

**LP21**

Lycée Pilote  
Innovant International



OLYMPIADES  
DE PHYSIQUE  
FRANCE

# Jouer sans trembler !



**Présenté par :**

Archibald FRIOT  
Ylan SIGRIST  
Emma CARLIN  
Zion DIALLO  
Antoine MARLEIX

**Encadré par :**

Jean-Brice MEYER  
Tristan CLÉMENT  
Max JODEAU

## RESUME :

C'est l'année des JO de Paris. Les joueurs de tennis vont taper dans la balle, encore et encore. Mais qu'ils soient professionnels ou amateurs, les vibrations communiquées par la raquette au bras du joueur sont source de potentiels problèmes et nuisent au confort de jeu. Placer un anti vibrateur sur le cordage s'avère alors être une très bonne solution. Mais comment fonctionne cet anti vibrateur ?

Durant ce projet, il s'agira de parvenir à identifier les vibrations causées par l'impact de la balle sur la raquette, de les quantifier, et nous tenterons de comprendre comment un simple morceau de caoutchouc est capable de réduire cette vibration.

Mais pour cela, il fallait un dispositif capable de lancer la balle de façon contrôlée, et c'est alors ce à quoi nous nous sommes attelés dans un premier temps.

## Sommaire :

Introduction

I – Comment lancer la balle de la même manière sur la raquette ?

II – A quelle fréquence la raquette vibre-t-elle suite à l'impact et comment agit l'anti vibrateur ?

III - Le cordage de la raquette vibre-t-il et si oui, à quelle fréquence ?

IV – Comparaison de différents anti vibrateurs.

Conclusion

## INTRODUCTION :

À la fois passionnés par la physique, et par le tennis, nous avons voulu travailler sur un sujet en rapport avec ces deux domaines. Plusieurs questions pouvaient être abordées, mais l'une d'entre elles nous a fortement interpellée. En effet, lorsqu'on tape dans une balle avec la raquette, on ressent des vibrations dans la main, qui remontent dans l'avant-bras. En plus d'être particulièrement désagréables, ces vibrations sont source de fatigue générale du bras jusqu'à l'épaule, pouvant engendrer à terme des maux tels que tennis Elbow.

Pour éviter cela, on place sur le cordage une petite pièce appelée « anti-vibrateur » (figure 1) .

Comme son nom l'indique, cet élément permet de réduire de façon significative les vibrations, ainsi le confort de jeu est immédiat.

Nous avons alors voulu mesurer ce bénéfice d'un point de vue scientifique, comprendre le mode d'action de l'anti vibrateur et, pourquoi pas, imaginer des formes ou des matériaux, voire d'autres méthodes pour arriver à des résultats similaires.



Figure 1 : anti vibrateur disposé sur le cordage

## I – Comment lancer la balle de la même manière sur la raquette ?

Nous avons cherché un dispositif permettant de lancer les balles dans une direction et avec une vitesse contrôlée. Les dispositifs existants coûtant plusieurs centaines d'euros, nous avons rassemblé nos neurones pour en concevoir un capable de répondre à nos attentes.

Voici alors ce que nous avons imaginé :

Avec quelques ingrédients tels que ceux-ci : figure 2



Nous avons confectionné cela : figure 3

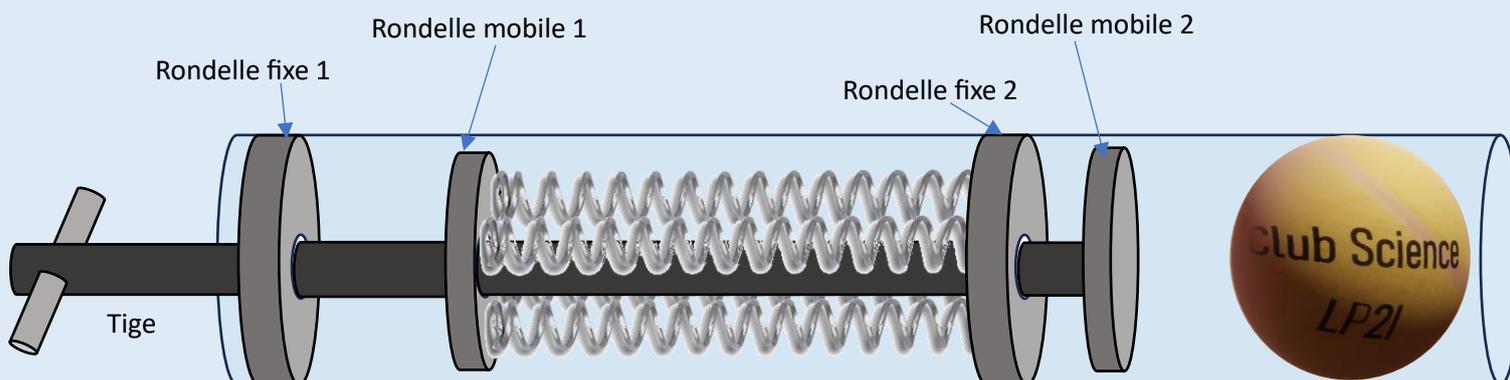


Figure 3 : lance balle confectionné au lycée

En tirant la tige, on déplace la rondelle mobile N°1 vers la gauche, sur laquelle sont fixées les extrémités gauches des 4 ressorts. Les extrémités droites des ressorts étant fixées sur la rondelle fixe N°2, on allonge ainsi les ressorts, qui sont des ressorts à spires jointives. Lorsqu'on relâche alors la tige, la force de rappel des ressorts déplace la tige, et donc la rondelle mobile N°2 vers la droite. La rondelle mobile N°2 percute alors la balle qui est ainsi éjectée dans la direction de l'axe du tube, avec une vitesse qui dépend de l'élongation initiale des ressorts.

Quels ressorts choisir ?

Nous n'avons pas la prétention de lancer la balle à des vitesses que l'on peut observer chez les joueurs de tennis professionnels, qui peuvent aller jusqu'à 200 km/h, mais nous avons l'intention de lancer la balle à 100 km/h, soit environ 28 m/s.

Comme nous mettons 4 ressorts qui auront la même constante de raideur  $k$ , tout se passe comme si on disposait d'un ressort unique de constante de raideur  $K = 4k$ .

Ainsi, en étirant le dispositif de telle sorte que l'élongation des 4 ressorts est  $\Delta\ell$ , il stocke une énergie :

$$E = \frac{1}{2}K\Delta\ell^2$$

En relâchant le ressort de sorte qu'il percute la balle de tennis initialement immobile en bout de course, c'est-à-dire lorsque le ressort revient quasiment à sa taille au repos, cette énergie est alors communiquée à la balle de tennis, principalement sous forme d'énergie cinétique.

On a alors l'égalité :

$$\frac{1}{2}K\Delta\ell^2 = \frac{1}{2}mv^2$$

Où  $m$  est la masse de la balle de tennis et  $v$  sa vitesse immédiatement après l'impact.

Ainsi, pour disposer d'une vitesse  $v$ , il faut que chacun des 4 ressorts ait une constante de raideur

$$k = \frac{mv^2}{4\Delta\ell^2} = \frac{58,5 \cdot 10^{-3} \times 28^2}{4 \times 0,3^2} = 127 \text{ N/m}$$

Dans ce calcul, nous avons pris une élongation de 30 cm pour chaque ressort car nous avons remarqué que c'est l'élongation que l'on pouvait obtenir avec des ressorts que nous possédions au lycée.

Nous n'avons pas trouvé de ressorts avec cette constante de raideur, mais nous avons trouvé des ressorts de constante de raideur  $k = 100 \text{ N/m}$ . Nous les avons achetés. Avec de tels ressorts, on peut ainsi espérer obtenir des vitesses de l'ordre de 25 m/s, soit 89 km/h.

Une fois que nous avons réalisé le dispositif, nous avons voulu vérifier expérimentalement nos prévisions en termes de vitesse d'éjection de la balle !

Pour mesurer la vitesse de la balle, nous avons réalisé 2 expériences différentes :

Nous avons positionné 2 lasers en sortie du tube (figure 4), espacés d'une distance  $d$  de 11 cm. Ces 2 lasers éclairent 2 photorésistances qui font chacune partie d'un circuit série comprenant une résistance et un générateur. On relève alors l'évolution de la tension aux bornes de la résistance. Lorsque la photorésistance est éclairée par le laser, la valeur de la résistance de la photorésistance est faible, donc l'intensité qui circule dans le circuit est élevée, et grâce à la loi d'Ohm, on peut dire que la tension aux bornes de la résistance est élevée. Mais lorsque le faisceau laser est obturé par le passage de la balle, la valeur de la résistance de la photorésistance augmente, ce qui fait chuter l'intensité, et par suite la tension aux bornes de la résistance. On obtient alors 2 chutes de tension correspondant aux obturations successives des deux faisceaux laser, avec un intervalle de temps  $\Delta t$ . En considérant que la vitesse de la balle entre les 2 lasers soit restée identique, on peut en déduire la vitesse en faisant simplement le rapport de la distance  $d$  sur la durée  $\Delta t$ .

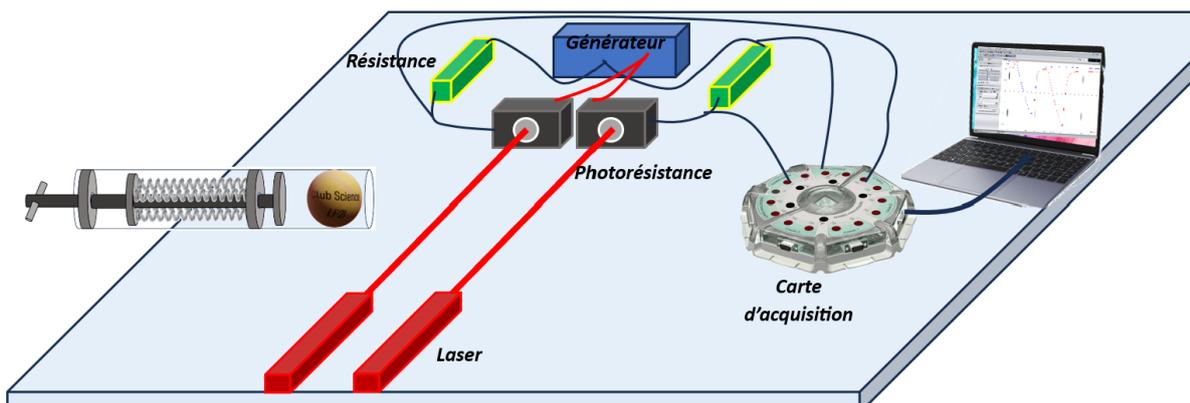


Figure 4 : mesure de la vitesse de la balle à la sortie du lance balle à l'aide de 2 lasers et 2 photorésistances

Et voici alors le type de résultat obtenu avec le logiciel Latis pro : Figure 5

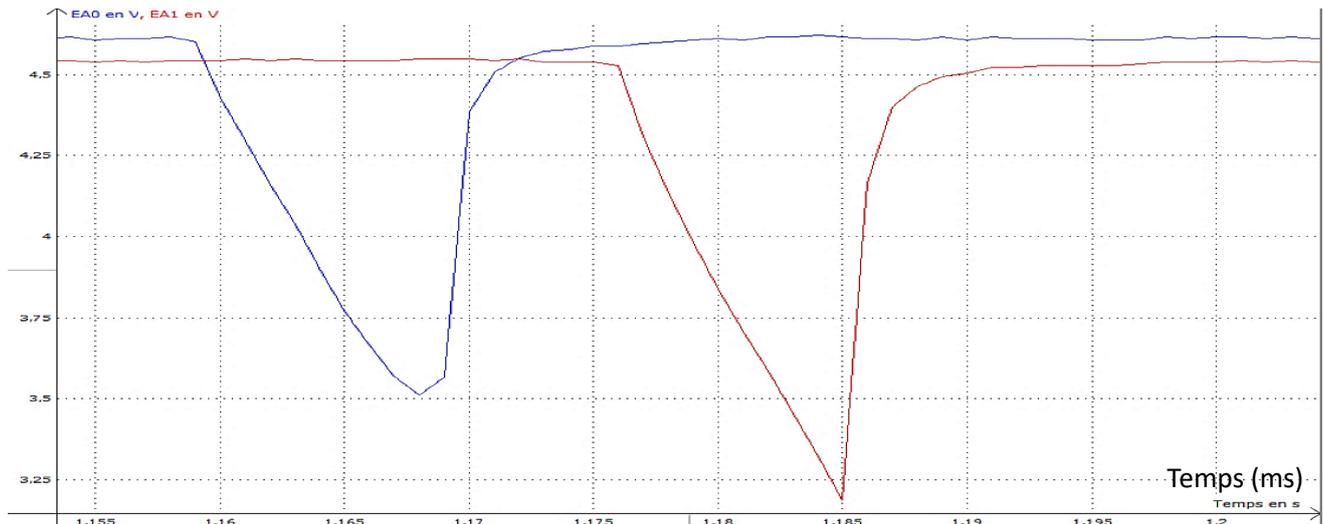


Figure 5 : intervalle de temps entre l'obturation des 2 faisceaux laser par la balle

Pour examiner le comportement de notre dispositif, nous avons réalisé un grand nombre de lancers avec 4 élongations différentes et 10 lancers par élongation de sorte à évaluer une incertitude sur la mesure. Voici ce que nous avons trouvé en allongeant les ressorts de 15, 20, 25 et 30 cm : Figure 6

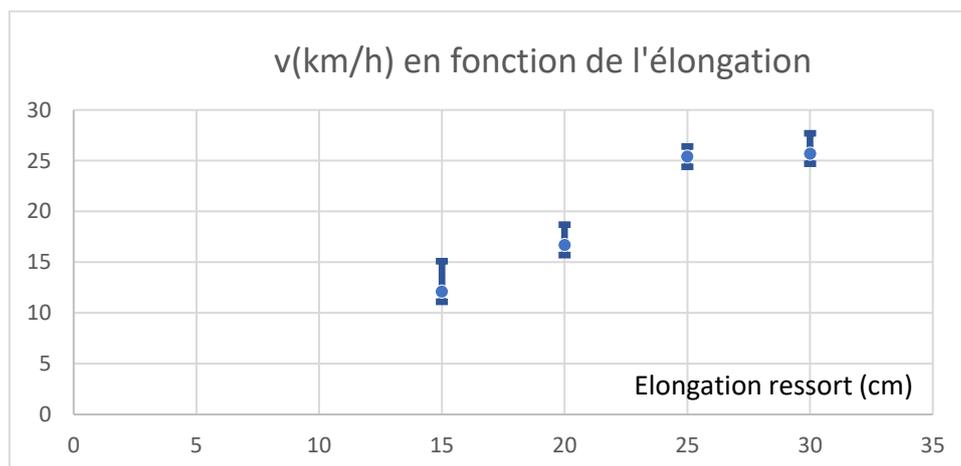


Figure 6 : vitesse de la balle en sortie du lance balle en fonction de l'élongation des ressorts

Cela dit. Comme nous le voyons, nos premiers lancers ont permis d'obtenir une vitesse bien moins grande, de l'ordre de 27 km/h au maximum. Il y a eu un gros oubli de notre part : lorsque les ressorts sont relâchés depuis leur forme allongée, ils se rétractent en emmenant avec eux la tige métallique constituant l'axe du dispositif, ainsi que les 2 rondelles mobiles. Or, cet ensemble a une masse d'environ 1kg. Si on ajoute cette masse à celle de la balle dans le calcul précédent, on obtient alors une vitesse théoriquement égale à 7,1 m/s, soit 27km/h. On aurait alors pu modifier le dispositif en remplaçant la tige en métal par une tige réalisée dans un matériau de masse volumique moins importante, mais en lançant la balle sur la raquette avec ce dispositif, nous avons tout de même pu obtenir des vibrations de la raquette exploitables. Nous nous contenterons alors dans un premier temps de notre lance balle avec sa tige en métal.

Maintenant que nous avons confectionné et étudié notre lance balle, étudions la vibration de la raquette en projetant les balles dessus, et profitons-en pour voir les différences observables lorsque le cordage possède ou pas l'anti vibrateur.

## II – A quelle fréquence la raquette vibre-t-elle suite à l'impact et comment agit l'anti vibrateur ?

### 1 ) Mesures de la vibration de la raquette au niveau du cadre

#### A – Dispositif expérimental

Pour mesurer les vibrations de la raquette, nous avons accroché un aimant sur le cadre, et nous avons disposé une bobine dans le voisinage immédiat de l'aimant. La raquette est quant à elle fixée par le manche au moyen d'un étau fixé à la table. (figure 7)

En effet, un mouvement de l'aimant par rapport à la bobine modifiera le flux du champ magnétique à travers celle-ci, ce qui créera un courant induit dans la bobine à l'image de la variation du flux du champ magnétique, donc de la vibration de la raquette.

Après différents essais, nous avons pu constater qu'en disposant un aimant néodyme de dimensions 2 cm de diamètre et 3 mm d'épaisseur, l'amplitude de vibration de la raquette était suffisamment importante pour engendrer un courant induit dans la bobine mesurable. On le voit notamment dans le résultat suivant : figure 8.



Figure 7 : dispositif expérimental avec bobine et aimant permettant de mesurer la vibration du cadre de la raquette

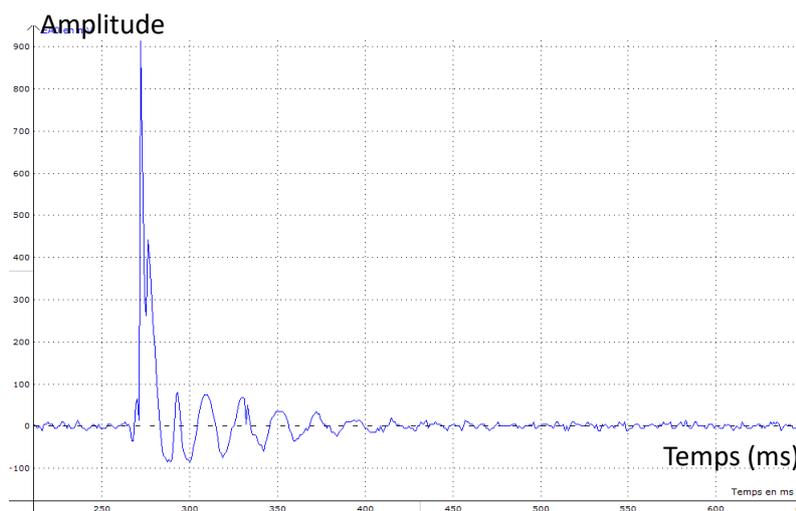


Figure 8 : vibration détectée par une bobine du fait de la vibration de l'aimant accroché au haut du cadre de la raquette

Mais en réalité, ces premiers résultats montrent une vibration de la raquette, mais pas seulement... malheureusement. En effet, après plusieurs expériences du même type, nous nous sommes rendus compte que la table sur laquelle était disposé l'ensemble du dispositif expérimental vibrait très légèrement suite à l'impact, mais cette légère vibration faisait vibrer le pied qui tient la bobine électrique.

Pour éviter cela, la solution est simple, mais contraignante : nous devons utiliser 2 tables séparées l'une de l'autre : la raquette est fixée à une table, et le pied tenant la bobine est posé sur une deuxième table, comme on peut le voir sur la figure 7. Nous avons pu nous assurer, en secouant la table sur laquelle est disposée la raquette, que la très légère vibration de cette table ne donne aucun signal dans la bobine.

Par la suite, nous avons décidé de mesurer la vibration du cadre de la raquette en 3 endroits, en disposant alors 3 aimants et 3 bobines reliées à la carte d'acquisition (figure 9)

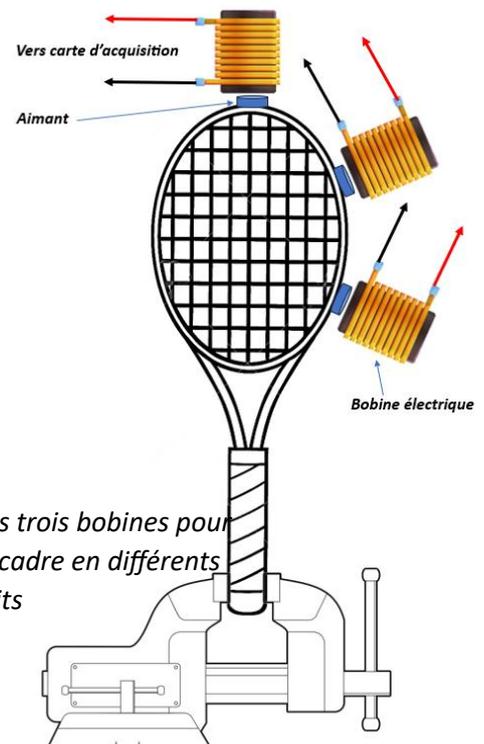


Figure 9 : disposition des trois bobines pour étudier la vibration du cadre en différents endroits

## B – Les mesures

Nous avons lancé la balle de différentes manières :

- Lancers rapides – raquette tenue par le manche
- Lancers lents – raquette tenue par le manche
- Lancers rapides centrés – raquette tenue par le manche
- Lancers rapides sur le côté – raquette tenue par le manche
- Lancers rapides en haut du cordage – raquette tenue par le manche
- Lancers rapides en bas du cordage – raquette tenue par le manche
- Lancers raquette à l'envers - tenue par le cadre
- Lancers raquette à l'envers – tenue par le cadre et tenue à la main par le manche

Nous allons essayer de nous focaliser sur les observations particulières que nous avons pu faire :

Avant cela nous précisons que chaque lancer a été réalisé 10 fois afin de s'assurer du caractère reproductible des résultats obtenus.

**Commençons par voir les lancers rapides dirigés au milieu du cordage (figure 10)**



Figure 10 : lancer rapide au centre de la raquette

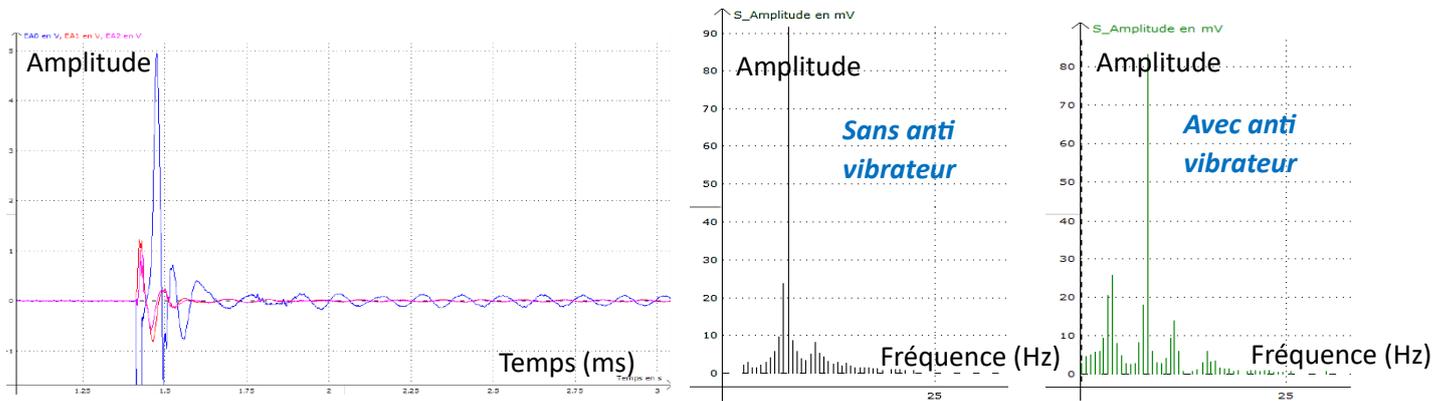


Figure 11 : à gauche : signaux issus des trois bobines avec une raquette sans anti vibreur - Au milieu : analyse spectrale du signal de gauche – A droite : analyse spectrale avec un cordage avec anti vibreur

Nous voyons sur la figure 11 , sur le schéma de gauche les trois signaux issus des trois bobines. Lors de ces mesures, nous avons finalement remarqué que les 2 aimants disposés sur le côté de la raquette n’apportent pas d’informations supplémentaires par rapport à l’aimant situé sur le dessus de la raquette.

Nous avons finalement uniquement étudié la courbe EA0 issue de la bobine située sur le dessus de la raquette. Nous avons en particulier fait une analyse de Fourier de ce signal, que nous avons enregistré avec anti vibreur, et sans anti vibreur.

On constate alors à première vue, que la raquette vibre selon la même fréquence, d’environ 8 Hz, avec une amplitude similaire, qu’il y ait ou pas un anti vibreur sur la raquette. Il est même surprenant de voir qu’avec l’anti vibreur, la raquette semble vouloir vibrer à 2 autres fréquences supplémentaires. Nous insistons ici sur le fait que toutes les mesures sont réalisées dans les mêmes conditions et donnent des résultats identiques.

Le fait de lancer la balle sur le côté de la raquette n’apportait pas de grosses différences avec et sans anti vibreur. La raquette vibrait à une fréquence d’environ 8 Hz.

Nous pouvons alors à ce stade du projet nous demander si la vibration désagréable que le joueur ressent correspond bien à la fréquence de 8 Hz. Et si c’est bien celle-là, est-ce que notre protocole expérimental est bon ?

Alors nous avons tenté une autre disposition : nous avons tenu la raquette par le cadre, pour laisser le manche libre, et nous avons essayé de mesurer la vibration du manche de la raquette.

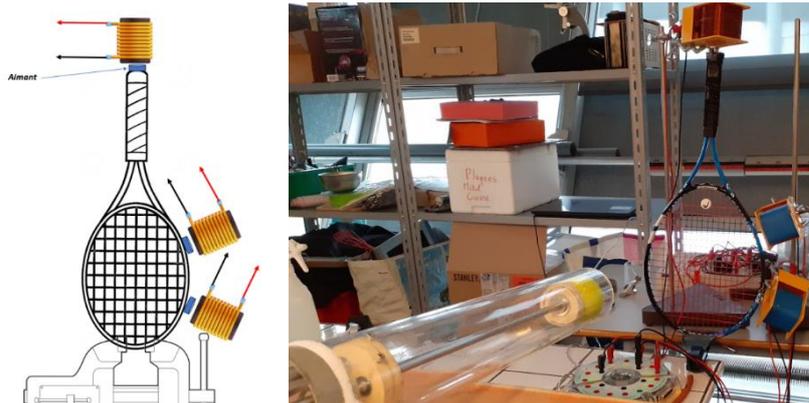
## 2 ) Mesures de la vibration de la raquette au niveau du manche

### A – Avec le même dispositif pour capter la vibration au niveau du manche

Raquette à l’envers, tenue par le cadre, balle tirée au centre avec une vitesse rapide.

Nous avons à nouveau utilisé les bobines et les aimants pour détecter la vibration de la raquette.

Figure 12 : raquette à l’envers, tenue par le cadre



Voici les résultats obtenus :

Raquette sans anti vibrateur : figure 13

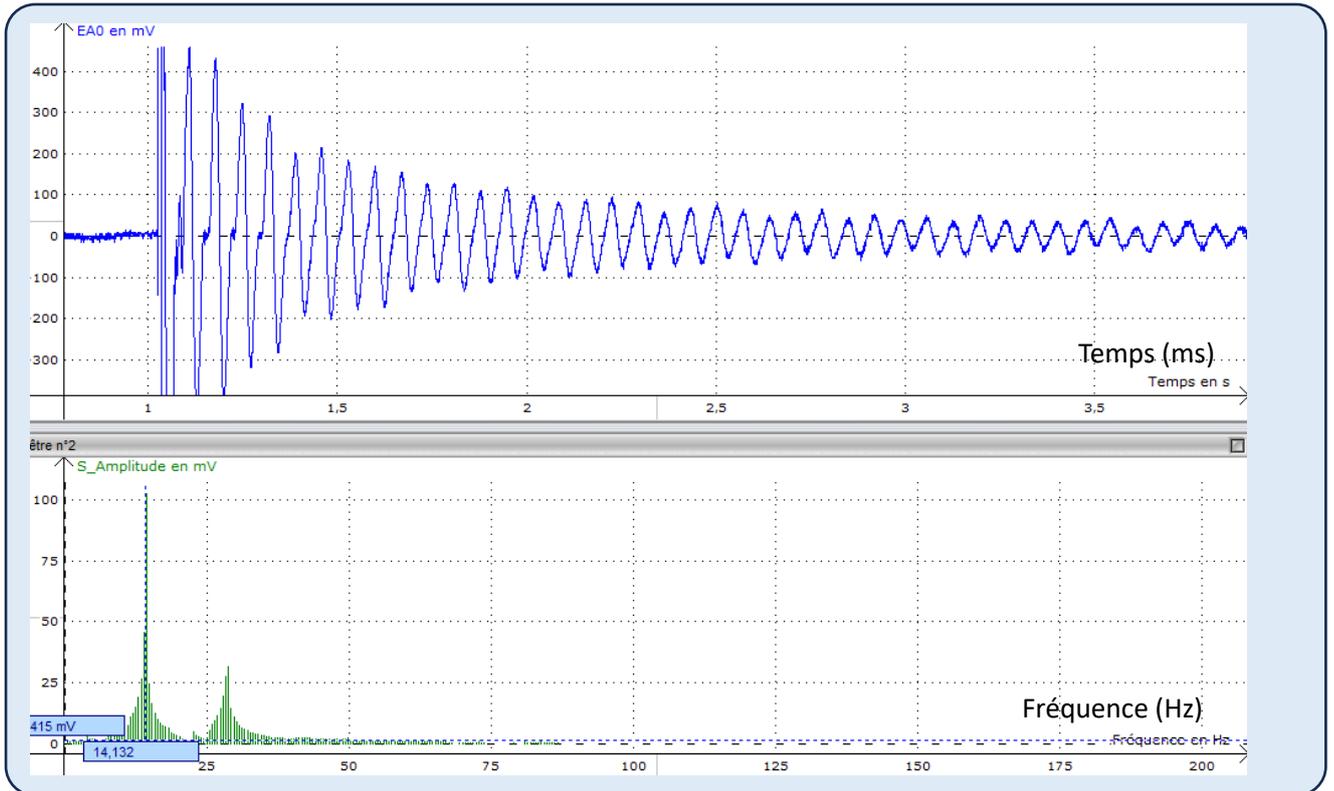


Figure 13 : sans anti vibrateur : en haut : signal après l'impact – En bas : Analyse spectrale

Raquette avec anti vibrateur : Figure 14

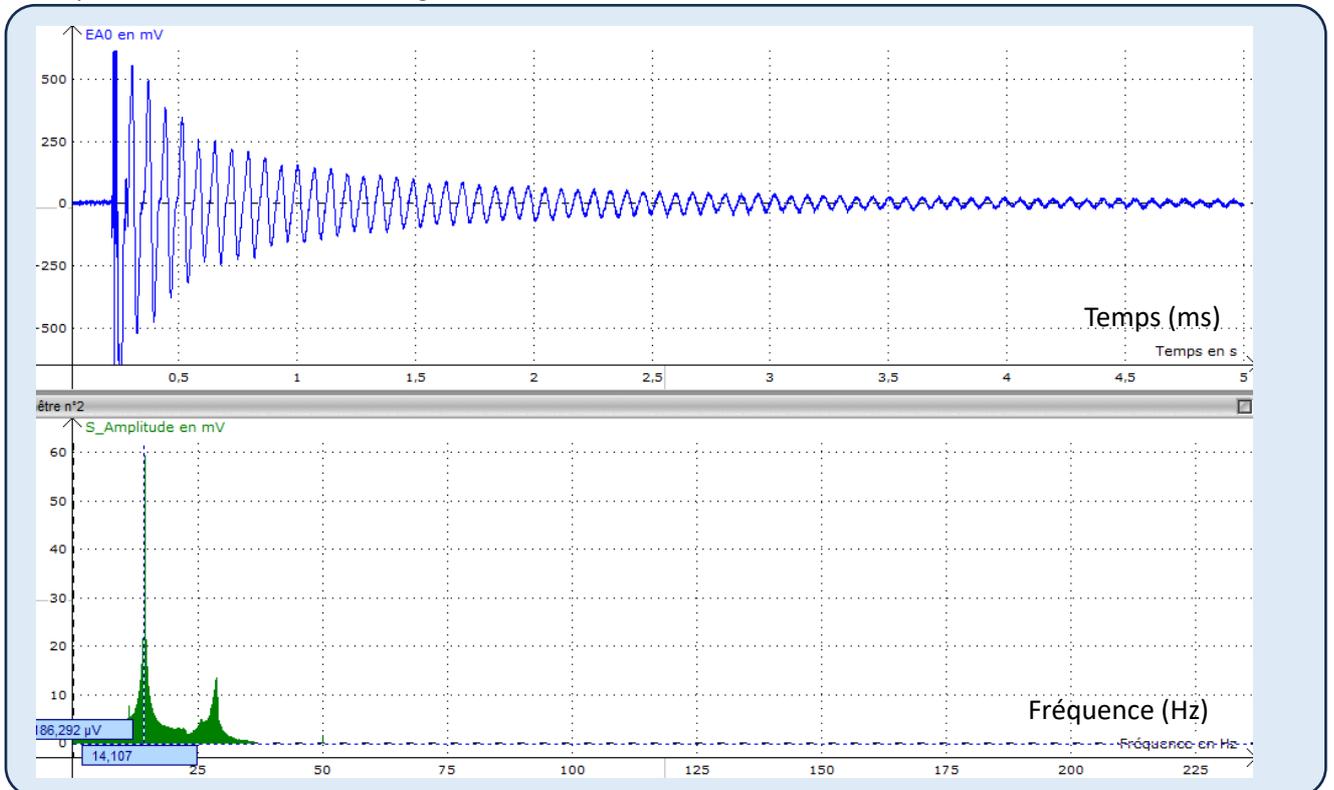


Figure 14 : sans anti vibrateur : en haut : signal après l'impact – En bas : Analyse spectrale

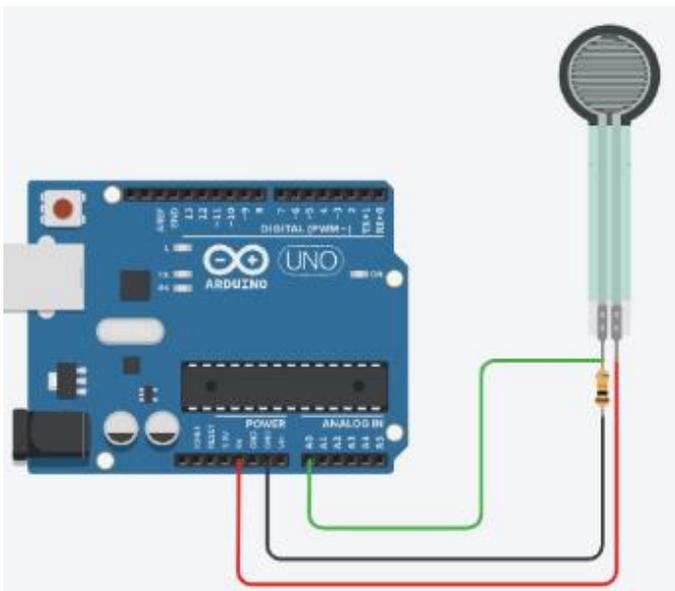
Comme vous pouvez le voir, les différences entre les deux signaux sont anecdotiques : dans les deux cas, non seulement la raquette vibre aux mêmes fréquences (14 Hz et 28 Hz), mais en plus, la décroissance de l'amplitude du signal au cours du temps est également similaire dans les deux cas.

Nous n'allons pas montrer l'ensemble des mesures réalisées en lançant la balle avec des vitesses différentes, ou aux différents endroits de la raquette. Nous y avons cela dit passé beaucoup de temps, sans vraiment être en mesure de voir une différence apportée par l'anti vibreur.

## B - Mesures de la vibration du manche fixé par le biais d'un capteur de force

Nous avons alors essayé de mesurer les vibrations au niveau du manche d'une autre manière : Nous voulions mesurer une vibration au niveau du manche, tout en fixant la raquette au niveau du manche, car finalement, c'est bien comme cela que le joueur tient la raquette. Le problème est alors le suivant : comme le manche de la raquette est fixé et que la vibration a forcément une amplitude très faible, l'utilisation des aimants et des bobines n'était pas possible. Alors nous avons imaginé une autre expérience pour y parvenir :

Nous avons fixé une lamelle en métal contre le manche de la raquette en la plaçant, elle aussi, dans la mâchoire de l'étau, et nous avons intercalé un capteur de pression entre le manche et la lamelle métallique. L'idée est la suivante : lorsque le manche vibre, cela devrait comprimer le capteur de force relié à la carte Arduino. Le circuit électrique comprenant le capteur de force FSR est un diviseur de tension, qui permet d'obtenir une tension proportionnelle à la force appliquée : figure 15 a. Nous avons alors écrit un programme pour réaliser des mesures à une fréquence de 100 Hz : figure 15 b



```
#define capteur force A0

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("CLEARDATA"));
  Serial.println(F("LABEL, Temps, Capteur"));
}

void loop() {

  int lecture valeur = analogRead(capteur force);

  Serial.print(("DATA, TIME, "));
  Serial.print(lecture valeur);
  Serial.println(F(", "));
  delay(10);
}
```

Figure 15 a et b : circuit électrique avec le capteur de force FSR : diviseur de tension – Figure 16 b : code permettant à la carte Arduino de faire des mesures en communiquant avec le capteur de force

En réalité, lors des acquisitions, nous étions limités par les performances du matériel, ce qui fait que nous pouvions seulement prendre 63 mesures par seconde.

Voici les résultats obtenus par capteur de force lorsque la raquette n'est pas munie de l'anti vibreur (nous n'avons pas étalonné le capteur de force, donc l'axe des abscisses n'est pas en Newton, mais ce n'est pas grave car nous cherchons avant tout une fréquence) : Figure 16

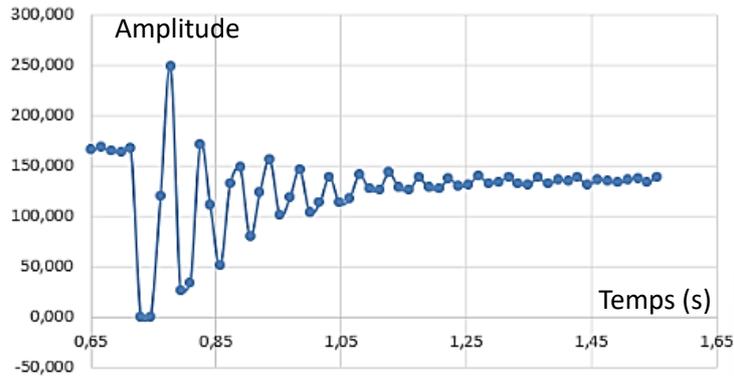


Figure 16 : signal au niveau du manche, mesuré par un capteur de force – raquette sans anti vibrateur

L'expérience montre ainsi une très belle vibration de l'ordre de 20 Hz.

Nous pensons alors toucher au but ! Il nous reste à voir l'action de l'anti vibrateur. Nous l'avons donc placé sur le cordage et avons refait une mesure. Voilà ce que nous obtenons en disposant l'anti vibrateur sur le cordage (figure 17)

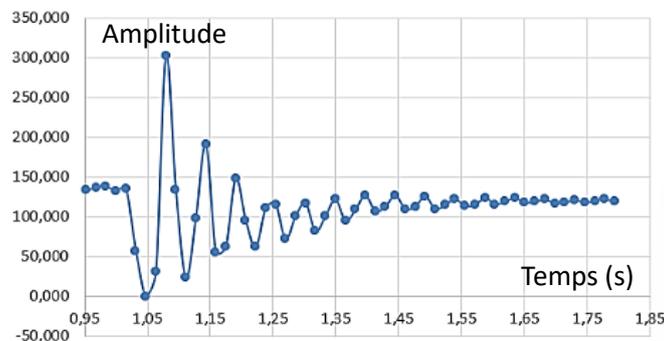


Figure 17 : signal au niveau du manche, mesuré par un capteur de force – raquette avec anti vibrateur

Quelle déception ! Cela ne change rien. Il faut se rendre à l'évidence : nos mesures ne permettent pas de capter la vibration à éliminer.

Nous avons tenté d'autres dispositions, en tenant la raquette autrement, avec une pince et en intercalant le capteur de force entre la pince et le manche, comme on peut le voir sur la figure 18, mais rien n'y fait, on ne voit pas de différence flagrante de vibration avec et sans anti vibrateur.



Figure 18 : capteur de force intercalé entre le manche et la pince

Car il y a bien une vibration. Chacun d'entre nous peut la ressentir en tapant un objet avec le cordage de la raquette. Une vibration bien distincte se ressent dans la main. Et lorsqu'on place l'anti vibrateur sur le cordage, on ne ressent plus du tout cette vibration.

Alors nous devons poursuivre nos investigations.

Pour le moment, nous nous sommes intéressés à la vibration du cadre. Mais qu'en est-il du cordage ? Vibre-t-il suite à l'impact avec la balle ? C'est sûrement le cas. Mais pour le voir vibrer, cela devient compliqué. Il faut en effet immobiliser toute la raquette car si toute la raquette bouge pendant que l'on souhaite voir la vibration du cordage, il est peu probable d'y parvenir.

Cela dit, finalement, la vibration du cordage ne nous est pas si inaccessible que ça !

### III – Le cordage de la raquette vibre-t-il et si oui, à quelle fréquence ?

#### 1 ) Le cordage vibre-t-il ?

En effet, lorsqu'on tape le cordage avec la main, ou avec un objet rigide, on entend un son suffisamment périodique pour pouvoir lui associer une note, donc une fréquence. Donc la réponse à la question semble être que oui, le cordage doit vibrer à une certaine fréquence que nous allons chercher à mesurer.

Nous avons alors enregistré le son produit par l'impact d'un morceau de bois sur le cordage, et voici le résultat obtenu : Dans un premier temps, nous observons bien le caractère périodique du signal sonore suite à l'impact : figure 19.

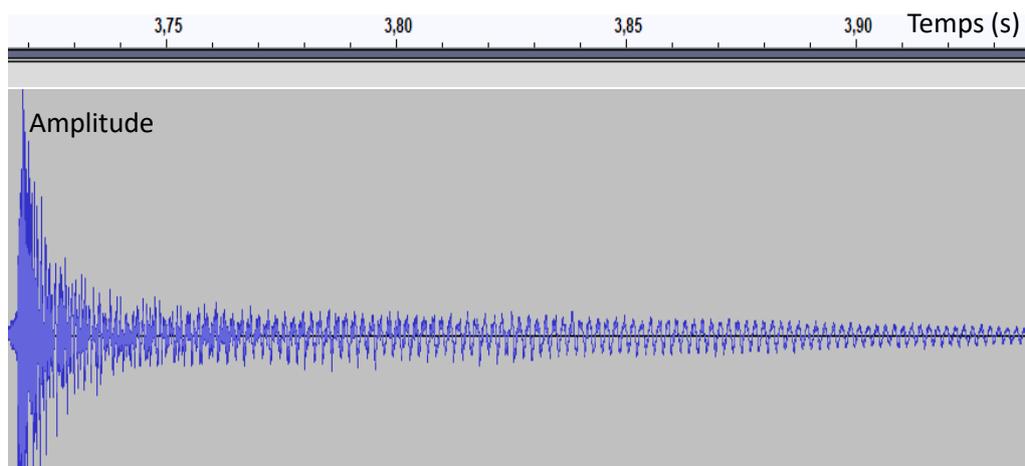


Figure 19 : signal sonore après un impact sur le cordage sans anti vibrateur

Et voici (figure 20- a ) ce que donne une analyse spectrale du signal sonore entre l'instant 3,75 s et 3,90 s du signal ci-dessus :

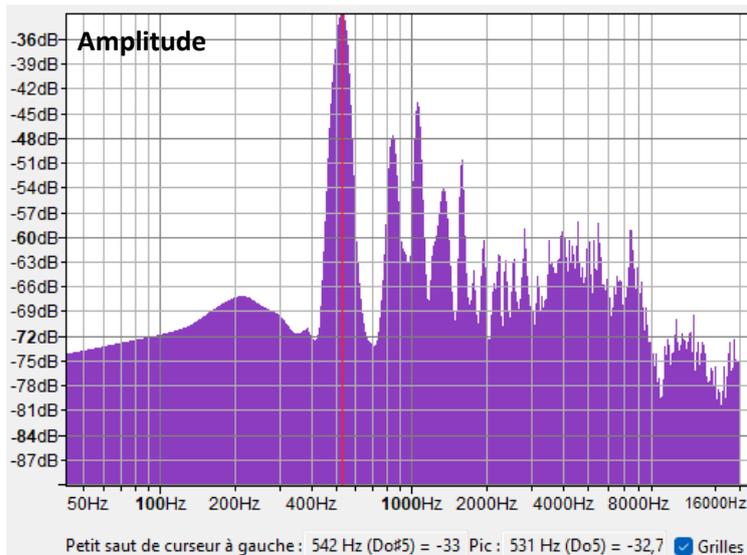


Figure 20 – a

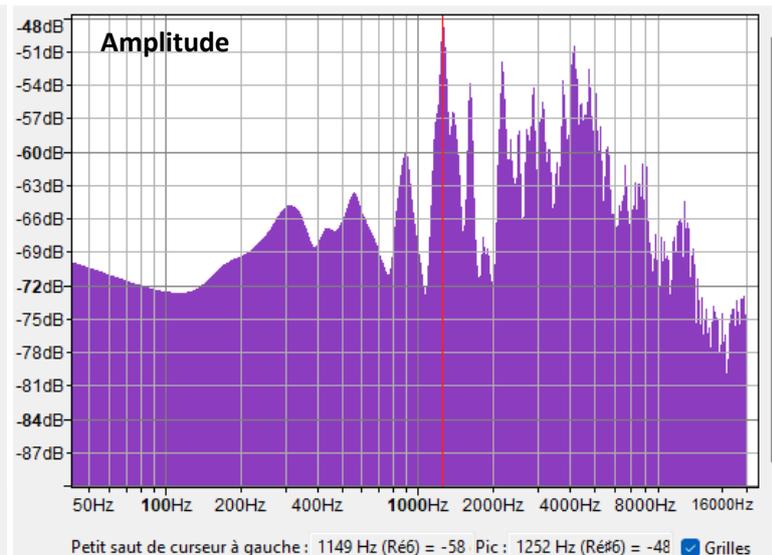


Figure 20 – b

Figure 20- a - : Analyse spectrale du signal sonore après un impact sur le cordage sans anti vibrateur  
Figure 20- b - Analyse spectrale du signal sonore après un impact sur le cordage avec anti vibrateur

On voit alors clairement un pic à 531 Hz. Pour être certain que ce pic corresponde à la fréquence que nous entendons en tapant le cordage, nous avons généré un son à 531 Hz, et nous entendons exactement la même note. On peut donc affirmer que le cordage vibre à une fréquence de 531 Hz.

Disposons maintenant l'anti vibrateur en espérant voir une différence ... Voici l'analyse spectrale que l'on obtient avec l'anti vibrateur sur le cordage : figure 20 – b.

La différence est flagrante. Nous avons fait 10 mesures avec anti vibrateur et 10 mesures sans anti vibrateur et nous obtenons toujours les résultats suivants : sans anti vibrateur le cordage vibre à une fréquence très voisine de 530 Hz, alors qu'avec l'anti vibrateur, cette fréquence est carrément absente de l'analyse spectrale.

Une autre comparaison avec et sans la présence de l'anti vibrateur est intéressante à souligner : il s'agit de la durée de la vibration. Ci-contre, on peut voir en haut la durée de la vibration avec la présence de l'anti vibrateur, et en bas, sans la présence de l'anti vibrateur. On peut donc dire que l'anti vibrateur empêche le manche de vibrer à 530 Hz, mais en plus il diminue la durée de la vibration du cordage (figure 21).

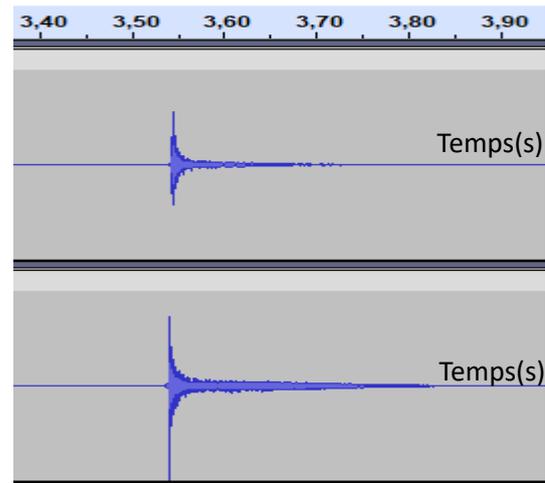


Figure 21 comparaison de la durée de vibration du cordage avec anti vibrateur (en haut) et sans (en bas)

Prouvons maintenant que c'est bien cette vibration qui parvient jusqu'au manche, que l'on cherche à enlever avec l'anti vibrateur. Car cela ne nous paraît pas si évident : nous sommes en train de faire l'hypothèse qu'une vibration de fréquence de 530 Hz gêne un joueur de tennis, alors qu'il s'agit d'une fréquence qui semble élevée pour la ressentir d'un point de vue physiologique.

## 2 ) La vibration du cordage se propage-t-elle dans le manche de la raquette ?

Pour être certain que cette fréquence se propage bien jusqu'au manche, nous avons maintenu la raquette horizontalement, de sorte que le manche soit libre de vibrer, et nous avons posé une membrane vibrante sur le cordage de la raquette (figure 22)

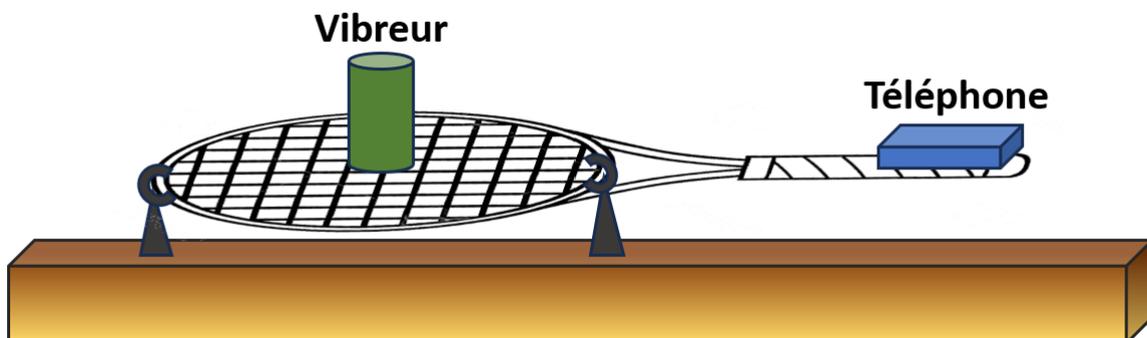


Figure 22 : vibration du manche au moyen d'une membrane vibrante disposée sur le cordage – Mesure de la vibration grâce à l'accéléromètre du téléphone piloté par l'application Phyphox

Nous avons alors fait vibrer la membrane vibrante à une fréquence que nous avons fait varier autour de 530 Hz. Nous avons pu alors constater que pour une fréquence d'environ 508 Hz, l'intensité sonore présentait un maximum d'amplitude : le son qui est issu de la membrane vibrante est amplifié par la vibration de la raquette. Il semble alors que pour cette fréquence, la vibration du cordage entre en résonance avec la vibration de la membrane vibrante. Mais pourquoi 508 Hz et non 530 Hz ? Cela est sans aucun doute dû à la masse de la membrane vibrante déposée sur le cordage. Lors de cette expérience, nous avons également posé, sur le manche de la raquette, un téléphone disposant de l'application Phyphox. Nous avons alors actionné la fonction « mesure de l'accélération ». En effet, si le manche vibre, l'accéléromètre du téléphone doit être capable de la détecter.

Voici alors le fichier Excel obtenu lors de la mesure, avec une fréquence d'excitation de la membrane vibrante égale à 508 Hz : figure 23.

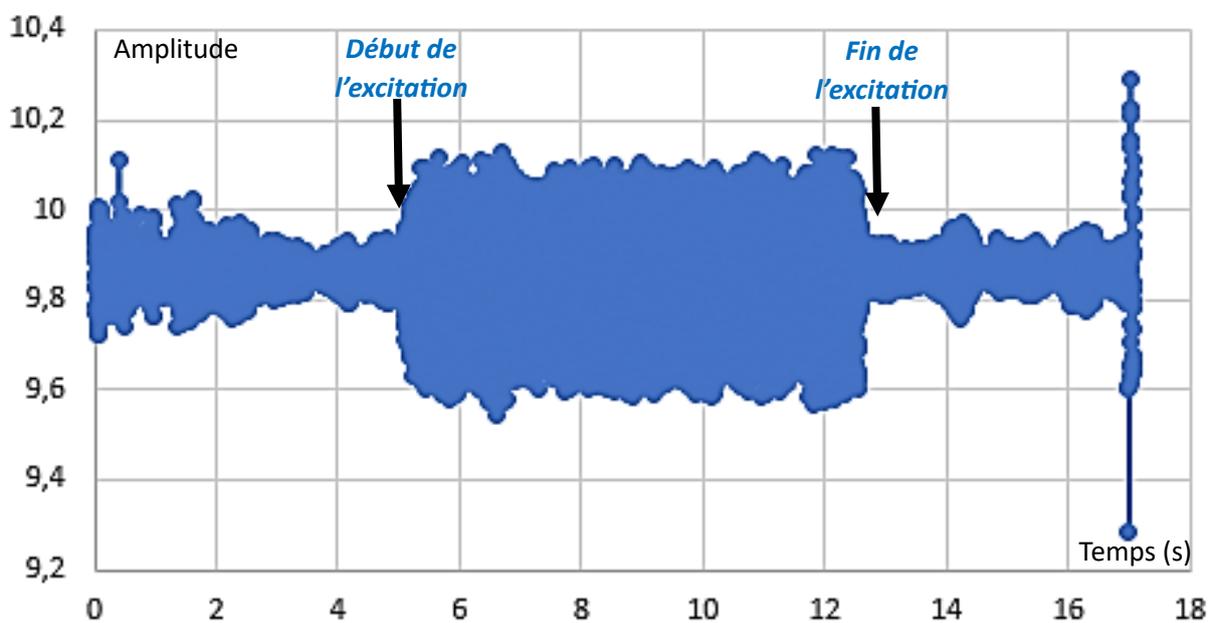


Figure 23 : mesure de la vibration au niveau du manche au moyen d'un accéléromètre posé sur le manche

On voit nettement le déplacement du manche de la raquette dès que la membrane vibrante est actionnée.

Zoomons alors sur la partie intéressante : figure 24.

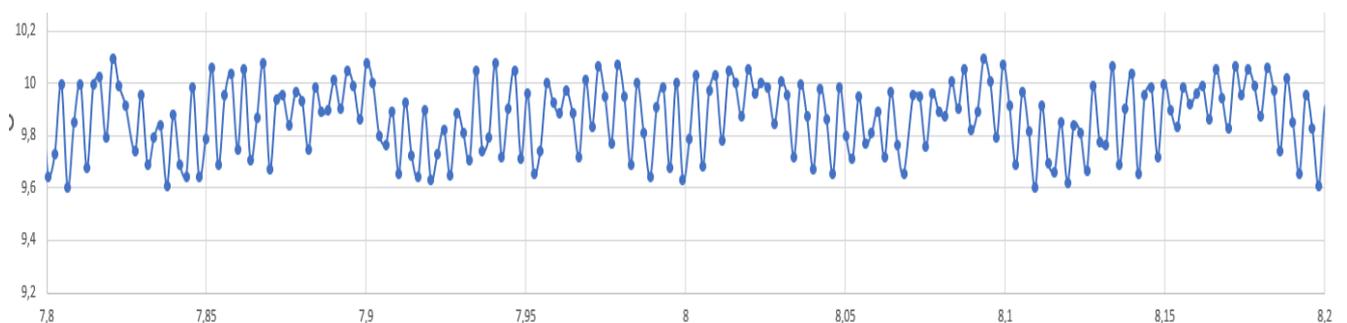


Figure 24 : zoom de la figure 23 mais problème de fréquence d'échantillonnage

L'analyse spectrale du signal obtenu donne une fréquence d'environ 180 Hz, donc bien loin des 508 Hz ou 530 Hz attendus. Le problème, c'est qu'on ne peut pas exploiter ce dernier graphique sans équivoque : en effet, l'application du téléphone ne prend des mesures qu'à une fréquence maximale de 500 Hz. Or c'est précisément l'ordre de grandeur de la fréquence du signal que nous cherchons à observer. La courbe figure 24 ne présente donc probablement pas la vibration réelle du manche de la raquette.

Puisque le problème vient de la fréquence d'échantillonnage, nous sommes revenus vers la carte d'acquisition que nous utilisons régulièrement en TP de physique, et nous avons relié le capteur de force à la carte, par le biais d'un pont diviseur de tension. Nous avons d'autre part dû amplifier le signal comme le montre le schéma figure 25.

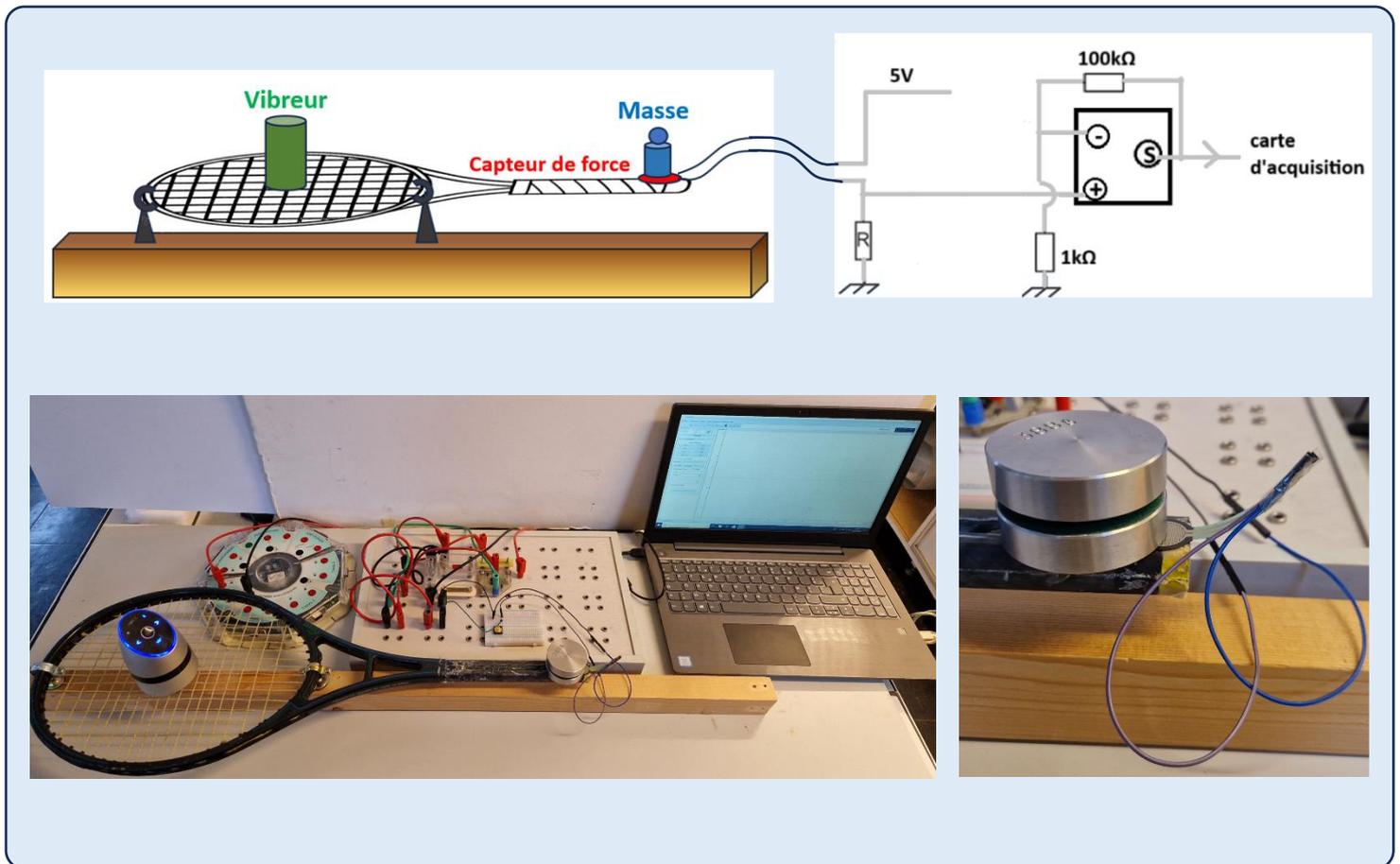


Figure 25 : dispositif avec capteur de force coincé entre le manche et une masse pour mesurer la fréquence de vibration au niveau du manche

Nous avons alors disposé la raquette horizontalement et nous avons posé la membrane vibrante sur le cordage. Le capteur de force est alors posé sur le manche, et une masse est quant à elle posée sur le capteur de force. La mesure est très délicate : nous avons choisi un capteur ayant une plus grande sensibilité que le précédent et un temps de réponse suffisamment faible pour suivre une variation de force de l'ordre de 500 Hz. En positionnant alors la masse de façon précise sur le capteur de force et le capteur de force de façon précise sur le manche, nous avons pu observer la vibration du manche de la raquette à une fréquence de 508 Hz (figure 26).

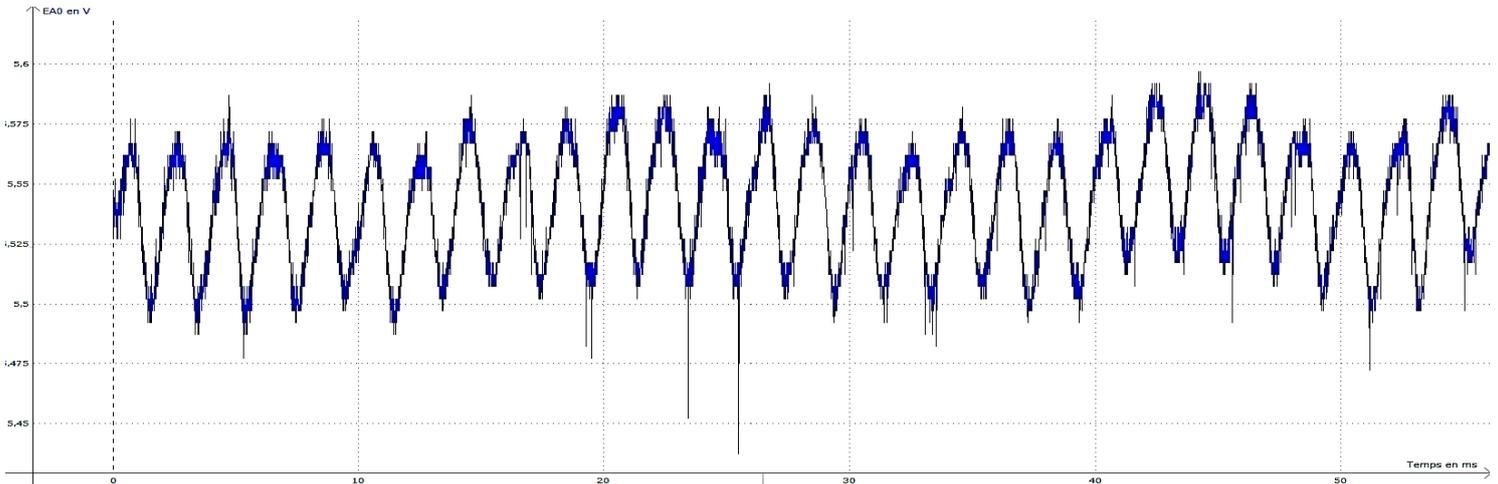


Figure 26 : signal issu du capteur de force, à une fréquence d'environ 500 Hz

Nous avons pu aussi constater qu'en faisant varier la fréquence de vibration de la membrane vibrante autour de cette fréquence, l'amplitude de vibration du manche diminuait de façon significative.

L'expérience prouve donc bien que la vibration du cordage à 530 Hz se transmet bien jusqu'au manche de la raquette.

Cela dit, avec cette expérience, il n'a pas été possible de voir l'action de l'anti vibrateur. En effet, le fait de le disposer sur la raquette faisait forcément bouger les éléments du dispositif expérimental, ce qui modifiait la façon dont le capteur de force était positionné très précisément, et les résultats obtenus avec et sans anti vibrateurs n'étaient plus comparables.

Mais maintenant que nous savons comment vibre le manche, nous pouvons imaginer un nouveau dispositif expérimental permettant de voir l'action de l'anti vibrateur. Mais avant d'aborder cela, nous pouvons porter un regard critique sur notre choix que nous avons fait jusqu'à présent de distinguer la vibration du cadre de celle du cordage.

### 3 – Cordage et cadre, un couple qui vibre !

En effet, à force de taper sur la raquette et de réfléchir avec tout ce que nous observons, nous pensons comprendre ce qui se passe lorsqu'on tape sur une balle avec la raquette, et cela mérite un nouveau paragraphe.

En bloquant le cadre, le son produit par un coup donné sur le cordage ne donne pas le pic de fréquence que nous avons observé figure 20. De la même manière, en posant juste un doigt sur le cordage, on ne retrouve pas aussi distinctement le son à l'origine du spectre de la figure 20. On pense alors que ces deux éléments sont couplés.

Il nous paraît maintenant évident que lorsque la raquette oscille suite au coup donné dans la balle, cela ne déforme pas le cadre de la raquette dans le plan de la raquette. Elle se contente d'osciller comme une lame qui vibrerait.

Par contre, l'impact de la balle provoque une déformation du cordage, qui se creuse au moment de l'impact (Figure 27 ci-contre).



Figure 27 : déformation du cordage lors de l'impact de la balle

Il est alors tout à fait naturel de penser que cela déforme le cadre de la raquette dans le plan de la raquette. En particulier, vue la configuration géométrique de la raquette, la largeur étant de dimension plus faible que la hauteur, nous pensons que la déformation sera plus grande selon la largeur que selon la longueur de la raquette.

Cette déformation serait alors à l'origine d'une vibration, donc d'une onde mécanique qui serait une onde mécanique stationnaire qui s'installerait tout le long du cadre de la raquette, jusqu'au manche. C'est ce que nous avons représenté en vert de façon très exagérée, sur la figure 28 ci-contre.

Nous avons voulu vérifier ces hypothèses, en essayant en particulier de voir ces ondes stationnaires.

En promenant un stylo qui effleure le cadre, on peut très clairement confirmer que le cadre vibre plus intensément sur les côtés que dessus : à ces endroits-là, le stylo se met en effet à vibrer au contact du cadre, alors que cette vibration est soit absente, soit très faible aux autres endroits. S'il y a bien présence d'onde stationnaire, ces endroits représenteraient des ventres de vibration. Nous avons essayé d'avoir un aperçu global de la vibration du cadre dans le plan de la raquette.

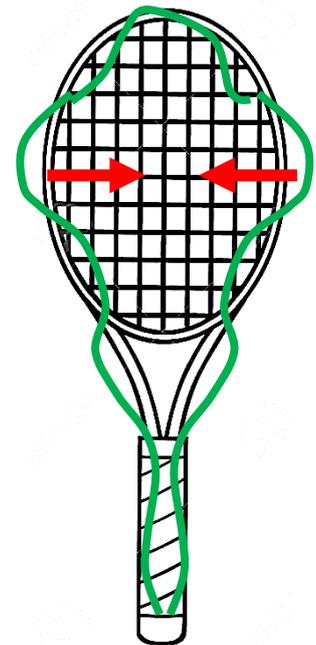


Figure 28 : ondes stationnaires et déformation de la raquette potentiellement présentes suite à l'impact de la balle

Pour cela, nous avons mis le cadre à fleur d'eau dans un récipient, de sorte que les cordes surnagent. Nous avons alors déposé la membrane vibrante et avons réglé la fréquence de vibration à 508 Hz pour voir si la vibration du cadre avait une amplitude suffisante pour faire vibrer l'eau au niveau des supposés ventres de vibration. Mais pour le moment l'expérience n'a rien montré (même en faisant varier la fréquence de vibration de la membrane vibrante autour de 508 Hz), et nous chercherons à améliorer le dispositif car les résultats obtenus ne sont peut-être pas représentatifs.

Voyons maintenant comment nous pouvons évaluer l'efficacité de l'anti vibrateur :

## IV – Comparaison de différents anti vibrateurs

### 1 ) Dispositif expérimental

Comme nous abordions la notion d'ondes stationnaires, nous nous sommes familiarisés avec cette notion à l'aide de la corde de Melde : une corde fixée à une première extrémité et son autre extrémité est attachée à un vibreur. Le vibreur monte et descend périodiquement, engendrant une perturbation qui se propage le long de la corde. Si la période de la perturbation est égale à la durée que met la perturbation pour faire un aller-retour sur la corde entre ses deux extrémités, alors apparaît une onde stationnaire sur la corde. Il s'agit du premier mode propre de vibration de la corde, appelé aussi mode fondamental. En voyant cette expérience, nous avons eu l'idée d'accrocher une corde de guitare à l'extrémité du manche de la raquette de tennis (figure 29). Si la fréquence du mode fondamental de vibration de la corde correspond à la fréquence de vibration du manche de la raquette, alors on peut s'attendre à ce que la corde vibre. Le fait de placer ensuite l'anti vibrateur doit atténuer l'amplitude de vibration de la corde.

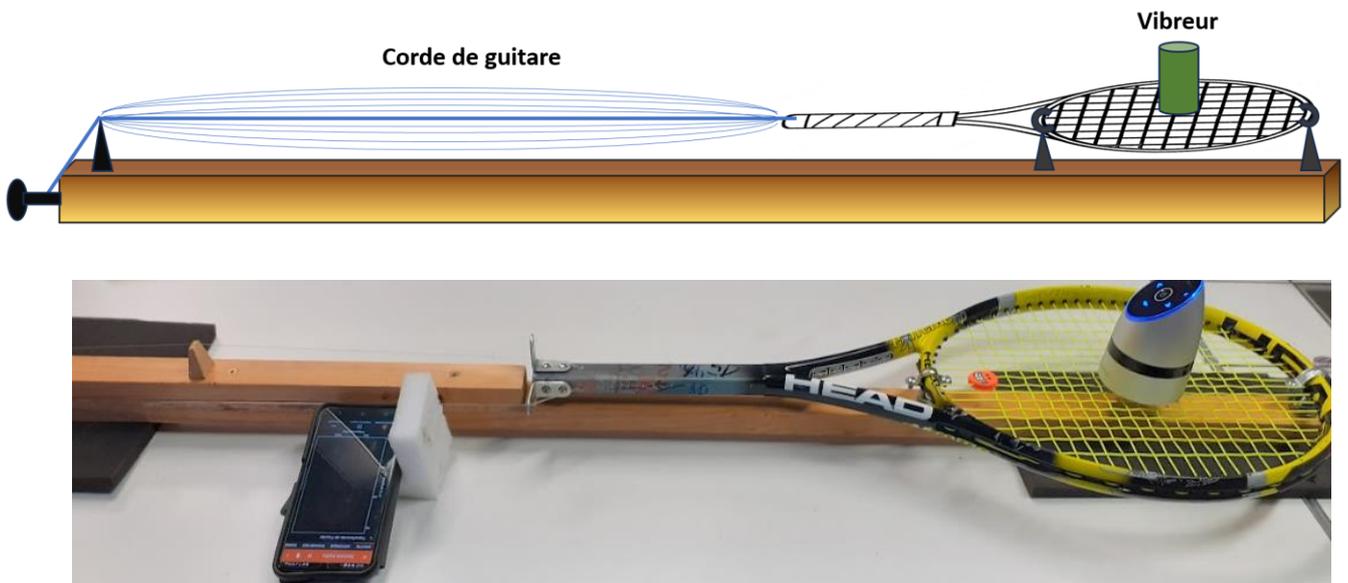


Figure 29 : raquette guitare : une corde de guitare est fixée à l'extrémité du manche de la raquette

## 2 ) Test de validité du dispositif

Nous avons dans un premier temps cherché la fréquence de vibration de la raquette insérée dans le dispositif de la figure 29 en tapant dessus et nous avons relevé la fréquence du son produit. Nous avons alors ajusté la longueur et la tension de la corde de guitare de sorte que son mode fondamental de vibration corresponde à la fréquence de la vibration de la raquette. Nous avons enfin réglé la fréquence de vibration de la membrane vibrante à cette même fréquence. Lors de ces mesures, la fréquence était voisine de 530 Hz.

Le test est alors très clairement positif : la corde de guitare se met à vibrer et cette vibration cesse si on bloque le manche de la raquette de tennis. Nous savons que la corde vibre non pas en la regardant, car l'amplitude de vibration est relativement faible, mais en écoutant le son provenant de la corde et en mesurant l'amplitude sonore avec l'application Phyphox du téléphone qui nous permet de relever la fréquence et l'amplitude du son.

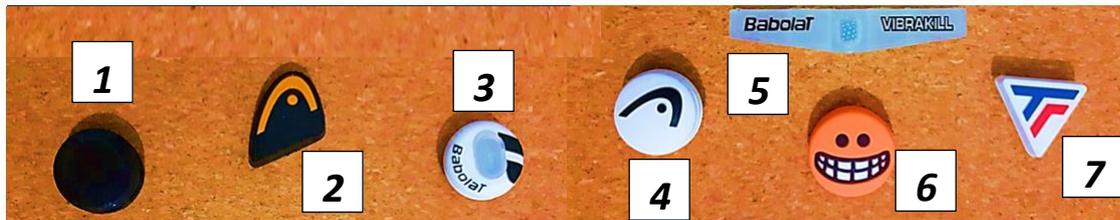
Pour compléter le test, nous avons augmenté la fréquence de vibration de la membrane vibrante de 10 Hz, et nous avons accordé la corde de guitare pour qu'elle vibre à cette nouvelle fréquence de vibration. La corde ne vibre alors pas. Elle ne vibre pas non plus si nous diminuons la fréquence de la membrane de 10 Hz. L'ensemble de ces mesures confirment que la vibration de 530 Hz se propage jusqu'au manche, et le dispositif expérimental que nous avons imaginé permet d'isoler cette vibration et de la mettre en évidence. En essayant de forcer la raquette à vibrer à une fréquence voisine de 530 Hz, le dispositif montre que l'amplitude de la vibration au niveau du manche n'est pas assez grande pour faire vibrer la corde de guitare.

Que se passe-t-il en disposant l'anti vibrateur ?

En disposant l'anti vibrateur sur le cordage, nous constatons bien une diminution de l'amplitude de vibration de la corde. La corde continue de vibrer, mais avec une amplitude significativement plus faible comparé à la façon dont elle vibre en l'absence de l'anti vibrateur.

Il va alors être possible d'utiliser le dispositif expérimental pour comparer l'impact de différents anti vibrateurs sur la vibration du manche de la raquette.

### 3 ) Comparaison des différents anti vibrateurs (figure 30)



Ci-dessus, figure 30, nous avons numéroté les anti vibrateurs étudiés :

- 1 – Fait maison avec imprimante 3D
- 2 – xtra damp -HEAD
- 3 – Custom damp – Babolat
- 4 – Djokovic dampener – HEAD
- 5 – Vibrakil – Babolat
- 6 – Les smiley – Pro Touch
- 7 – Logo damp - Technifibre

Nous avons donc acheté 6 anti vibrateurs et nous avons réalisé l'expérience décrite ci-dessus pour chacun d'entre eux. Nous avons alors mesuré l'amplitude maximale de la vibration de la corde avec et sans anti vibrateur en mesurant l'amplitude sonore du son produit par la vibration de la corde de guitare. Voici les résultats obtenus : figure 31. Ils montrent le pourcentage de réduction de l'intensité sonore issu de la corde lorsqu'on place l'anti vibrateur sur le cordage.

A la vue de ces résultats, nous pouvons formuler plusieurs remarques :

- Il y a de réelles différences en terme de qualité entre les anti vibrateurs.
- Il semble peu probable que dans nos expériences, nous mesurions le pourcentage d'atténuation réellement atteint lors d'un match de tennis, car les 7% de diminution obtenus avec le « xtra damp – HEAD » ne correspondent pas à la sensation éprouvée en jouant au tennis avec cet anti vibrateur. L'atténuation réelle semble bien plus importante.
- Lors de nos mesures, nous nous sommes intéressés à l'amplitude de vibration et non à sa durée.
- Enfin, voici une remarque qui nous est venue en rédigeant le mémoire : est ce que l'efficacité de l'anti vibrateur dépend de la raquette ?

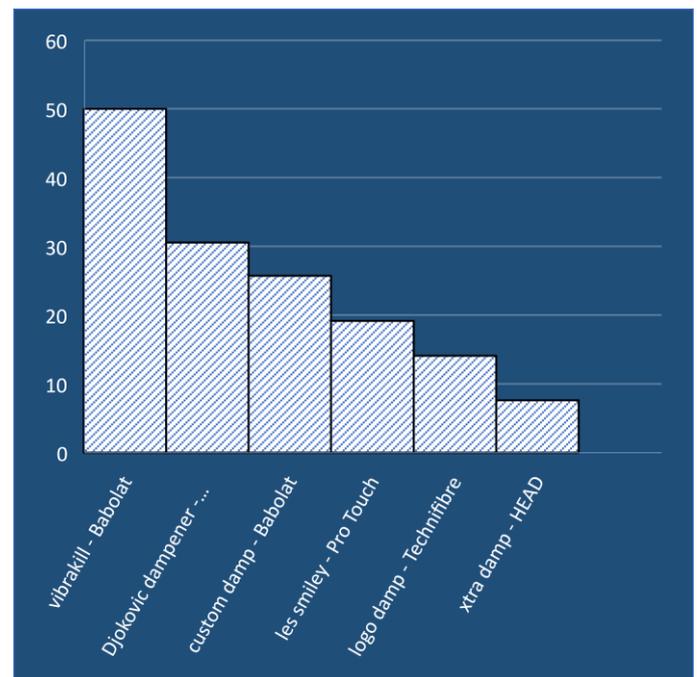


Figure 31 : réduction de l'intensité sonore issu de la corde lorsqu'on place l'anti vibrateur sur le cordage

Quoi qu'il en soit, comme il s'agit d'une étude relative, la comparaison des résultats reste valable pour choisir l'anti vibrateur. Celui qui semble le plus performant est celui qui prend le plus de cordes verticales : le « Vibrakill – Babolat ». Cela dit, il reste difficile d'en déduire le mécanisme qui permet à l'anti vibrateur de diminuer les vibrations au niveau du manche :

- Est-ce que l'anti vibrateur rend le cadre de la raquette plus rigide ?
- Est-ce qu'il contraint les ondes mécaniques à se propager au niveau du tamis au lieu de se diriger vers le manche de la raquette ?
- Est-ce qu'il absorbe les ondes mécaniques ?

Il s'agit de questions auxquelles nous devons encore répondre. On pourra pour cela s'intéresser aux anti vibreurs qui ne prennent que 2 cordes verticales et voir leurs différences en termes de formes, de structures, de déformabilité, etc., car il est très intéressant de constater de telles différences d'efficacité d'atténuation pour des formes et des malléabilités qui semblent peu différentes (cela reste tout de même à vérifier rigoureusement).

Justement, en termes de malléabilité, nous avons voulu comparer les atténuations obtenues avec les anti vibreurs du marché, avec un anti vibrateur que nous avons-nous même conçu à l'imprimante 3D, très rigide. Il se trouve que les résultats en termes d'atténuation sont catastrophiques et nous ne nous lancerons donc pas tout de suite dans la création d'une entreprise de fabrication d'anti vibrateur. Plus sérieusement, nous constatons donc que le caractère malléable de l'anti vibrateur sera un élément particulièrement intéressant à étudier.

Pour poursuivre au niveau de la comparaison entre les anti vibreurs, nous les avons testé en jouant au tennis et les résultats sont sans équivoque. En effet, en utilisant le « xtra damp HEAD », nous avons ressenti les vibrations et après seulement quelques minutes de jeu, nous avons ressenti une fatigue musculaire et le bras beaucoup plus contracté qu'à l'accoutumée. L'utilisation du « Custom damp – Babolat » permettait quant à lui de jouer sans fatigue musculaire.

Nous sommes conscients que ces ressentis ne sont pas associées à des valeurs mesurées, même s'ils sont bien réels et flagrants. Pour rendre cette discussion plus rigoureuse quantitativement, nous sommes entrés en contact avec Monsieur Tony Monnet, professeur des universités à l'Université de Poitiers (Institut Pprime, Département GMSC - SP2MI – professeur au sein de l'UFR STAPS), et un rendez-vous est pris le mardi 16 janvier pour poursuivre le projet sur un plan biomécanique.

## Conclusion :

Il n'est pas évident d'accéder à la vibration de la raquette qui perturbe les joueurs de tennis, en particulier car il s'agit d'une vibration qui semble se propager dans le plan de la raquette, avec une amplitude très faible par rapport à la très grande amplitude de la vibration dans le plan perpendiculaire au plan de la raquette. Mais à force de tester de nouvelles approches, nous avons fini par trouver une méthode permettant d'y parvenir. Nous avons alors pu voir que l'anti vibrateur coupe la fréquence à 530 Hz. Nous avons pu imaginer un dispositif expérimental permettant d'évaluer la qualité d'un anti vibrateur, tout en gardant en tête qu'il faut réaliser ces expériences sur différentes raquettes pour conclure sur le caractère absolu de cette efficacité. Nous avons enfin laissé des questions en suspens, telles que l'étude du caractère plus ou moins déformable et élastique des anti vibreurs sur leur efficacité, et la façon dont une vibration pourtant de faible amplitude peut amener à un tel inconfort de jeu. Nous poursuivrons notre projet en travaillant en particulier sur ces points-là.