

Jouer sans trembler !



Présenté par :

Archibald FRIOT

Ylan SIGRIST

Emma CARLIN

Zion DIALLO

Antoine MARLEIX



**ACADÉMIE
DE POITIERS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*

Encadré par :

Jean-Brice MEYER

Tristan CLÉMENT

Max JODEAU



LP21

Lycée Pilote
Innovant International

Présentation de l'équipe :



Emma CARLIN



Je m'appelle Emma. Je suis élève de première au LP2I à Jaunay Marigny et tennis woman depuis mon plus jeune âge. J'adore travailler sur ce phénomène qui m'intrigue depuis de longues années, essayer de percer son mystère et d'en découvrir ses caractéristiques grâce à des expériences pour la plupart peu conventionnelles mais pourtant très réfléchies. Ce projet scientifique m'a énormément apporté en termes de compétences oratoires, de notions scientifiques, de démarche expérimentale... J'ai été passionné par la démarche scientifique qu'on a pu apporter à ce simple bout de caoutchouc qui s'est avéré être un sujet bien plus complexe qu'il n'en a l'air !

Archibald FRIOT



Moi c'est Archibald, je joue au tennis depuis une bonne dizaine d'années. Le mystère scientifique concernant l'anti-vibrateur m'a toujours intrigué et je me suis motivé à percer ce mystère cette année !

Ylan SIGRIST



Je m'appelle Ylan. Je suis passionné par le piano et la musique en général, et j'adore la physique et le sport. C'est pourquoi ce projet m'est apparu comme une évidence : bien que je ne fasse pas de tennis, le fait qu'un simple objet puisse avoir tant de bénéfices m'a tout de suite intéressé. De plus ce projet m'a grandement aidé à être plus à l'aise à l'oral et dans la synthèse d'un projet qui dure pourtant depuis Octobre ! Enfin, j'ai aussi acquis des connaissances et cela n'a fait qu'augmenter ma curiosité.

Zion DIALLO



Je m'appelle Zion, je suis passionné par les sciences et l'espace. Il y a quelques années j'ai fait du tennis. Je m'étais alors demandé comment fonctionne l'anti-vibrateur mais sans pousser la réflexion. J'ai donc accepté avec plaisir lorsqu'on m'a proposé ce projet en octobre.. Depuis, ce projet m'a apporté beaucoup d'expérience que ce soit à l'oral ou dans la réalisation d'un projet scientifique. Ces qualités me seront très utiles dans mon projet de devenir ingénieur en aérospatiale.

Antoine MARLEIX



Je m'appelle Antoine, j'ai découvert ce projet et j'ai tout de suite accroché. Je suis passionné par la physique et les mathématiques et j'ai trouvé que ce projet était un moyen très intéressant de développer et de concilier ces deux matières. Nous avons pu faire de nombreuses recherches et voulant en faire mon métier plus tard j'ai trouvé qu'avoir une certaine démarche et une bonne pratique des sciences au sein d'un projet comme celui-ci nous formait déjà pour l'avenir. Je suis très content d'avoir fait partie de ce projet, dans des conditions de travail qui ont en plus toujours été optimales !

Résumé :

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 et efficacité de différents anti-vibrateurs.

V – Mode d'action des anti-vibrateurs

Conclusion

Lien vers la vidéo du projet : <https://youtu.be/30df7dEMcto>

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 interpellés. 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



Figure 2 : ingrédients nécessaires à la fabrication d'un lance balles

Nous avons confectionné cela : figure 3

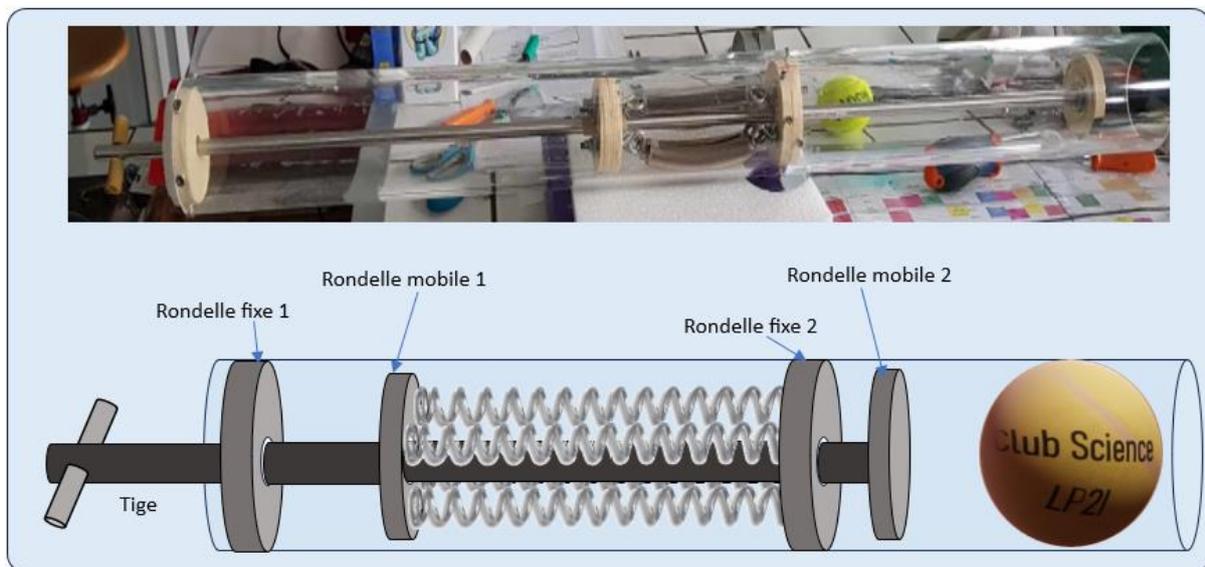


Figure 3 : lance balle confectionné au lycée

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 Δt . 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 Δt . Voici un lien vers la vidéo de cette expérience :

<https://youtu.be/0QZPAC76OfU>

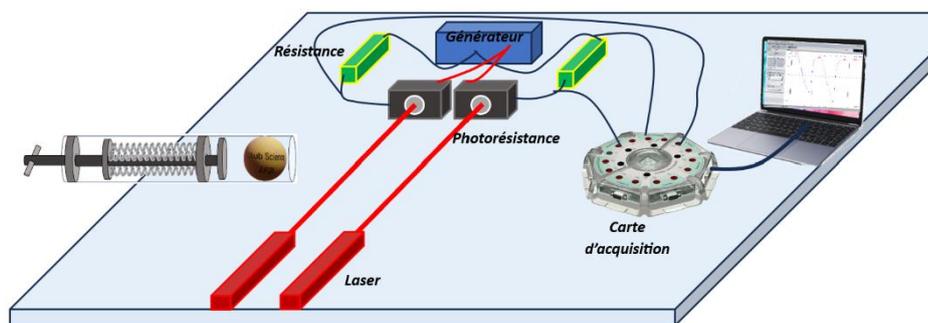
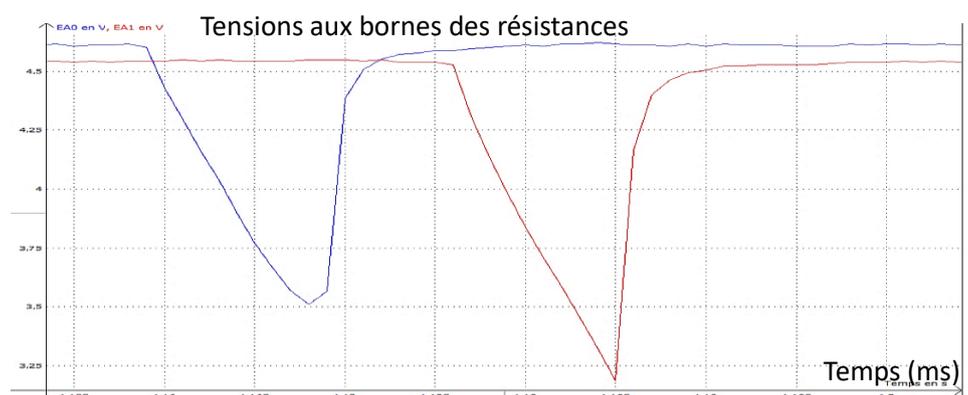


Figure 4 : mesure de la vitesse de la balle à la sortie du lance balle à l'aide de 2 lasers et 2 photorésistances

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

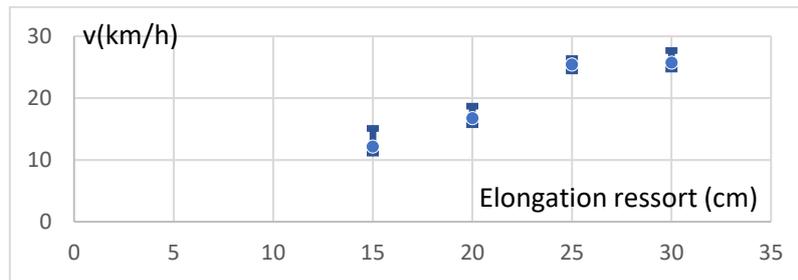


Figure 6 : vitesse de la balle en sortie du lance balle en fonction de l'élongation des ressorts

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). Vous pouvez visionner l'expérience en suivant le lien : <https://youtu.be/IW5QjP2MvxQ>

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

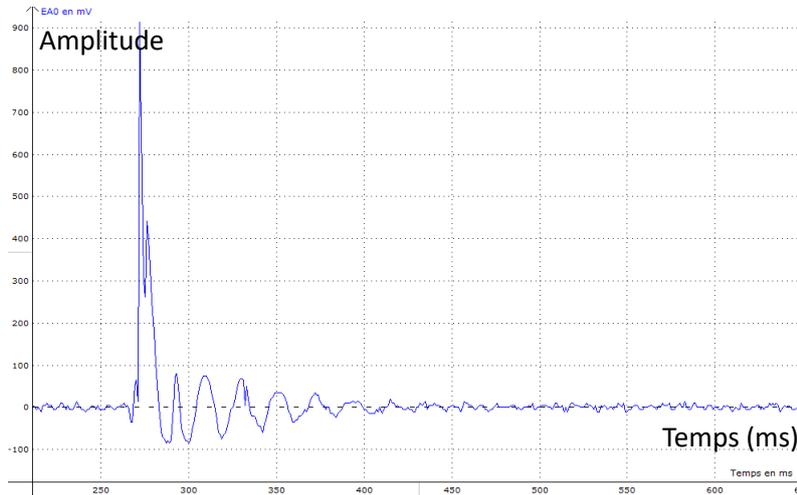


Figure 8 : vibration détectée par une bobine du fait de la vibration de l'aimant accroché au haut du cadre de la raquette

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).

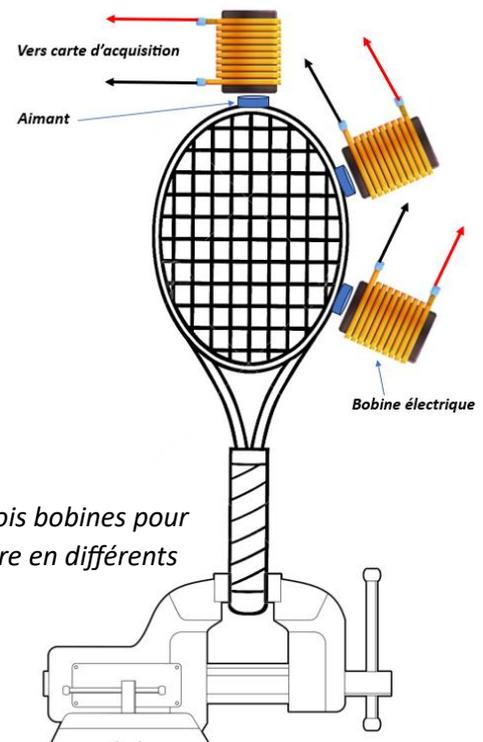


Figure 9 : disposition des trois bobines pour étudier la vibration du cadre en différents endroits

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

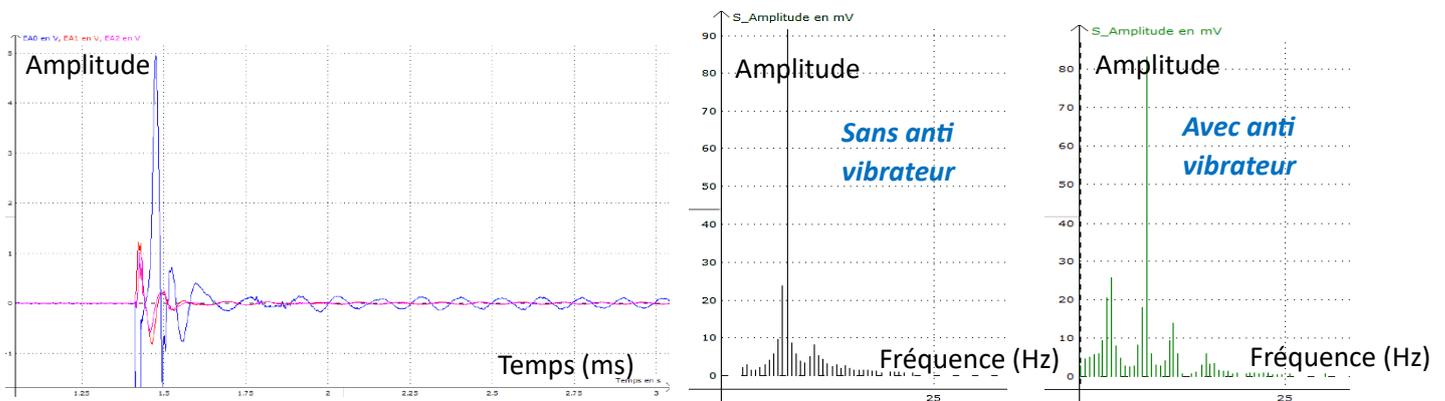


Figure 11 : à gauche : signaux issus des trois bobines avec une raquette sans anti vibrateur - Au milieu : analyse spectrale du signal de gauche – A droite : analyse spectrale avec un cordage avec anti vibrateur

Sur le schéma de gauche de la figure 11, nous pouvons voir les 3 signaux issus des 3 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-vibrateur, et sans anti-vibrateur.

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-vibrateur sur la raquette. Il est même surprenant de voir qu'avec l'anti-vibrateur, 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-vibrateur. 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.

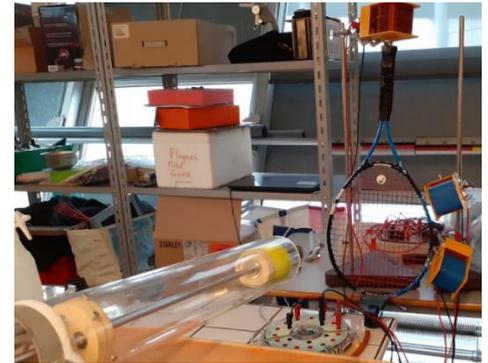
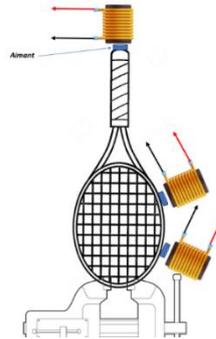
2) Mesures de la vibration de la raquette au niveau du manche

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.

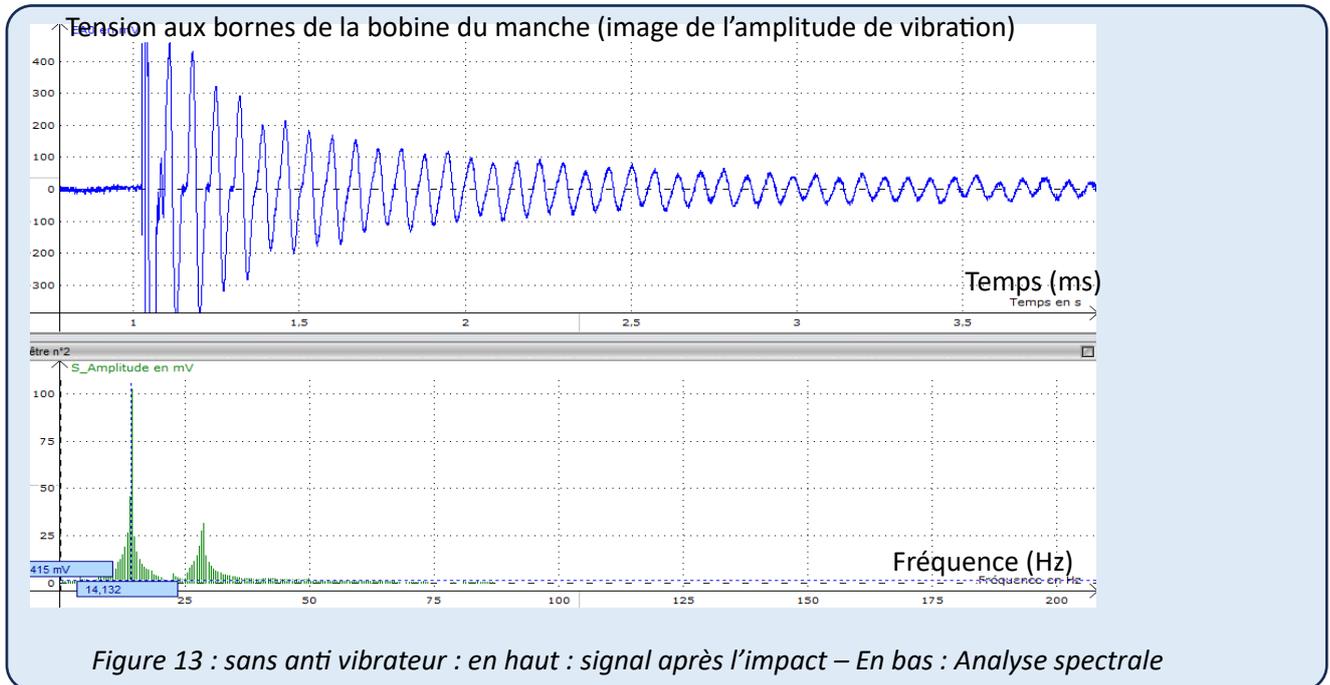
Nous avons à nouveau utilisé les bobines et les aimants pour détecter la vibration de la raquette.

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

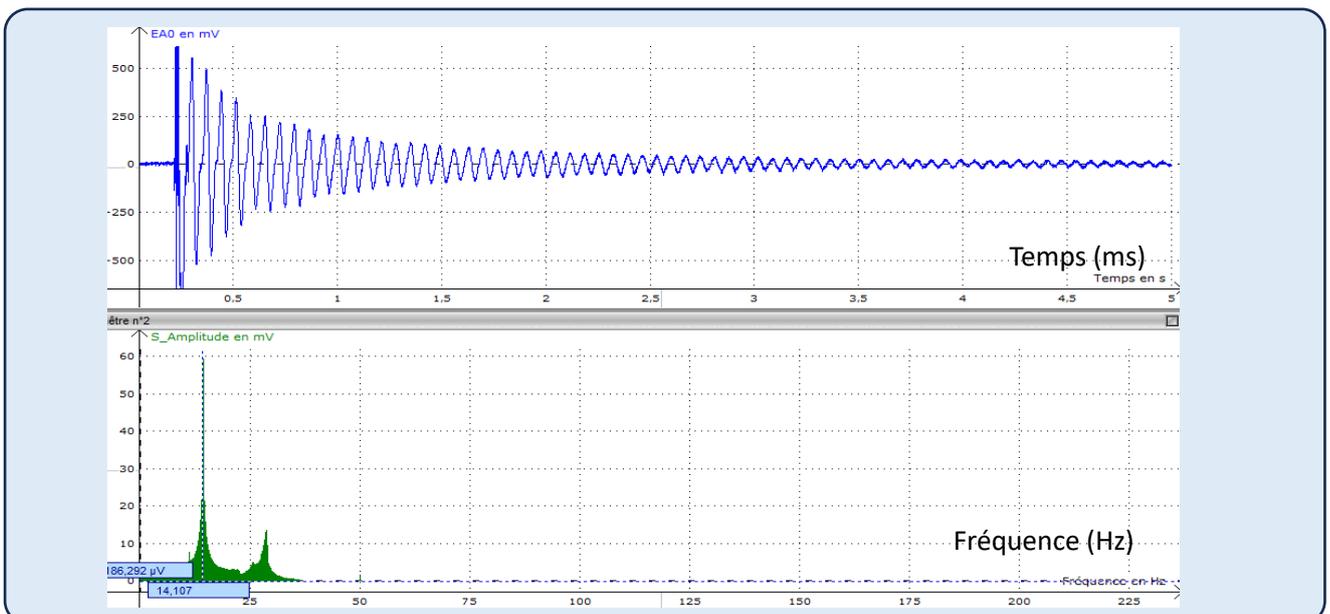


Voici les résultats obtenus :

Raquette sans anti-vibrateur : figure 13



Raquette avec anti-vibrateur : Figure 14



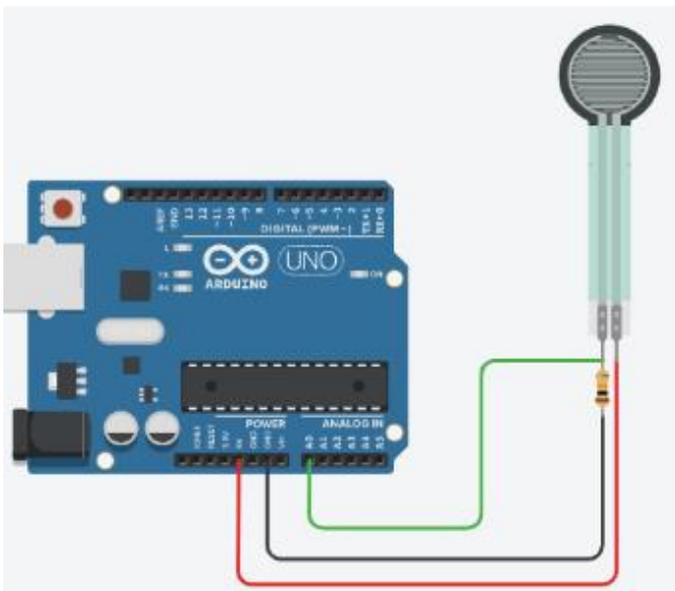
Comme vous pouvez le voir, les différences entre les deux signaux sont anecdotiques : dans les deux cas, non seulement la raquette vibre aux mêmes fréquences (14 Hz et 28 Hz), mais en plus, la décroissance de l'amplitude du signal au cours du temps est également similaire dans les deux cas.

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-vibrateur.

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 15 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-vibrateur (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.

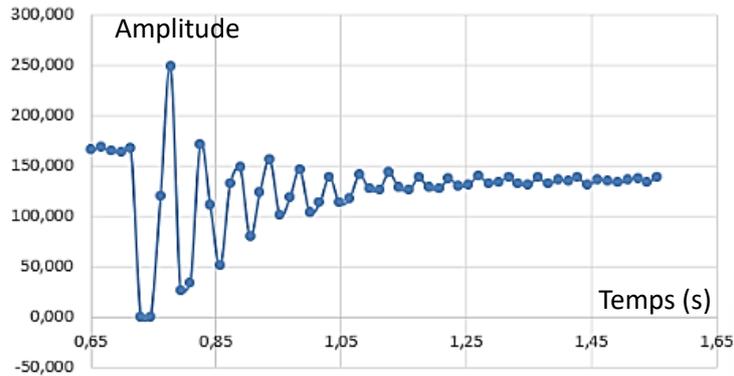


Figure 16 : signal au niveau du manche, mesuré par un capteur de force – raquette sans anti vibrateur

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.

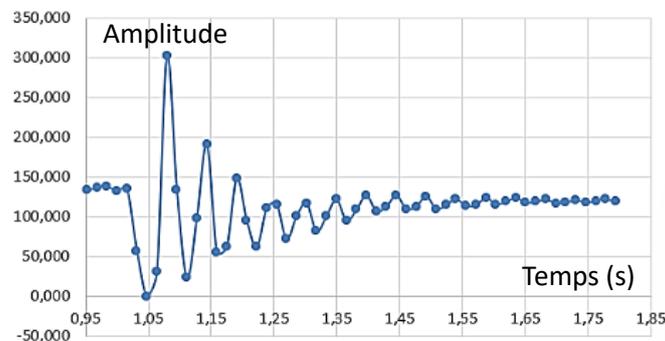


Figure 17 : signal au niveau du manche, mesuré par un capteur de force – raquette avec anti vibrateur

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 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. La réponse à la question semble alors 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.

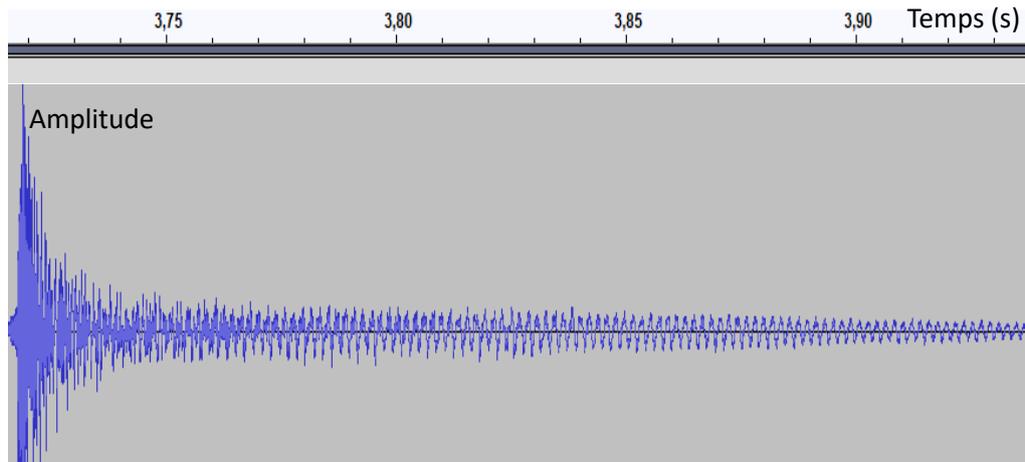


Figure 19 : signal sonore après un impact sur le cordage sans anti vibrateur

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 :

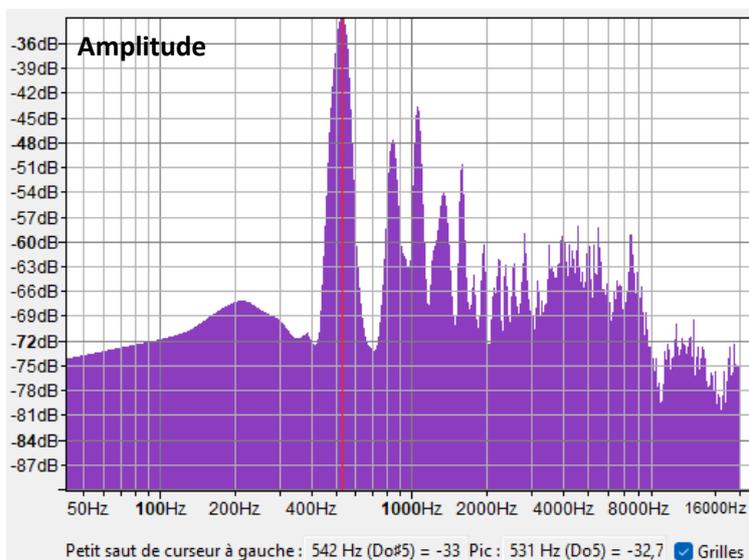


Figure 20 – a

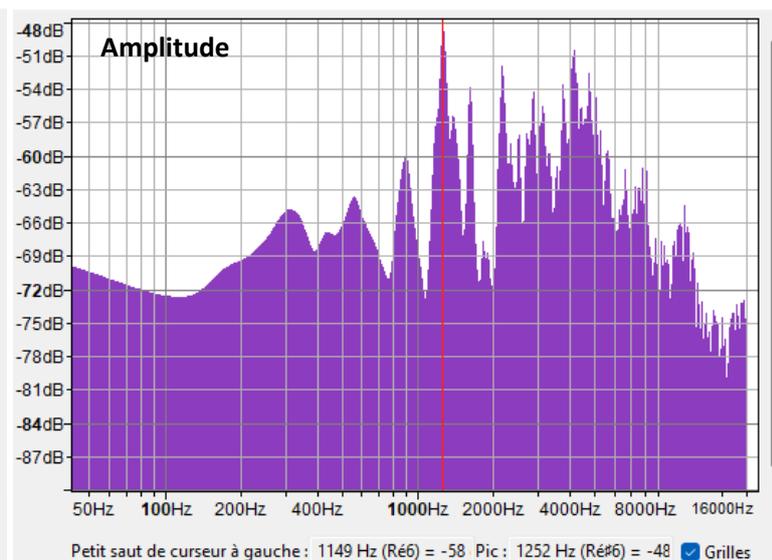


Figure 20 – b

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.

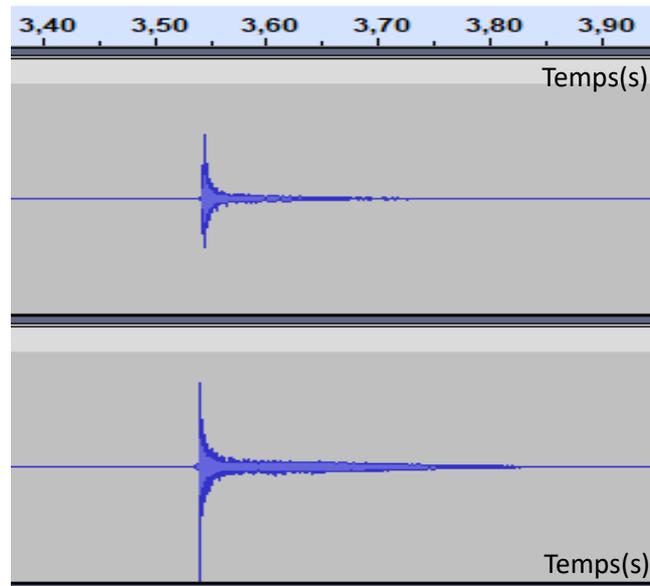


Figure 21 : comparaison de la durée de vibration du cordage avec anti vibrateur (en haut) et sans (en bas)

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. Cela dit, on est en train de parler de la transmission des vibrations de la raquette au bras, et non à la fréquence des contractions musculaires elles-mêmes. Les vibrations transmises par le manche sur le bras peuvent entraîner des contraintes sur les tissus, y compris les muscles, les tendons et les ligaments. Donc non, les muscles eux-mêmes ne vibrent pas à ces fréquences élevées, mais les tissus environnants peuvent être soumis à des vibrations et à des forces qui peuvent potentiellement causer des blessures.

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.

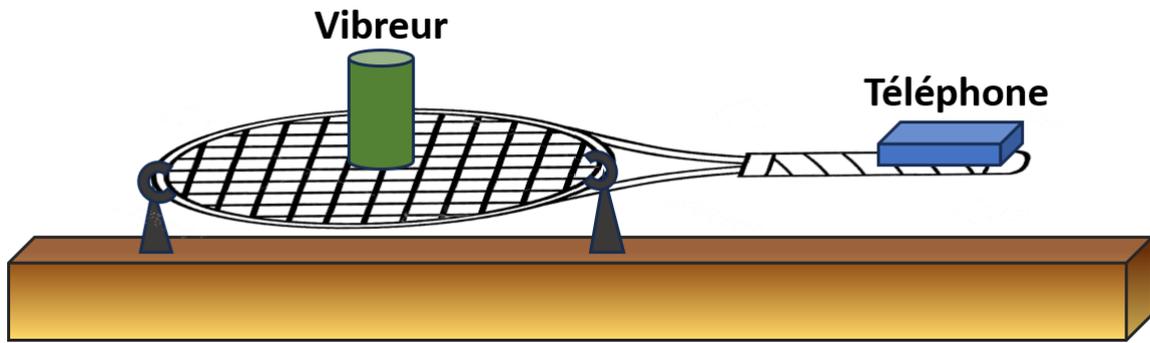


Figure 22 : vibration du manche au moyen d'une membrane vibrante disposée sur le cordage – Mesure de la vibration grâce à l'accéléromètre du téléphone piloté par l'application Phyphox

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.

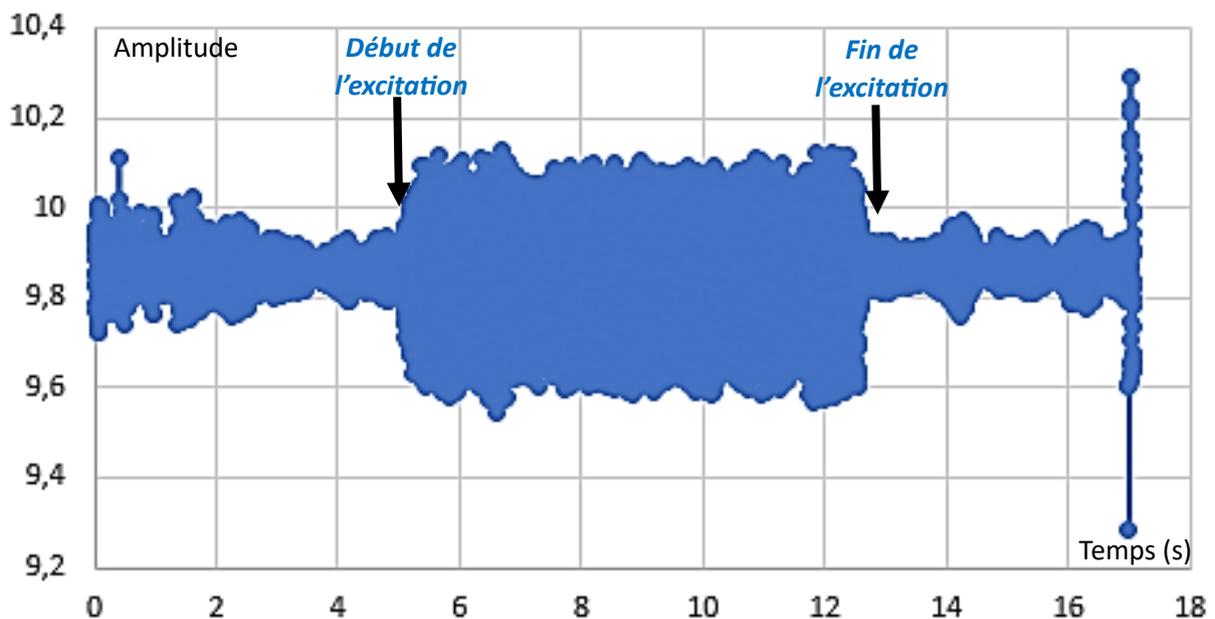


Figure 23 : mesure de la vibration au niveau du manche au moyen d'un accéléromètre posé sur le manche

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.

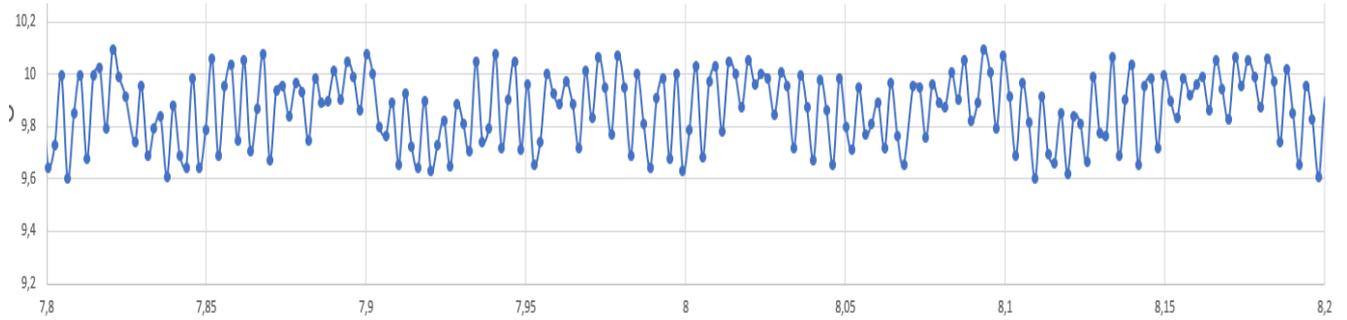


Figure 24 : zoom de la figure 23 mais problème de fréquence d'échantillonnage

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 de la 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 les schémas de la figure 25.

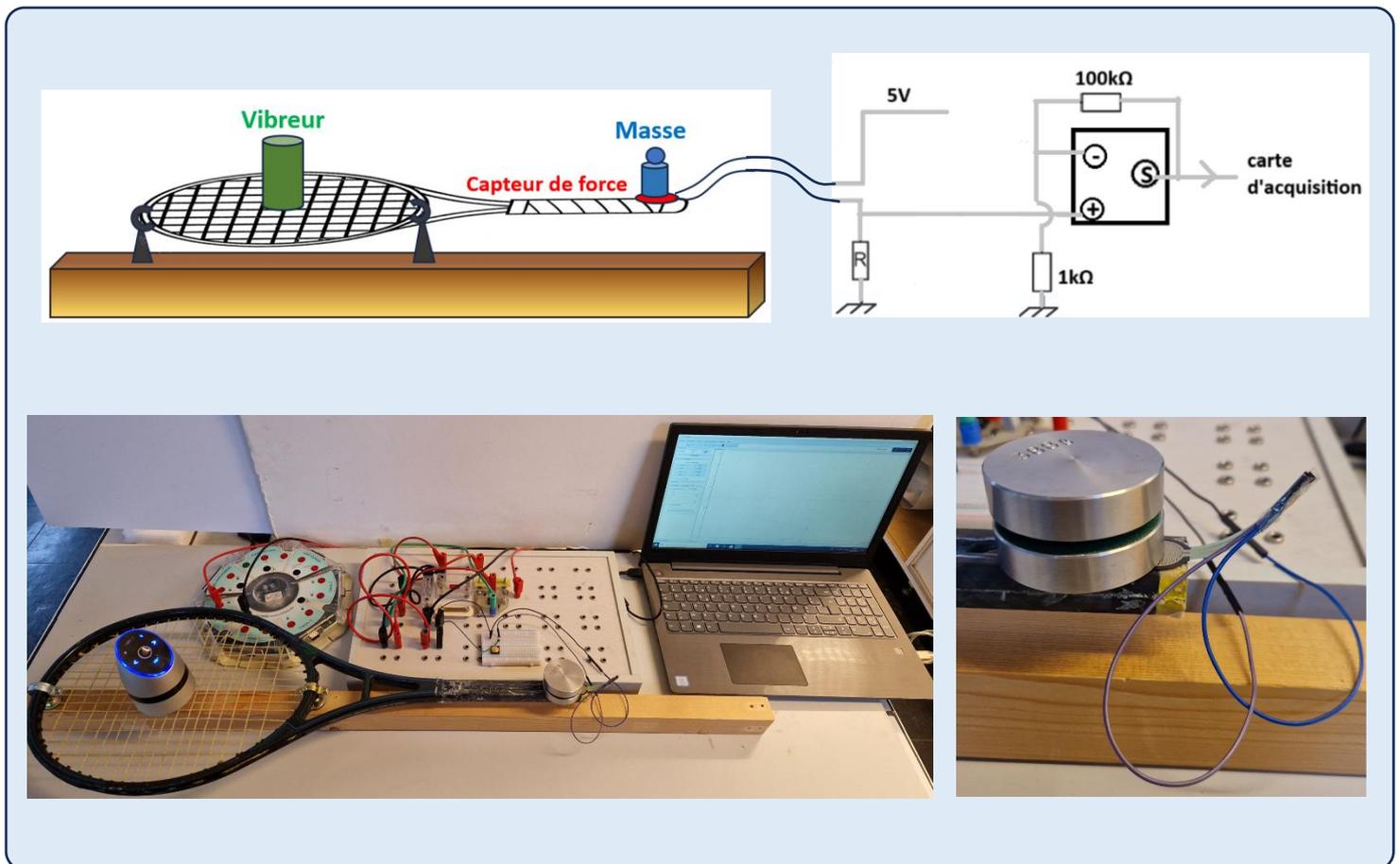


Figure 25 : dispositif avec capteur de force coincé entre le manche et une masse pour mesurer la fréquence de vibration au niveau du manche

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) (vidéo de l'expérience faite avec une autre raquette : <https://youtu.be/2omtl9atafA>).

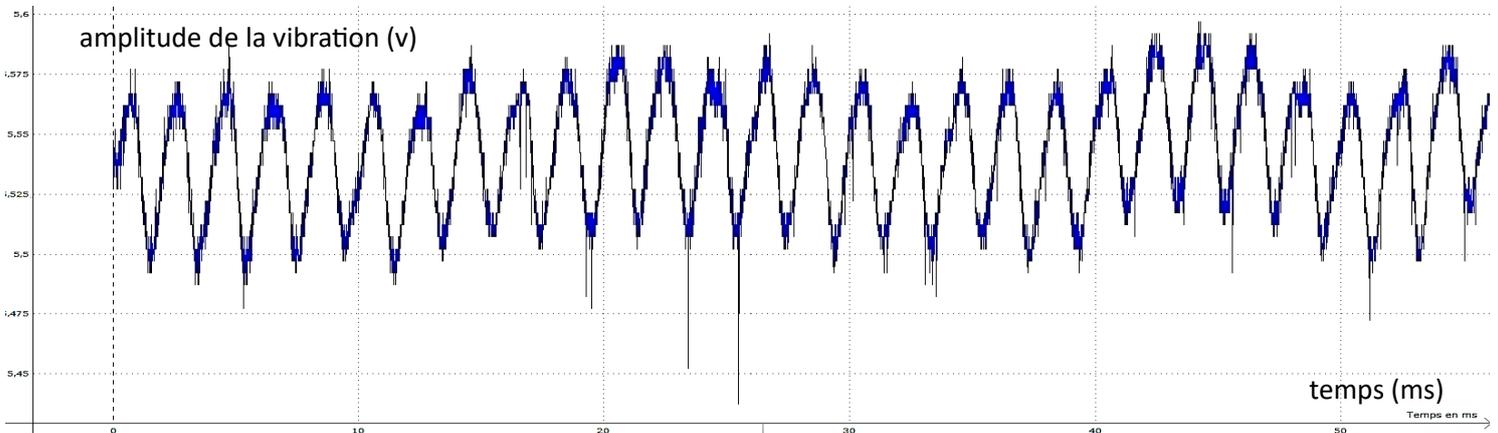


Figure 26 : signal issu du capteur de force, à une fréquence d'environ 500 Hz

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-vibrateur 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.

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



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).

Il est alors tout à fait naturel de penser que cela déforme le cadre de la raquette dans le plan 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, nous avons pu identifier clairement 4 endroits du cadre qui vibrent (au niveau des flèches rouges): 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.

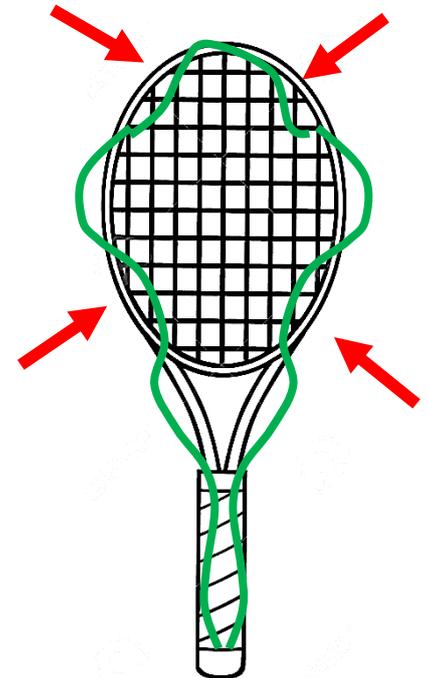


Figure 28 : ondes stationnaires et déformation de la raquette potentiellement présentes suite à l'impact de la balle

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. En effet, la participation d'ondes stationnaires pour illustrer les vibrations de la raquette a été confirmée lors de lectures récentes que nous avons pu faire dans des articles scientifiques [1].

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

IV – Comparaison et efficacité 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.

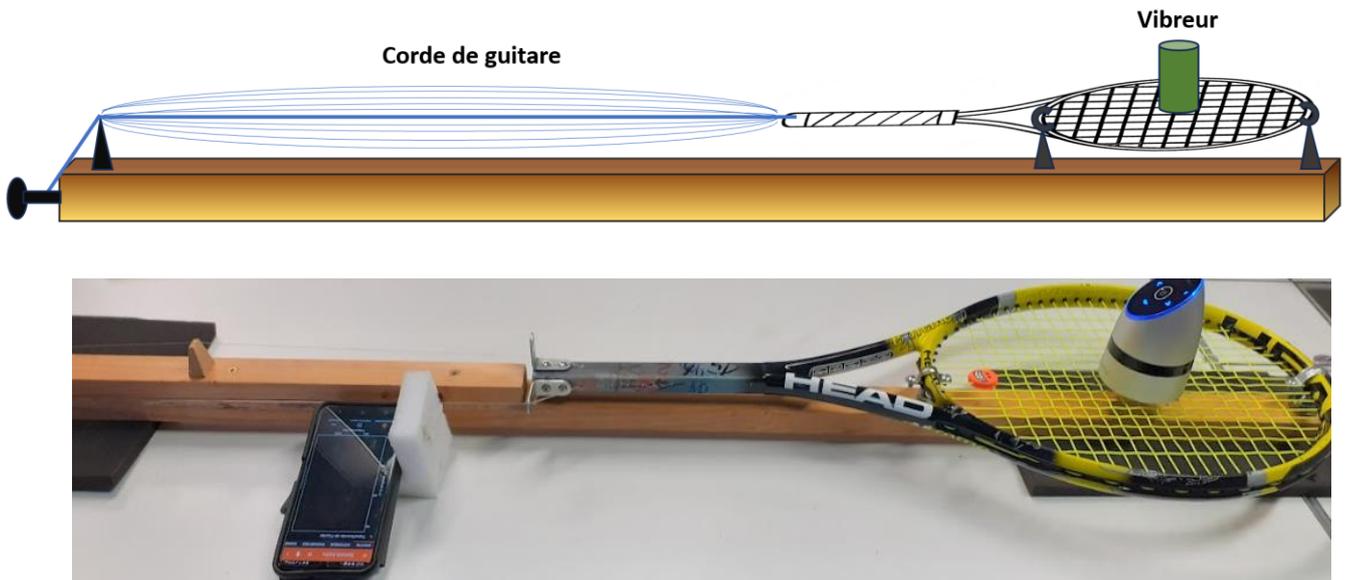


Figure 29 : raquette guitare : une corde de guitare est fixée à l'extrémité du manche de la raquette

2) Test de validité du dispositif

Vidéo de l'expérience : <https://youtu.be/uvS4gvy9cU8>

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 Phyxox du téléphone qui nous permet de relever la fréquence et l'amplitude du son.

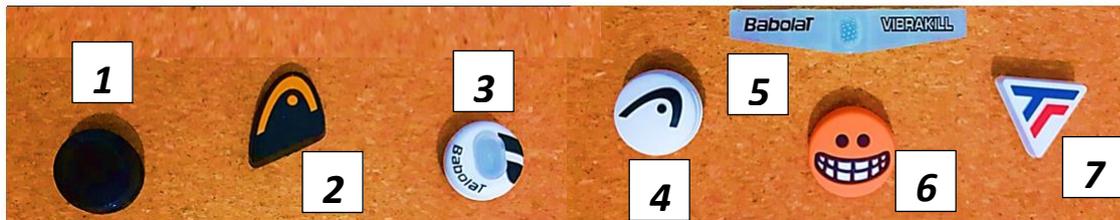
Pour compléter le test, nous avons augmenté la fréquence de vibration de la membrane vibrante de 10 Hz, et nous avons accordé la corde de guitare pour qu'elle vibre à cette nouvelle fréquence de vibration. La corde ne vibre alors pas. Elle ne vibre pas non plus si nous diminuons la fréquence de la membrane de 10 Hz. L'ensemble de ces mesures confirme 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 comparée 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 issue 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 ?

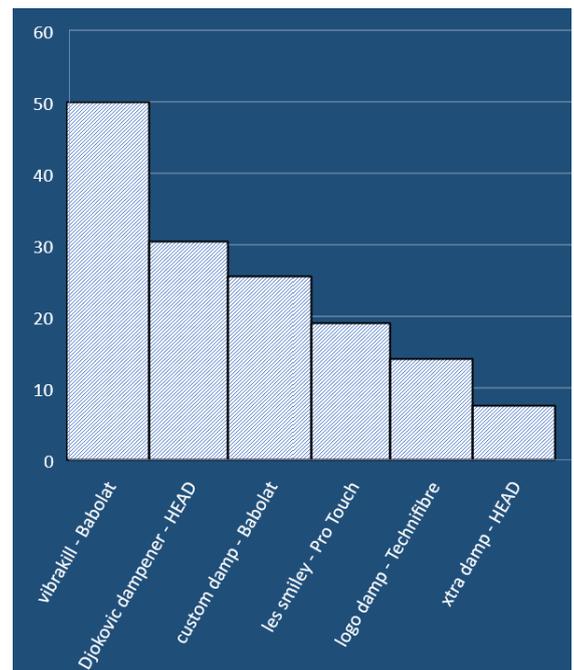


Figure 31 : réduction de l'intensité sonore issue de la corde lorsqu'on place l'anti vibrateur sur le cordage ¹⁹

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 ».

Pour poursuivre au niveau de la comparaison entre les anti-vibrateurs, nous les avons testés 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 associés 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).

4) Mesure de l'efficacité des anti-vibrateurs au laboratoire de Tony Monnet

Lors d'une première visite au sein de son laboratoire, nous avons pu prendre connaissance du matériel disponible pour tenter de répondre à notre question. Lors d'un deuxième rendez-vous, nous avons mis en place notre protocole expérimental : (vidéo : <https://youtu.be/LyBezCYvn0Y>)

Nous avons équipé la raquette de 6 réflecteurs infrarouges, le poignet de 2 réflecteurs, le coude de 2 réflecteurs et l'épaule de 2 réflecteurs. Ces réflecteurs seront éclairés par 16 émetteurs / récepteurs infrarouges. La position des réflecteurs sera alors repérée par potentiellement 16 caméras, ce qui permettra de connaître leur position avec une précision remarquable de l'ordre du dixième de millimètre. La fréquence d'échantillonnage est quant à égale au maximum à 1000 Hz. Ces capteurs visent à détecter des vibrations des différentes parties du bras lors de l'impact de la balle sur la raquette.

Parallèlement à cela, nous avons disposé 2 capteurs électromyographiques sur 2 muscles (long supinateur et petit palmaire – figure 32 ci-contre) pour pouvoir détecter l'activité musculaire lors de l'impact.

A l'heure où nous écrivons le mémoire, nous avons commencé à analyser quelques unes de nos données. Ce travail est très délicat car il faut filtrer un signal de faible amplitude (certes quasiment périodique) mélangé à un signal complexe de grande amplitude.

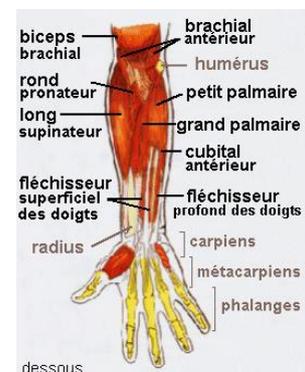


figure 32

L'analyse de la position des réflecteurs infrarouges montre des vibrations durant des durées courtes.

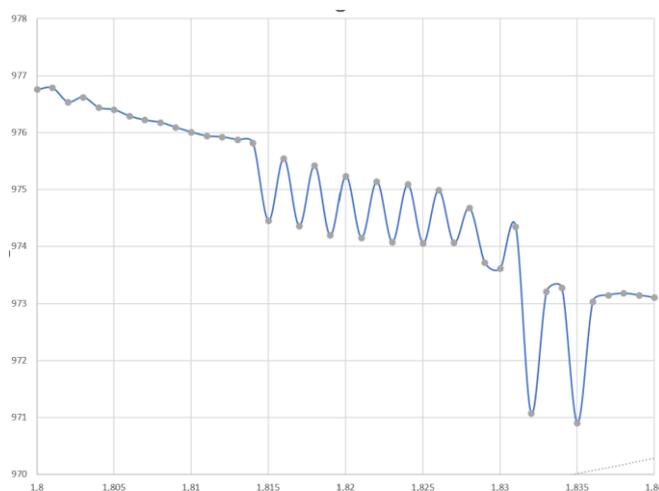


Figure 33 : réponse issue d'un reflecteur infrarouges

Voici par exemple la coordonnée verticale (z) de la vibration du réflecteur placé sur le poignet en fonction du temps. On observe temporairement une vibration à une fréquence d'environ 500 Hz, ce qui peut difficilement être une coïncidence. Et pourtant, nous avons des doutes sur le fait que le signal obtenu soit bien issu de la vibration de la raquette.

En effet, la période de ces vibrations est très irrégulière au cours du temps. D'autre part, pourquoi la vibration apparaîtrait quelques centièmes de milliseconde après l'impact avec la balle et non pas immédiatement ? Par ailleurs, l'amplitude de ces vibrations est de l'ordre du millimètre, puis apparaît une vibration plus lente de plus grande amplitude... Une analyse spectrale de ce fichier ne fait en outre pas ressortir une fréquence de vibration de l'ordre de 500 Hz. Bref, l'analyse des différents fichiers nécessite une attention très précise, et nous pourrions communiquer les résultats issus de cette étude prochainement.

Concernant les mesures réalisées par les capteurs électromyographiques, l'analyse est encore plus complexe. Voici un exemple de signal obtenu lors de l'impact de la balle :

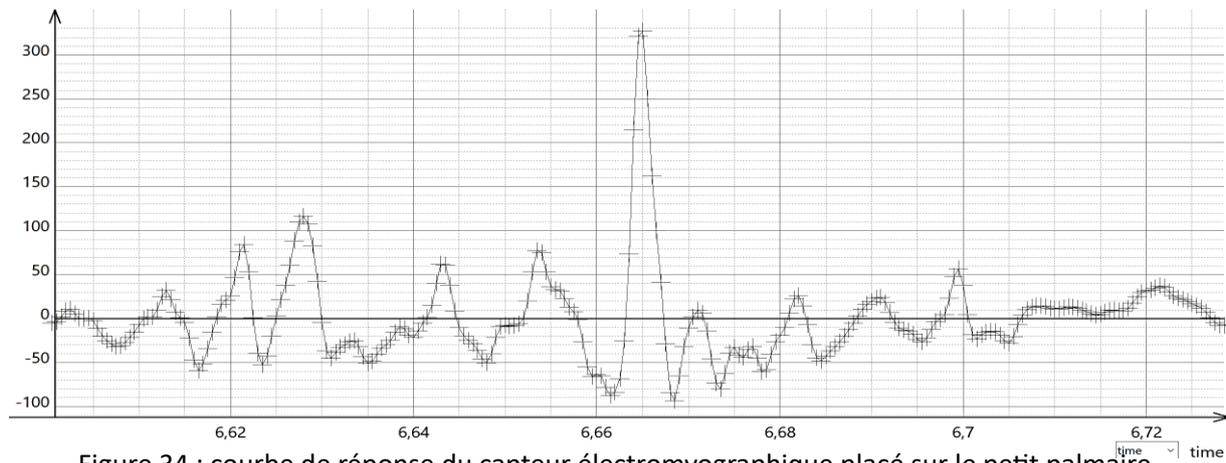


Figure 34 : courbe de réponse du capteur électromyographique placé sur le petit palmaire

La fréquence d'échantillonnage est 2000 Hz. Malgré cela, une vibration des muscles à cette fréquence n'est pas perceptible. Voici ce que donne une analyse spectrale du signal ci-dessus :

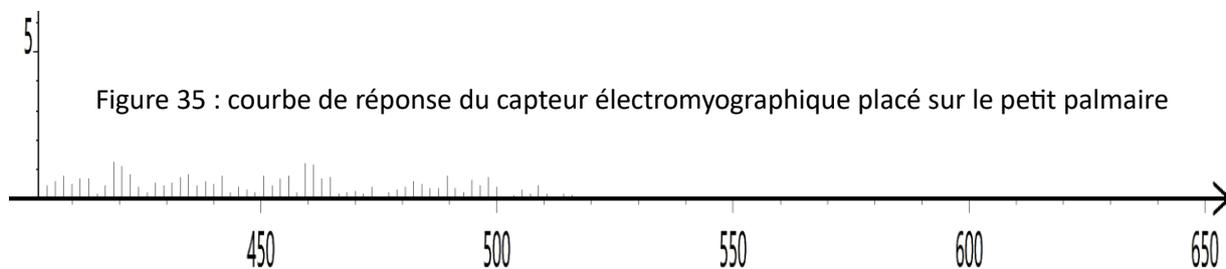


Figure 35 : courbe de réponse du capteur électromyographique placé sur le petit palmaire

Nous devons faire un travail d'analyse sur l'ensemble de nos 20 fichiers réalisés pour envisager des conclusions sérieuses, que nous pourrions vous présenter, on l'espère, dans un avenir assez proche.

V – Mode d'action de l'anti-vibrateur

1) Où placer l'anti-vibrateur pour qu'il soit efficace ?

Il est courant de disposer l'anti-vibrateur en bas du tamis, à la verticale du manche. Nous avons voulu savoir s'il s'agissait de la meilleure position pour atténuer les vibrations au niveau du manche. Pour cela, nous avons réutilisé le dispositif expérimental présenté dans le paragraphe IV – 1) : nous avons cherché expérimentalement, la ou les positions auxquelles devaient se trouver l'anti-vibrateur pour que la corde de guitare vibre le moins possible. La zone est clairement en bas du tamis, à la verticale du manche de la raquette. Nous pensons que l'anti-vibrateur devait se positionner à cet endroit pour éviter que la balle ne le percute, mais non. Cette position correspond bien à un emplacement qui permet de diminuer les vibrations au niveau du manche. Nous avons mesuré que l'atténuation de la

vibration de la corde de guitare était 15 fois plus grande en positionnant l'anti-vibrateur dans la zone identifiée sur la figure ci-dessous (rectangle rouge) qu'en le positionnant au centre du tamis.

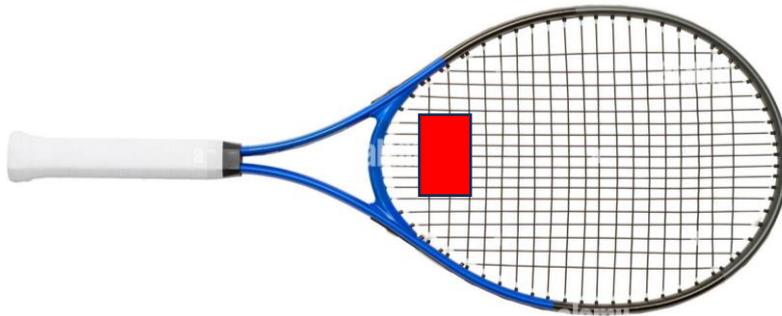


Figure 36 : en rouge, zone dans laquelle l'anti vibrateur est le plus efficace

Cette expérience semble confirmer qu'il s'agit bien d'ondes stationnaires à l'origine de la vibration de la raquette. En effet, le point stratégique auquel on place l'anti-vibrateur doit correspondre à un ventre de vibration. Ainsi en disposant l'anti-vibrateur à l'endroit où la raquette veut le plus vibrer, on ajoute une contrainte qui justement va diminuer la vibration de la raquette. De la même manière, le centre du tamis correspondrait à un nœud de vibration, de sorte qu'en disposant l'anti-vibrateur à cet endroit-là, cela ne modifie rien sur la vibration de la raquette, puisqu'en un nœud de vibration, il n'y a pas de vibration.

Nous avons tenté de vérifier cette interprétation en réalisant une autre série d'expériences, plus visuelles que quantitatives : nous avons disposé une balle de ping pong sur le manche de la raquette, et nous avons disposé la membrane vibrante sur le cordage pour rechercher la fréquence de vibration de la raquette dans un premier temps en faisant un balayage en fréquence autour de 500 Hz (lien vers la vidéo de l'expérience : <https://youtu.be/gqk845WdpFs>). Puis, une fois la fréquence de résonance trouvée, nous avons fixé la fréquence de la membrane vibrante à cette valeur, et nous avons positionné la membrane vibrante à différents endroits sur le cordage.

Nous avons constaté que les positions de la membrane conduisant à une grande vibration du manche correspondaient aux ventres de vibrations du cordage, ce qui est tout à fait cohérent avec notre interprétation précédente. Nous avons ainsi pu visualiser les positions de la membrane vibrante conduisant à une vibration importante de la balle, donc du manche.

Pour finir sur ce paragraphe, comme nos connaissances commençaient à s'affiner très sérieusement au sujet de la vibration de la raquette, nous avons pu faire des recherches documentaires plus précises et nous avons pu ainsi prendre connaissance d'un article scientifique [1] qui corrobore totalement notre perception quant à la physique qui explique la vibration de la raquette.

Dans cet article, il est bien indiqué que des études ont montré que les raquettes vibrent selon plusieurs modes :

Des modes dans lesquels la raquette vibre dans un plan perpendiculaire au plan de la raquette, ainsi que des modes de vibration dans le plan de la raquette. Plus intéressant encore, l'article mentionne la présence de ventres et de nœuds de vibration en très bonne adéquation avec nos résultats expérimentaux.

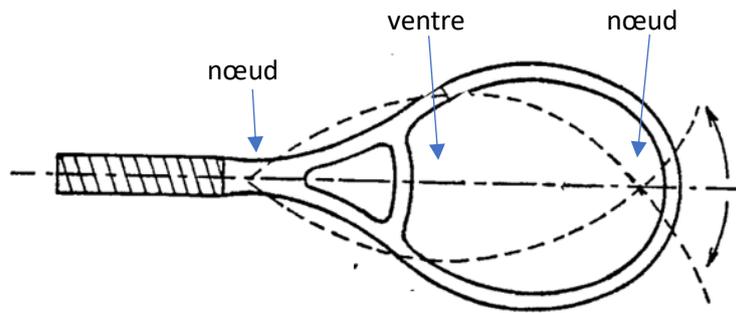


Figure 37 : Nœud et ventre de vibrations lors de la vibration de la raquette dans le plan de la raquette – Schéma issu de la publication [1]

En pointillé est représentée la déformation du cadre de la raquette dans le plan de la raquette. On y voit en particulier 2 nœuds et 1 ventre.

Il reste maintenant à préciser davantage le mode d'action de l'anti-vibrateur. En effet, on sait qu'il ajoute une contrainte au niveau d'un ventre de vibration. Mais quelle est la nature de cette contrainte ?

2) Quelle est la nature de la contrainte imposée par l'anti-vibrateur au niveau du ventre ?

Nous avons déposé une simple masse équivalente à celle d'un anti-vibrateur au niveau du ventre de vibration et nous avons fait vibrer la raquette avec la membrane vibrante. Nous n'avons pas observé de diminution des vibrations au niveau du manche. La contrainte n'est donc pas le fait de déposer une simple masse au niveau du ventre de vibration. Et de toute façon, si c'était le fait d'une masse, son action varierait en fonction de l'orientation du plan de la raquette par rapport au champ de gravité, ce qui ne serait vraiment pas pratique...

a - Est-ce que le caractère malléable de l'anti-vibrateur est important ?

Pour répondre à cette question, nous avons fabriqué nous-mêmes des anti-vibrateurs, à l'aide d'une imprimante 3D, dans un matériau particulièrement rigide.



Figure 38 : anti vibrateur confectionné au lycée

Nous les avons alors testés à l'aide du dispositif expérimental décrit dans le paragraphe IV – 1). Les résultats ont montré une diminution quasi inexistante des vibrations. Mis à part le fait que nous ne pouvons pas envisager de faire fortune à l'aide de nos anti-vibrateurs, ces résultats expérimentaux semblent donc confirmer l'importance du caractère malléable.

b – Pourquoi le caractère déformable de l'anti-vibrateur peut-il être important ?

Nous nous sommes alors dit que si le caractère malléable est important, c'est que l'anti-vibrateur doit subir des déformations lorsque le cordage vibre, et que ces déformations traduisent une absorption des vibrations par l'anti-vibrateur. Dans ce cas-là, on peut s'attendre à ce que cette déformation conduise à une élévation de la température de l'anti-vibrateur car au cours de sa déformation, des phénomènes de frottements internes à l'anti-vibrateur peuvent causer cette élévation de température. Si oui, est-elle mesurable ?

Quelle énergie faut-il apporter pour que la température de l'anti-vibrateur s'élève de 1°C ?

Pour le savoir, nous avons mesuré la capacité thermique C_a de l'anti-vibrateur par calorimétrie.

Pour cela, nous avons plongé 5 anti-vibrateurs, initialement à une température de $T_a = -20^\circ\text{C}$, que nous avons préalablement pesé ($m_a = 13,46 \text{ g}$), dans un calorimètre dont nous avons préalablement mesuré la capacité thermique ($C = 133 \text{ J/K}$) et contenant une masse $m_e = 0,10 \text{ kg}$ d'eau à une température initiale ambiante $T_1 = 19,4^\circ\text{C}$. Après avoir plongé les anti-vibrateurs dans le calorimètre, la température finale atteinte dans le calorimètre est $T_f = 17,9^\circ\text{C}$.

$$C_a = \frac{C(T_f - T_1) + m \times C_{eau}(T_f - T_1)}{5 \times (T_a - T_f)} \approx 3 \text{ J/K}$$

La capacité thermique d'un anti-vibrateur étudié est donc d'environ 3J/K. Comme un anti-vibrateur a une masse de 2,7g, cela correspond à une chaleur massique d'environ $200 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$

(Remarque : Nous avons comparé cette valeur à des valeurs tabulées et il s'avère que l'anti-vibrateur n'est pas en caoutchouc car le caoutchouc a une chaleur massique bien plus élevée. Il serait plutôt en silicone.)

La valeur de la capacité thermique d'un anti-vibrateur nous indique donc qu'il faut lui fournir une énergie de 3J pour que sa température augmente de 1°C.

Nous pensons alors pouvoir observer cette élévation de température, à condition de déformer l'anti-vibrateur un grand nombre de fois.

Pour cela, nous avons positionné l'anti-vibrateur sur le cordage de la raquette, et nous avons déposé la membrane vibrante sur le cordage. Nous l'avons alors faite vibrer pendant une longue durée... pendant 1h.

Résultat ? La température de l'anti-vibrateur n'a pas augmenté d'un seul dixième de degré. Le mode d'action de l'anti-vibrateur ne semble donc pas reposer sur ses caractéristiques en termes de malléabilité.

c – Est-ce que la masse de l'anti-vibrateur est importante ?

Comme à ce stade du projet, nous avons des hypothèses difficilement vérifiables dans un temps court, nous avons contacté l'entreprise française Babolat, qui fabrique aussi bien des raquettes que des anti-vibrateurs. Nous avons pu nous entretenir avec monsieur Triquigneaux, ingénieur et responsable recherche et développement au sein de cette entreprise.

Lors de cet entretien, nous avons eu l'immense plaisir de constater que nos recherches allaient dans le bon sens. L'équipe scientifique a par exemple utilisé des accéléromètres pour mesurer la vibration de la raquette avec et sans anti-vibrateur. Monsieur Triquigneaux a par ailleurs confirmé la présence des différents modes de vibration de la raquette, tout en précisant la complexité de cela du fait qu'il y a sûrement des couplages entre ces modes de vibration. Il a également confirmé que le caractère malléable de l'anti-vibrateur était davantage présent pour assurer un frottement important avec le cordage : la surface de contact entre le cordage et l'anti-vibrateur peut ainsi être plus importante si l'anti-vibrateur est déformable que s'il est rigide.

Enfin, Monsieur Triquigneaux a attiré notre attention sur la masse de l'anti-vibrateur. Suite à l'entretien que nous avons alors eu, nous avons mesuré la masse de l'anti-vibrateur : il pèse environ 3 g. Cela nous a semblé faible par rapport à la raquette. Mais qu'en est-il par rapport au cordage ?

Pour répondre à cette question, nous avons tout simplement enlevé le cordage d'une raquette que nous possédions, et nous avons pu mesurer que la masse du cordage fait 20g. On constate donc que la

masse de l'anti-vibrateur n'est pas du tout négligeable par rapport à celle du cordage. On prend alors conscience qu'au niveau du ventre de vibration, on dépose une masse qui peut empêcher, ou du moins atténuer l'amplitude de vibration du cordage.

Mieux que cela, certains anti-vibrateurs possèdent en leur centre une partie qui contient des billes en acier, et qu'on peut enlever ou remettre à sa guise. Nous avons alors envoyé un mail à Monsieur Triquigneaux pour lui faire part de cela, tout en demandant si la raison pour laquelle Babolat fabriquait des anti-vibrateurs modulables avait pour simple objectif de modifier la masse de l'anti-vibrateur. La réponse a été affirmative. En effet, enlever les vibrations de la raquette doit se faire avec précautions. En disposant un anti-vibrateur ayant une grande masse, on va fortement atténuer la vibration de la raquette, mais au détriment de la qualité de réponse de la raquette au moment de l'impact avec la balle. Avoir un anti-vibrateur modulable en masse permet au joueur de l'adapter à son ressenti.

Conclusion et perspectives :

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. Cela dit, notre entretien avec monsieur Triquigneaux nous a permis de nous rendre compte de la complexité d'évaluer les anti-vibrateurs : pour y parvenir, l'équipe scientifique de Babolat a formé un ensemble de très bons joueurs de tennis au ressenti perçu lors de l'utilisation d'un anti-vibrateur. Et les résultats peuvent alors paraître surprenant : alors que les mesures avec du matériel scientifique peuvent ne pas classer de la même manière différents anti-vibrateurs, les avis donnés par les joueurs formés sont quant à eux unanimes sur ce classement.

Pour aller dans ce sens, nous avons à nouveau contacté Tony Monnet pour réaliser de nouvelles mesures, en suivant un protocole différent : Pour tester l'efficacité des anti-vibrateur, nous proposons de jouer au tennis pendant une durée de 10 minutes, en faisant toujours et uniquement le même geste, par exemple un coup droit. Puis nous équipons le bras de capteurs électromyographiques et refaisons un coup droit au laboratoire pour voir la réponse du muscle. Le lendemain, après avoir laissé reposer le bras, nous recommençons l'expérience avec cette fois-ci la même raquette, mais équipée de l'anti-vibrateur. C'est une perspective que nous souhaitons donner à notre projet.

En attendant cela, grâce à une démarche expérimentale, nous avons pu en savoir plus sur la vibration de la raquette, et notamment ses modes de vibration selon des ondes stationnaires. Concernant les modes dans le plan de la raquette, nous n'avons abordé que le mode fondamental de vibration. Mais les lectures nous ont permis de voir qu'un deuxième mode de vibration est bien présent dans le plan de la raquette. Les ventres sont alors au milieu du tamis et en haut du manche. On peut alors imaginer qu'en disposant un matériau au niveau du ventre de vibration en haut du manche, il doit être possible d'atténuer ce deuxième mode de vibration. Nos échanges avec monsieur Triquigneaux le confirment car il nous a appris que Babolat a en effet développé une raquette avec une bande élastomère à l'interface tamis / manche pour éliminer ce deuxième mode de vibration. Nous essayerons de notre côté de voir si nous pouvons modifier l'intérieur du manche pour aboutir à un résultat similaire.

Webographie : [1] : [Raquette de tennis - European Patent Office - EP 0275805 B1 \(storage.googleapis.com\)](https://storage.googleapis.com)