance : Nous avons dû pour cela mesurer l'amplitude de vibration de la lame plongeant dans l'huile, ce qui a été possible en disposant un tout petit aimant sur la lame (figure 23), et en mettant une bobine électrique autour de la lame vibrante. L'aimant vibrant dans la bobine a alors créé un courant induit lié au mouvement de la lame. Nous visualisons alors ce courant aussi bien sur un oscilloscope que sur un ordinateur par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition, ce qui nous permet de mesurer précisément l'amplitude et la fréquence de vibration de la lame en fonction de la fréquence d'excitation imposée par le générateur. Nous avons reproduit l'expérience en la filmant pour mieux se rendre compte du dispositif utilisé. La vidéo est visualisable à l'adresse suivante : http://dai.ly/k1s8eZds9DzlUzqeIzA



Remarque : la lame que nous utilisons lors de ces expériences est mise en vibration par un vibreur situé au milieu de la lame. Le mode fondamental de la vibration de la lame est dont tel qu'au centre réside un nœud de vibration, alors qu'aux extrémités se trouvent des ventres. En effet, lorsque la fréquence du vibreur est égale à la fréquence propre du mode fondamental, la vibration au centre de la lame, créée par le vibreur, est d'amplitude négligeable comparée à l'amplitude de vibration aux extrémités de la lame. D'autre part, nous avons remarqué que même si une des extrémités de la lame est dans le liquide, et même si on accroche un aimant sur l'autre partie de la lame, cela ne change pas la position des nœuds et des ventres. Ceci est d'ailleurs cohérent avec le fait que lorsqu'on accroche la masse sur la corde fixée à ses deux extrémités, les positions des nœuds et des ventres n'étaient pas non plus modifiées.

Figure 23 : en haut : dispositif complet – En bas à gauche : lame vibrante plongeant dans l'huile – En bas à droite, vue de dessus (par-dessus la bobine).

Et voici alors la courbe de résonance obtenue :



Avec une telle courbe, le facteur de qualité est égal à $Q = \frac{F_0}{\Delta F} = \frac{86{,}8}{4{,}7} = 18$

Avec un tel résultat, cela confirme alors que les frottements visqueux sur la lame, même s'ils sont importants, ne suffisent pas à modifier la fréquence de vibration propre de la lame.

Remarque : Nous avons présenté nos résultats à Jean-Christophe GABRIEL, directeur de recherche en nanoscience au CEA. Nous avons alors échangé à ce sujet, et il s'avère que les études que nous avons menées avec la corde de guitare pour modéliser les micro poutres vibrantes sont très représentatives de ce qui se fait au CEA. La question du positionnement de la masse, l'asservissement pour maintenir la corde à la fréquence de résonance, le fait de travailler à haute fréquence pour avoir des systèmes sensibles, sont des points essentiels auxquels nous avons spontanément réfléchis. Notre choix de faire intervenir le facteur de qualité pour comprendre l'impact des forces de frottements semble également pertinent car c'est effectivement en ces termes que les discussions autour des MEMs se font au CEA. Cela dit, il est ressorti de nos discussions que nos conclusions concernant l'impact négligeable de la

viscosité sur la variation de fréquence de nos cordes ou de nos lames ne sont pas transférables aux micro poutres. En effet, Jean-Christophe Gabriel nous a au contraire dit que les micro poutres sont très sensibles à la variation de viscosité. Le comportement très différent entre nos poutres vibrantes et les micro poutres du CEA provient sans aucun doute des masses très différentes de ces systèmes vibrants. Ceux que nous utilisons ont alors une masse trop grande pour que la variation de viscosité joue un rôle significatif dans la variation de fréquence. Concernant le MEMs, les facteurs de qualité sont de l'ordre de 10^5 dans le vide, 10^4 dans les gaz, et entre 1 et 10 dans l'eau, ce qui les rend inutilisables dans l'eau.

Puisque la lame vibrante semble indifférente à la viscosité, il nous est venu une autre idée : est-il possible de mesurer précisément la densité d'un liquide au moyen de la lame vibrante ?

3) Peut-on mesurer une densité ?

Actuellement, la densité peut être obtenue par une mesure de volume et une pesée. Il est possible également d'utiliser un densimètre reposant sur la poussée d'Archimède, mais qui donne somme toute des résultats peu précis. Alors est ce qu'avec notre dispositif, on peut faire mieux qu'un densimètre en termes de précision, tout en ayant recours à une mesure simple à réaliser ?

Nous avons repris le même dispositif que celui utilisé pour la mesure de la viscosité. Nous avons alors mesuré les écarts de fréquences de vibration de la lame plongeant dans une eau saturée en sel, dans de l'eau, de l'huile, et du cyclohexane.

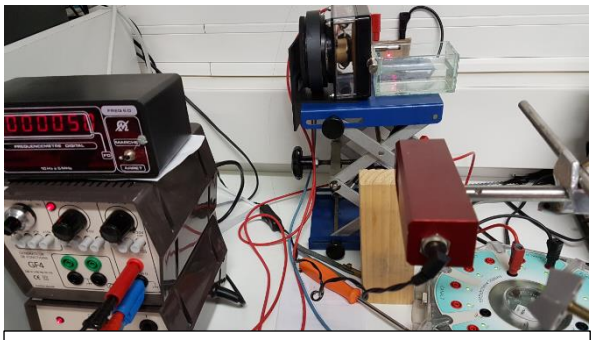


Figure 24 – suivi de la vibration du tronçon de corde

Les premiers résultats expérimentaux ont été concluants, car nous percevons bien une différence de fréquence, mais qui reste faible : uniquement 7 Hz entre la densité de l'eau salée et celle du cyclohexane. Cela dit, pour faire ces mesures, nous avons utilisé une lame dont la fréquence propre de vibration était relativement faible. Il ne fait nul doute que les écarts de fréquences peuvent se creuser si on utilise une lame plus sensible, donc plus courte, ou dans un matériau plus rigide pour vibrer à plus haute fréquence.

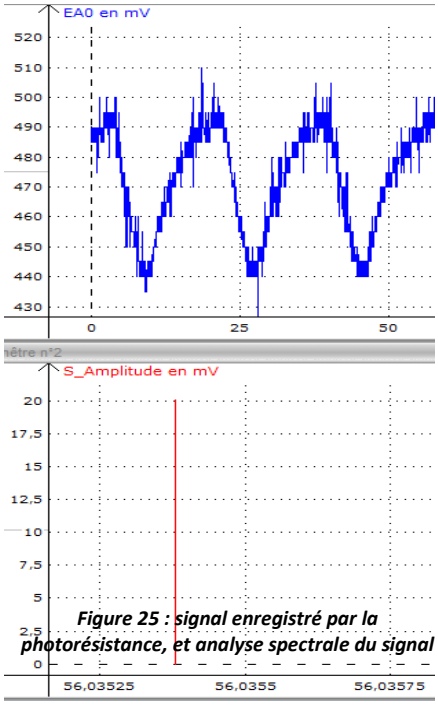


Figure 25 : signal enregistré par la photorésistance, et analyse spectrale du signal

Nous avons poursuivi alors nos essais en faisant vibrer un morceau de corde de guitare de 3,5 cm de longueur (figure 24). Et pour faire des mesures précises de la fréquence de vibration, comme nous ne pouvions pas alourdir le petit morceau de corde en accrochant un aimant dessus, nous avons suivi la vibration de la corde grâce à un faisceau laser pointant vers une photorésistance. Sur le trajet du faisceau laser se trouvait la corde vibrante qui faisant alors varier l'intensité lumineuse du faisceau arrivant sur la photorésistance. La mesure de la fréquence a pu alors être réalisée par analyse spectrale (figure 25). Les premières mesures montrent un décalage de la fréquence mesurable et nous cherchons encore à optimiser le dispositif.

4) Peut-on réaliser un thermomètre ?

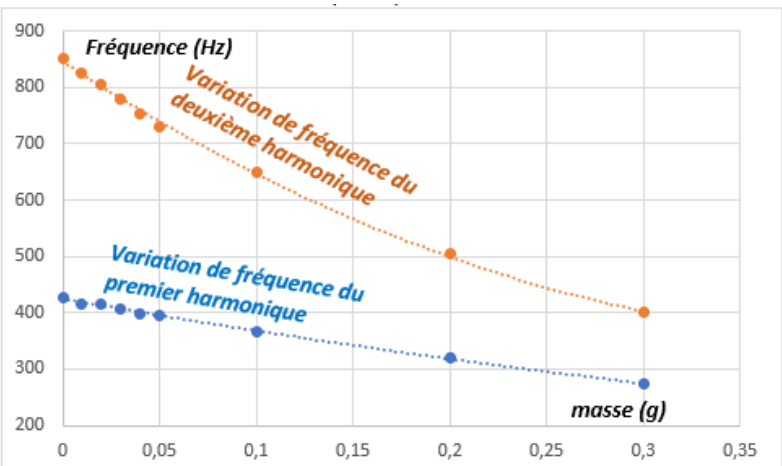
Nous cherchons également à mettre au point un thermomètre reposant sur le phénomène étudié. En effet, nous avons pu voir qu'une modification de la température du système vibrant conduisait à une variation de sa fréquence propre de vibration, ce qui découle d'une modification de la célérité des ondes dans le milieu dans lequel se propage la perturbation. Dans le cas de la corde de guitare, le fait de la faire traverser par un courant la fait s'échauffer, ce qui a une influence sur la variation de fréquence. Nous pouvons essayer d'exploiter ce phénomène de façon quantitative, ce qui est une des suites possibles à donner à notre projet.

5) Et au CEA, quelles applications prévoit-on ?

Au CEA, les poutres vibrantes sont un milliard de fois plus petites qu'une corde de guitare, soit de l'ordre du nanomètre. Grâce à leurs très petites tailles, leurs fréquences de résonance se trouvent dans des gammes de 3 kHz à 300 GHz. Si une masse est ajoutée sur le résonateur, sa fréquence de vibration diminue. On peut ainsi noter une variation de fréquence dès l'ajout de molécules contenant une centaine d'atomes. La technologie a tellement avancé dans ce domaine, qu'il est même possible qu'un 1 seul atome modifie la fréquence de vibration de façon mesurable ! On est donc en présence de détecteurs vraiment performants ! C'est justement dans cette optique là que certaines recherches sont faites.

Mais avant d'aborder les applications à proprement parler, il faut que nous attardions sur un point : avant de contacter Monsieur GABRIEL pour lui présenter notre projet, nous pensions que les molécules s'accrochaient sur les poutres en des sites particuliers, grâce à des genres de fixateurs déposés de façon précise sur la poutre, et capables de ne fixer qu'un seul type de molécule. Mais suite à nos échanges, il s'avère que ce n'est pas le cas actuellement. De ce fait, des molécules de masses différentes peuvent se déposer sur la poutre, en des endroits aléatoires. Ainsi, la masse n'est pas la seule inconnue du problème et la variation de fréquence sera alors due à la fois à la masse de la molécule, ainsi qu'à la position où la molécule se fixera : une grosse masse positionnée proche de l'extrémité fixe de la poutre peut engendrer une même diminution de fréquence qu'une très faible masse positionnée au niveau du ventre de vibration. Pour relier la variation de fréquence à la molécule, une mesure unique ne suffit plus, il faut alors 2 équations. L'idée est alors, connaissant préalablement les fréquences des modes propres de vibration de la poutre, de la faire vibrer dans son mode fondamental lorsque la molécule est déposée dessus, puis, rapidement avant que la molécule ne bouge, selon son deuxième harmonique. Comme les positions relatives de la molécule par rapport aux ventres de vibration de la poutre sont différentes selon les différents modes propres de vibration, cela permet d'obtenir les deux équations différentes qui permettront de remonter à la connaissance de la masse et de la position de la molécule.

Nous nous sommes nous-mêmes amusés à mesurer les diminutions de fréquence de résonance d'une corde tendue sur laquelle nous avons déposé, toujours au même endroit, différentes masses, à la fois pour le mode fondamental et pour le deuxième harmonique. On obtient alors les deux courbes suivantes. On comprend bien alors que si on réitère l'expérience pour différentes positions des masses, on obtiendra un ensemble de courbes qui permettra de retrouver à la fois la valeur de la masse, ainsi que sa position sur la corde.



Le but de ces systèmes est qu'ils puissent, *in fine*, être utilisés pour détecter dans l'air ambiant la présence de composés chimiques particuliers. On prévoit par exemple par exemple la détection d'armes chimiques, biologiques ou explosives dans un contexte militaire, ou encore la mesure de concentration de composés toxiques (drogue…) dans l'environnement. On prévoit également une utilisation dans le domaine médical, en tant qu'outil pour établir un diagnostic en détectant la présence de molécules dans l'air expulsé par un patient. En effet, dans des maladies comme le cancer, certains marqueurs chimiques pourraient ainsi être révélés dans le souffle du patient.

Mais comme nous le soulignons, étant donné que les poutres ne sont pas encore spécifiques à un seul type de molécule, le CEA travaille non pas avec 1 seule poutre, mais avec un ensemble de poutres (une dizaine maximum), de sorte que chaque poutre ait un comportement différent avec les propriétés différentes des molécules. Cela permet de contourner la non spécificité des poutres vibrantes. Ces poutres constituent alors un « nez artificiel » analysant les molécules dans un espace à 10 dimensions, comme le soulignait Jean-Christophe GABRIEL. Pour comparaison, notre nez, quant à lui est capable d'analyser sur plusieurs milliers de dimensions. Pourquoi ne pas alors travailler avec des nez artificiels de plusieurs milliers de poutres ? Et bien pour des problèmes de stabilité des mesures dans le temps lorsqu'on fait travailler un grand

nombre de capteurs en même temps. Notre nez naturel est, du moins en ce qui concerne ce point-là, plus performant que le nez artificiel.

Ce nez artificiel est donc un sujet d'étude actuel au CEA. Cela dit, les MEMs sont bel et bien déjà exploités, notamment par APIX, une entreprise fondée par des chercheurs Français et Américains, issus du CEA-Leti et qui fabrique des systèmes miniaturisés d'analyse de mélange gazeux pour des applications industrielles, environnementales et de sécurité, avec qui nous sommes également entrés en contact. En effet, même s'il est encore compliqué d'exploiter les MEMs pour déterminer la nature d'une molécule, la fréquence de résonance de la poutre varie extrêmement rapidement lorsqu'une molécule s'y accroche dessus, ce qui fait donc des MEMs des détecteurs dotés d'une très grande résolution temporelle. La société APPIX a alors disposé ces MEMs à la sortie d'un chromatographe, le tout sur une puce de quelques centimètres carrés. Ainsi, si deux espèces chimiques sortent du chromatographe à des instants voisins, la résolution des MEMs permet de distinguer 2 pics, là où les spectromètres de masse ne seraient pas en mesure de séparer les deux entités.

Dans ces applications, le choix du matériau constituant le MEM est important, de par ses propriétés mécaniques (il doit pouvoir vibrer à une fréquence propre élevée et précise), et électrique. On cherche en effet à faire vibrer des matériaux piézoélectriques pour que la vibration mécanique génère un courant électrique témoignant de la vibration de la poutre.
Le quartz est par exemple un matériau piézoélectrique. On l'utilise entre autres pour détecter l'évaporation de composés chimiques : on réalise ainsi une microbalance à quartz. Le principe est de détecter la variation de fréquence du quartz en oscillation causée par le dépôt du composé en cours d'évaporation. Le CEA travaille aussi avec des diamants qu'ils synthétisent. Le diamant présente en effet une fréquence de vibration très stable est très élevée, ce qui, en conformité avec l'étude que nous avons menée permettra d'atteindre une grande sensibilité.

Remarque : Les poutres utilisées par le CEA ne sont pas tendues comme le sont les cordes que nous avons utilisées. Ainsi, pour un matériau de longueur donnée, il faudra choisir un matériau capable de vibrer à haute fréquence, ce qui se traduit par une forte rigidité du matériau, ou encore d'un fort module d'Young. On comprend ainsi l'emploi du diamant, qui possède un module d'Young très élevé (1200 GPa) comparé au quartz (70 GPa). Le facteur de qualité des poutres réalisées avec du diamant, très élevé aussi, témoigne de la grande stabilité de la fréquence de vibration au cours du temps.

Conclusion :

A travers ce projet, nous avons pu cerner le phénomène physique qui explique la variation de la fréquence de vibration d'une corde en fonction de la masse. Nous avons également compris, grâce à l'exploitation de nos mesures, les choix qui sont faits quant aux caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés pour réaliser ces véritables micros détecteurs.
Durant tout ce projet, nous avons cherché à être précis et rigoureux, pour que nos résultats et nos conclusions soient fiables. Cela nous a imposé à prendre en compte toutes les observations que l'on pouvait faire, comme par exemple l'impact du déplacement du chevalet sur la tension de la corde. Et toutes ces questions ont finalement été des défis qui nous ont vraiment plu, puisqu'ils nous ont poussé à aller plus loin que nous le pensions initialement.
Le champ des applications semble extrêmement large, à condition toutefois d'être capable de miniaturiser les dispositifs, ce qui pour nous restait délicat. Mais cela ne nous a pas empêché de prendre beaucoup de plaisir à rentrer dans les détails, à chercher à comprendre le fonctionnement d'un MEM (Micro Electro Mechanical System) ou encore à imaginer des applications réalisables à notre échelle. Nous comptons poursuivre d'ailleurs dans ce sens. En effet, nous pouvons chercher à augmenter la sensibilité des lames que nous avons utilisé lors de la mesure de la densité. Et nous comptons bien réaliser un thermomètre capable de donner une température à partir de la vibration d'une poutre.

Remerciements :

Nous remercions Sciences à l'Ecole et la fondation CGénial pour nous permettre de vivre cette aventure scientifique, le CEA, qui nous a ouvert ses portes lors d'une visite passionnante, et Jean-Christophe GABRIEL, directeur de recherche en nanoscience au CEA, avec qui nous avons des discussions passionnantes.

Annexe : Programme Arduino permettant la recherche de la fréquence de vibration de la corde, et l'affichage des résultats.

```
const int sortie=4; //broche sortie
const int entree=A0; //broche entrée
int seuil=50;//valeur de l'amplitude minimale du son ;
int seuil2= 5;//valeur de l'amplitude de sortie de phase2();
int freq=460; //frequence de depart;
int ampl=1; // amplitude mesurée
int amplprev= ampl;//amplitude précédente
int sens_aug = -1; // sens de changement de fréquence pour phase 2
#define DELAI 1
const int temps = 10000; //entre chaques changements de frequences

// constante de code de transmission Serial vers l'ordinateur
const char DEBUT  = 'D';
const char PHASE  = 'P';
const char CH_SENS= 'C';
const char VAL    = 'V';

// constantes de communication depuis l'ordinateur vers l'arduino (
const char SEUIL     = 'S';
const char FREQUENCE = 'F';
const char AMPLITUDE = 'A';
const char TESTFREQ  = 'T';

const short LF = 10; // retour à la ligne = "\n"
const char NONE = 'N';// remplace NULL

boolean modeTestFreq = false;

// classe pour découper les messages correctement
class SplitMessage{
  private:
    char typeMessage = NONE;
    int messageValue1 = 0;
    int messageValue2 = 0;

    int nombreValeurs = 2;

    int end = 0; // pour éviter d'utiliser un pointeur.

    int parseInt(String text){
      //int a = text.length();
      return parseInt(text, 0, ','); // valeurs par défaut.
    }

    int parseInt(String text, unsigned int start, char stop){
      int val = 0;
      int newVal = 0;
      unsigned int i = start;
      for(; i<text.length() && text[i]!=stop && text[i]!=LF; i++) {
        //Serial.print("K,parseInt ");Serial.print(i);Serial.print(" ");Serial.println(text[i]); //debug
        if (text[i] >='0' && text[i] <='9'){ // caractère compris entre 0 et 9 ?
          newVal = text[i]-'0'; // conversion en chiffre
          val *= 10;      // ajout du chiffre
          val += newVal;  // à la fin du nombre
          //Serial.print("K, val :");Serial.println(val);
        }
      }
    end = i; // revoyer l'endroit où on s'est arrêté dans la chaîne
    return val; // renvoyer la valeur
  }

public:
  // ce qui va servir a qqchose
  void split(String message, char car){
    //Serial.println("K, SPLIT : "+message+" AVEC : "+car);
    typeMessage = message.charAt(0);
    messageValue1 = 0;
    messageValue2 = 0;

    if (typeMessage==AMPLITUDE) { // 0 valeurs
      //Serial.println("K, AMPLITUDE");
      return;
    }

    int start = 2;
    end = 0; //va être modifié dans cette méthode VVV.
    messageValue1 = parseInt(message, start, car);

    if (typeMessage==FREQUENCE || typeMessage == TESTFREQ){ // 1 valeurs
      //Serial.print("K, FREQUENCE ou TESTFREQ (");Serial.print(typeMessage);Serial.print(") : ");
      //Serial.println(messageValue1);
      return;
    }
```

```
  start = end + 1; // a été modifié quelques lignes plus haut dans la méthode parseInt
  messageValue2 = parseInt(message, start, car); // 2 valeurs (pour seuil)
    //Serial.print("K, SEUIL (");Serial.print(typeMessage);Serial.print(") : ");
    //Serial.print(messageValue1);Serial.print(", ");
    //Serial.println(messageValue2);
}

/* les 3 méthodes qui suivent
 * permettent de récupérer les résultats
 * de l'opération
 */

char getTypeMessage(){
  return typeMessage;
}

int getVal1(){
  return messageValue1;
}

int getVal2(){
  return messageValue2;
}

void reset(){
  //Serial.println("K,Split RESET");
  typeMessage = NONE;
  messageValue1 = 0;
  messageValue2 = 0;
     end = 0;

     nombreValeurs = 2;
   }
};

SplitMessage data;

void gererEvenement(){ // ne sert pas
  gererEvenement(0);
}

void gererEvenement(unsigned long tpsRestant){
  //Serial.print("K,gererEvenement :");Serial.println(tpsRestant);//debug
  char type = data.getTypeMessage();
  int val1 = data.getVal1();
  int val2 = data.getVal2();
  //Serial.print("K,");Serial.print(type);Serial.print(",");Serial.print(val1);Serial.print(",");Serial.println(val2);//debug
  if (type == AMPLITUDE) {
    //Serial.println("K,Mesurer Amplitude,");//debug
    mesure_ampl(entree);
  }
  else if (type == SEUIL) {
    //Serial.print("K,Seuil : ");Serial.print(val1);Serial.print(",");Serial.println(val2);//debug
    if (val1==1) {
      seuil = val2;
    }else if (val1==2) {
      seuil2 = val2;
    }
    Serial.print(DEBUT);Serial.print(",");  // envoyer les informations (texte = "D,%seuil,%seuil2,\n")
    Serial.print(seuil);Serial.print(",");
    Serial.print(seuil2);Serial.println(",");
  }
  else if (type == FREQUENCE) {
    //Serial.print("K,Changer Frequence,");//debug
    //Serial.println(val1);//debug
    freq = val1;
    noTone(sortie);
    tone(sortie, freq, tpsRestant);
    Serial.print(VAL);Serial.print(",");
    Serial.print(ampl);Serial.print(","); //envoi informations (texte = "V,%ampl,%freq,\n")
    Serial.print(freq);Serial.println(",");//car variation de FREQUENCE
  }
  else if (type == TESTFREQ) {
    //Serial.print("K,Mettre en test Freq ? : ");//debug
    modeTestFreq = (boolean) val1;
    //Serial.println(modeTestFreq);//debug
    if (modeTestFreq){
      testFreq();
      tone(sortie, freq, tpsRestant);
    }
  }
}
```

```
void delai(unsigned long milliseconds){ // delai interface avec gestion évenements
  //Serial.print("K,debut delai "); //debug
  //Serial.println(milliseconds);//debug
  unsigned long tpsRestant = _delai(milliseconds); // ce n'est pas le même delai()
  if ((data.getTypeMessage() == NONE)||(tpsRestant==0)){
    data.reset();
    //Serial.println("K,fin delai"); //debug
    return;
  }
  //Serial.println("K,delai/gerer evenement");//debug
  // sinon : gérer les événements
  gererEvenement(tpsRestant); // le tps Restant est pour indiquer combien de temps il faut faire vibrer la corde si changements de fréquences (ou t
  // et boucler (note : s'il n'y a pas eu d'événements, le programme ne peut pas boucler ici, car il est sorti au niveau du return)
  //Serial.print("K,fin delai avec evenement -> bouclage avec tpsRestant :");Serial.println(tpsRestant);//debug
  delai(tpsRestant);
}
  unsigned long _delai(const unsigned long milliseconds){ // delai technique
    //Serial.print("K,debut _delai ");//debug
    //Serial.println(milliseconds);//debug
    unsigned long partialResult = milliseconds;
    unsigned long a = millis();// millisecondes du début
    //Serial.print("K,millisecondes : ");Serial.println(a);//debug
    data.reset();
    do{
      if(Serial.available()>0){// y a-t-il des données en provenance de l'ordinateur ?
        String message = Serial.readStringUntil(LF); //lire ces données jusqu'au retour à la ligne.
        if (message != NULL){ // si il y a un message
          //Serial.print("K,MESSAGE : ");//debug
          //Serial.print(message);//debug
          //Serial.println(",");//debug
          data.split(message, ',');
          partialResult = a + milliseconds - millis();
          //Serial.print("K,fin _delai partiel ");Serial.println(partialResult);//debug
          return partialResult; //sortir de la fonction
        }
      }
      //Serial.println(millis());
    }while ((millis() - a) < milliseconds);
    //Serial.println("K,fin _delai");//debug
    return 0;
  }
  void testFreq(){
    while (modeTestFreq){
      tone(sortie, freq, 4000); // 4 secondes
      delai(2000); // 4 secondes, et gères les événements de changements de frequences (et de msures d'amplitudes supplémentaires).
      mesure_ampl(sortie); // avec mesure d'amplitude au milieu.
      delai(2000);
    }
  }

  void setup() {
    pinMode(sortie, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
    Serial.print(DEBUT);Serial.print(",");  // commencer (texte = "D,%seuil,%seuil2,\n")
    Serial.print(seuil);Serial.print(",");
    Serial.print(seuil2);Serial.println(",");
  }

  void loop(){
    phase1();
    phase2();
  }
        void phase1() {
          Serial.print(PHASE);Serial.println(",1,"); //Signaler phase 1 (texte = "P,1,\n")
          freq+=1;
          do {
            freq -=1;
            tone(sortie, freq, temps);
            Serial.print(VAL);Serial.print(",");
            Serial.print(ampl);Serial.print(","); //envoi informations (texte = "V,%ampl,%freq,\n")
            Serial.print(freq);Serial.println(",");//car variation de FREQUENCE

            //Serial.println("K,Avant delai 1");//debug
            delai(temps/2);
            //Serial.println("K,Apres delai 1 -> mesurer amplitude");//debug
            ampl = mesure_ampl(entree); // l'envoi des infos est fait automatiquement à la fin de la mesure donc pas besoin de le faire ici
        //    Serial.print(VAL);Serial.print(",");
        //    Serial.print(ampl);Serial.print(","); //envoi informations (texte = "V,%ampl,%freq,\n")
        //    Serial.print(freq);Serial.println(",");
            //Serial.println("K,fin mesurer amplitude -> Avant delai 2");//debug
            delai(temps/2);
            //Serial.println("K,Apres delai 2");//debug

            }while (ampl < seuil);
          }

        void phase2() {
          Serial.print(PHASE);Serial.println(",2,"); //Signaler phase 2 (texte = "P,2,\n")
          while (1) {
            tone(sortie, freq, temps);
```

```
    delai(temps/2);

    amplprev=ampl;
    ampl = mesure_ampl(entree); // mesurer amplitude et envoyer les informations

    delai(temps/2);

    if (ampl < amplprev) {
      sens_aug = -sens_aug;
      Serial.print(CH_SENS);Serial.print(",");  //envoi sens (texte = "C,%sens,\n")
      Serial.print(sens_aug);Serial.println(",");
    }else if (ampl == amplprev) {
      sens_aug = -1;
      Serial.print(CH_SENS);Serial.print(",");  //envoi sens (texte = "C,%sens,\n")
      Serial.print(sens_aug);Serial.println(",");
    }

    freq+=sens_aug;
    Serial.print(VAL);Serial.print(",");
    Serial.print(ampl);Serial.print(","); //envoi informations (texte = "V,%ampl,%freq,\n")
    Serial.print(freq);Serial.println(",");

    if ((ampl<seuil2)&&(amplprev<seuil2)){
      break;
    }
  }
}

int mesure_ampl(int broche) { // mesurer l'amplitude signal sinusoïdal
  int ampl=analogRead(broche);
int mesure_ampl(int broche) { // mesurer l'amplitude signal sinusoïdal
  int ampl=analogRead(broche);
  delay(DELAI);
  int ampl_prev=ampl;
  do { //aller jusqu'à la fin de la descente - au moins une mesure
    ampl_prev=ampl;
    ampl=analogRead(broche);
    delay(DELAI);
  }while(ampl_prev > ampl);

  while(ampl_prev < ampl) { //puis jusqu'à la fin de la montée
    ampl_prev=ampl;
    ampl=analogRead(broche);
    delay(DELAI);
  }
  ampl=ampl_prev;

  Serial.print(VAL);Serial.print(",");
  Serial.print(ampl);Serial.print(","); //envoi informations (texte = "V,%ampl,%freq,\n")
  Serial.print(freq);Serial.println(",");// car changment d'AMPLITUDE

  return ampl;
}
```

Le programme ci-dessus est la dernière version que nous avons écrite du programme ARDUINO qui permet de faire vibrer la corde en recherchant les fréquences de résonance de celle-ci. Ce n'est donc pas la version qui est utilisée dans la vidéo de 5 minutes déposée pour le concours CGénial.

Dans cette dernière version du programme, nous avons fait en sorte qu'il soit possible de modifier la fréquence d'excitation de façon ponctuelle, sans interrompre l'exécution du programme (c'est à dire que l'exécution du programme se poursuit en tenant compte de la modification de la fréquence, sans qu'on ait besoin de le téléverser à nouveau dans la carte après avoir modifié ce paramètre). De la même manière il est désormais possible de modifier les seuils d'entrée et de sortie des phases 1 et 2 du programme, même si là encore, il est en cours d'exécution. Ces paramètres sont alors ajustables via une interface que nous avons entièrement paramétrée. Il a fallu pour cela que nous écrivions un autre programme, en JAVA, capable de communiquer avec le programme Arduino que nous avons modifié pour cela.

Par ailleurs, dans un souci de clarté, nous avons aussi amélioré l'affichage des résultats de l'exécution du programme ARDUINO sous forme graphique. Cela est passé par l'écriture d'un troisième programme (programme PROCESSING) qui s'exécute en même temps que le programme Arduino, et qui communique avec lui, ainsi qu'avec le deuxième programme évoqué. Ces deux programmes faisant environ 800 lignes de code en JAVA, et étant arrivés au bout des 25 pages de ce mémoire, nous ne les avons pas intégrés ici, mais nous avons déposé une vidéo dans laquelle on peut voir ces lignes de codes, l'interface de contrôle mentionnée, la fenêtre graphique des résultats, et les trois programmes en cours d'exécution pour faire vibrer la corde. La vidéo en question fait 10 minutes, car nous avons choisi en particulier de laisser les scènes lorsque le programme recherche la fréquence de vibration de la corde sans Patafix et avec Patafix. N'hésitez pas alors à accélérer ou à stopper la vidéo aux moments où vous le souhaitez. La vidéo en question est disponible en suivant le lien suivant :

http://dai.ly/k7ItfstMrlNFA7qp5MH

Mais malgré tous nos efforts, les codes ne sont pas très lisibles dans la vidéo. Aussi, nous avons décidé de déposer le fichier dans lequel vous pourrez lire les 2 programmes en suivant ce lien :

https://drive.google.com/open?id=1Y8KgtvILwpbsbkZnS-RPf-PfJG6OXI7U

Et vous pourrez aussi télécharger les programmes que nous mettons à votre libre disposition en suivant ce lien :

https://drive.google.com/open?id=1iqjHSO3y4rtXnR1Zkk_FHorqpYZ0Hib2