**INTRODUCTION (294 mots)**

La musique est un art qui sert à partager nos émotions et nos idées au public. Par contre, Victor Hugo soulève que « la musique, c’est du bruit qui pense. » Cette citation démontre que non seulement la musique est un art, mais aussi elle fait partie des mathématiques et de la physique. On remarque que plusieurs lois et théories peuvent prouver la relation entre ces domaines. Par exemple, quand on veut trouver une fréquence quelconque d’une note après avoir frotté la corde d’un alto, on peut la calculer en trouvant la longueur de la corde, la masse de celle-ci, etc.

Cependant, la personne qui joue l’alto pourrait aussi influencer le son des cordes. En tant que musicien, même s’il ne fait pas de calculs pour trouver la fréquence fondamentale ou la tension de la corde, il est tout de même pertinent de comprendre les paramètres qui influencent la qualité du son de son instrument. Ce mémoire aura pour objectif d’analyser la qualité d’un son selon la force exercée sur l’archet et la vitesse de ce dernier. Pour cela, nous devons comprendre certains concepts qui portent sujet sur le son (ondes stationnaires, harmoniques, amplitudes, série de Fourier) et la relation entre l’archet et la corde frottée à l’aide de plusieurs schémas de forces. Ensuite, on se sert du microphone *Vernier* et du logiciel *Data Logger Pro* pour trouver les amplitudes relatives des harmoniques en fonction du temps. Finalement, on compare les amplitudes pour chaque expérience différente (tirer en 2s, tirer en 6s, pousser en 2s) afin d’observer le volume du son.

L’hypothèse serait que les amplitudes relatives des harmoniques seront plus petites si la vitesse de l’archet est lente. Ces dernières seront par contre plus grandes lorsqu’on tire l’archet au lieu de le pousser.

**CONTEXTE THÉORIQUE (1385 mots)**

**Les ondes stationnaires résonantes**

Si on produit une impulsion en crête sur une corde qui est fixée au mur, on remarque que l’impulsion est inversée et réfléchie (un creux) à cause d’une réflexion dure de l’onde à l’extrémité. Autrement dit, par action-réaction, le mur pousse sur la corde. Suite à cela, si notre main fait un mouvement harmonique simple à la corde, une série de crêtes et de creux voyagent dans un sens (onde incidente) et une autre série voyagent dans l’autre sens (onde réfléchie), ce qui occasionne une onde stationnaire résonante. Dans une onde stationnaire, les nœuds représentent les zéros de la fonction et les ventres sont les maxima et les minima de la fonction.

En effet, quand on frotte la corde, il a l’existence d’ondes transversales, car l’oscillation se fait selon l’axe des y (vertical). Cependant, le son qu’on entend est une onde longitudinale, c’est-à-dire que l’onde se propage selon l’axe des x (horizontal) et c’est grâce à ce type d’ondes qu’on peut entendre la note jouée. Un son ou une onde sonore est « un mouvement ordonné de molécules dû à un corps en mouvement rapide. » C’est des fluctuations périodiques où la pression locale augmente et diminue (compression de l’air et raréfaction de l’air). Sans l’air, nous ne pouvons rien entendre. En fait, quand on trace un graphique de l’amplitude du son en fonction de la fréquence (spectre), l’amplitude indique le volume du son (fort ou doux), tandis que la fréquence indique le nombre d’oscillations dans une période de temps. Autrement dit, la hauteur du son (grave ou aigu). Ces valeurs seront pertinentes pour ce mémoire étant donné que l’analyse porte sur l’amplitude du son et les harmoniques.

**Les harmoniques**

Dans ce mémoire, la corde d’alto est fixée aux deux extrémités, une condition limite qui détermine les possibilités de fréquences produites et chaque extrémité représente un nœud. Une onde stationnaire résonante peut seulement produire lorsque « la longueur de la corde est un multiple entier de la demi-longueur d’onde. » Lorsqu’un musicien frotte la corde de do d’un alto avec l’archet, on remarque que la plus basse note est Do2 (130,81 Hz) et que la longueur de la corde correspond à la moitié de la longueur d’onde. On appelle cela la fréquence fondamentale (premier harmonique). Par contre, si la corde est égale à la longueur d’onde, la fréquence est plus élevée et on obtient le deuxième harmonique. Dans ce cas-ci, il y a trois nœuds incluant celui qui est ajouté au centre de la corde. Bref, plus il y a de nœuds, plus le son est aigu. On dit qu’un harmonique est « une composante spectrale dont la fréquence est un multiple entier d’une fréquence de base […] », c’est-à-dire que l’écart entre deux harmoniques sera toujours identique.

En fait, en modifiant la formule précédente, à l’aide de la longueur de la corde (), la tension () et la densité linéique de la corde (), on peut repérer les différentes fréquences d’un son quelconque dépendant de la valeur de qui indique les modes d’harmoniques.

**La transformation de Fourier**

Cependant, même si on joue la note de do sur la corde, on ne voit pas la forme exacte représentée à la figure 2. Il est important de distinguer un son pur et un son riche. Lorsqu’on enregistre un son d’un diapason à 440 Hz, on remarque qu’il y aura une fonction sinusoïdale dans un graphique du déplacement vertical (y) en fonction du temps où la période sera 1/440 seconde étant donné que la période est le quotient de 1 par la fréquence. En outre, sachant que le diapason émet une seule fréquence, dans le spectre, on verra une barre lorsque l’abscisse vaut 440 Hz. Il s’agit d’une fréquence fondamentale et ceci est un son pur. Par contre, quand on frotte la corde ou quand on chante une note, celle-ci est composée de plusieurs harmoniques. Le son deviendra riche, car il existera d’autres fréquences qui auront des amplitudes plus petites que la fondamentale. On les appelle des harmoniques. Donc, la fonction n’aura pas une forme sinusoïdale, mais elle demeurera périodique. En fait, c’est une superposition de plusieurs fonctions sinusoïdales différentes.

La transformation de Fourier nous permet de calculer les amplitudes des harmoniques. Nous devons nous servir du logiciel *Data Logger Pro* pour recueillir des graphiques de l’amplitude relative en fonction de la fréquence (spectre). Ces types de graphiques sont appelés « Graphique TFR » signifiant « Transformation Fourier Rapide ». Sachant qu’un son d’une corde de l’alto possède plusieurs harmoniques différents, la transformation de Fourier nous permet de montrer tous les harmoniques présents à partir du graphique de la pression en fonction du temps. La formule suivante montre que la fonction du son produit équivaut à la somme de chaque fréquence d’un harmonique :

Où :

: terme constant

: coefficients

n : nombre d’harmonique

 : fréquence angulaire (rad/s)

t : temps (s)

Sachant que ce mémoire étudie plutôt la force exercée de l’archet et la vitesse de ce dernier, peu importe comment on varie ces deux variables étudiées, la fréquence demeure toujours la même pour une corde. La fréquence n’est pas la même si nous tenons compte des quatre cordes d’alto. Cependant, l’amplitude des harmoniques sera différente sachant qu’on emploie les forces sur l’archet différemment.

**Caractéristiques de l’alto et de l’archet**

L’alto est un instrument qui fait partie de la famille des cordes frottées. Il est souvent confondu avec le violon sachant qu’il a une taille similaire à ce dernier. En fait, « l’alto est légèrement plus grand que le violon […] en moyenne 67 centimètres, dont 40 pour la caisse […] » et il projette un son beaucoup plus grave. Il possède quatre cordes différentes : do, sol, ré et la dont les trois dernières cordes font partie aussi du violon.

L’archet est un morceau de bois avec une mèche de crins de cheval qui sert à frotter une corde. En outre, la colophane (produit de résine de pin) doit être employée sur les crins de l’archet afin d’avoir plus d’adhérence lorsqu’il est temps de frotter la corde.

**Les interactions entre l’archet et la corde frottée**

Dans ce mémoire, il est important de comprendre que le terme « tirer » indique qu’on met d’abord l’archet en contact avec la corde près du talon comme dans la figure ci-bas. Le terme « pousser » indique le contraire, c’est-à-dire que la pointe met en contact avec la corde en premier.

Quand on frotte la corde avec l’archet, on remarque qu’il y a de la friction entre les deux grâce à la colophane. Le schéma des forces montre toutes les forces qui peuvent influencer le mouvement de l’archet. Évidemment, la force gravitationnelle et la normale sont présentes lorsqu’on tire ou pousse l’archet sur la corde. Il y a aussi la force de l’archet émise par le musicien et le frottement cinétique lorsque l’archet est en mouvement. Le frottement dépend de la colophane, des crins de l’archet ainsi que le matériel de la corde. De plus, les forces de tension venant des deux extrémités fixées de la corde d’alto et la force de la main qui écrase la corde.

Sachant qu’on tire l’archet, on applique plus de forces sur la corde étant donné que notre main est plus proche de la corde que si on pousse l’archet. Par conséquent, on déforme davantage la corde par rapport à l’équilibre et elle oscillera avec une plus grande amplitude. De plus, nous savons que l’énergie est proportionnelle au carré de l’amplitude et c’est l’énergie de la corde oscillante qui est transmise aux molécules d’air environnante. Les molécules d’air vont osciller, ce qui crée le son qu’on entend. Il est difficile d’étudier l’intensité du son avec l’énergie, donc en connaissant la relation entre l’amplitude et l’énergie, on se sert des amplitudes relatives des harmoniques afin de voir en quoi la grandeur du son est influencée dépendant de la force exercée sur l’archet ainsi que la vitesse de celui-ci.

En ce qui concerne de la vitesse de l’archet, il y a une limite quant aux oscillations de la corde d’alto, mais on peut quand même déterminer l’intensité du son à partir de différentes vitesses. Si on tire l’archet avec une vitesse rapide, les oscillations de la corde seraient beaucoup plus grandes (mouvement brusque) que si on tire l’archet avec une vitesse lente. Donc, les particules d’air ont plus d’agitation, ce qui explique pourquoi le son est plus fort lorsqu’on tire l’archet avec une grande vitesse.

**MÉTHODOLOGIE (627 mots)**

**Les variables indépendantes, dépendantes et contrôlées**

Il n’est pas possible de façon simple pour nous de quantifier la force exercée sur l’archet, donc afin de trouver la relation entre la force exercée sur l’archet et la grandeur du son, on suppose que tirer l’archet signifie que la force exercée sur l’archet est plus grande, tandis que cette dernière est plus faible lorsqu’on pousse l’archet. Dans ce mémoire, la vitesse de l’archet et le sens du mouvement de l’archet sont deux variables indépendantes qui vont influencer les amplitudes relatives des harmoniques (variables dépendantes). On se sert d’un alto *Conte de Salabue* de 16,5 pouces lequel possède une corde *Dominant* de do et des cordes *Prélude* de sol, de ré et de la, ainsi que d’un archet. On commence par mesurer nos variables contrôlées en trouvant la longueur des cordes à l’aide d’une règle à couturière à 152 cm (graduée en millimètres) et la masse de celles-ci avec une balance numérique précise à 0,001 g. Les masses fendues de 1,5 kg précises à 2% ajoutés sur un point d’ancrage accroché à la corde permettent de déterminer la tension de la corde. Remarquez que la tension de la corde représente le poids de la masse des masses fendues et du point d’ancrage. La tension et la longueur de la corde sont les variables contrôlées à l’exception de la nature des quatre cordes. Lors des comparaisons des amplitudes des harmoniques des quatre cordes, la nature de celles-ci aura un impact.

**Le montage**

**Comme dans la figure ci-bas**, les œillets doivent être insérés dans les extrémités de chaque corde pour qu’on puisse l’accrocher à un banc gradué (environ 70 cm) avec une poulie à l’extrémité (une à la partie noire au milieu du banc et l’autre dans le point d’ancrage). On dépose ensuite l’isolateur en bois avec un micro *Vernier* dans le trou d’isolateur sur la corde pour éliminer le bruit. Le micro est attaché à une interface *LabQuest* et le logiciel *Data Logger Pro* doit être allumer pour trouver les amplitudes relatives en fonction de la fréquence.

**Les graphiques d’amplitude relative selon la fréquence**

Pour trouver la vitesse de chaque mouvement, on met deux rubans adhésifs à une distance de (46,2 ± 0,1) cm sur l’archet et les lentilles de la caméra doivent être en face du banc gradué et de la règle à 46 cm collée sur le mur et placée perpendiculairement au banc gradué. Quand tout est prêt, on appuie sur *Enregistrer* dans le logiciel *Data Logger Pro,* on filme et on démarre le chronomètre. Pour la corde do, la première expérience est de tirer l’archet en 2 secondes. La deuxième est en 6 secondes et la dernière est de pousser l’archet en 2 secondes. Pour chaque expérience différente, on enregistre le graphique d’amplitude relative selon la fréquence et on ouvre un nouveau document puis on poursuit avec la prochaine expérience. On compare d’abord les amplitudes en fonction de la vitesse pour le même sens de l’archet puis on compare, à vitesse constante, l’effet de pousser ou de tirer sur les amplitudes. Autrement dit, on compare l’expérience 1 à 2 et l’expérience 1 à 3. On reprend chacune des trois expériences avec les trois autres cordes. Ensuite, on se sert du logiciel *Tracker* et de la vidéo que nous avons filmée afin de calculer la vitesse après avoir calibré l’image. L’archet commence du premier ruban jusqu’à l’autre bout et vice-versa. ***À noter que le frottement de l’archet n’est pas étudié dans ce mémoire sachant qu’il n’est pas simple de l’évaluer en analysant la nature de l’archet ainsi que la colophane.***

**Les données pour l’analyse**

*Data Logger Pro* nous fournit, pour chaque expérience, un tableau du temps, de la fréquence et de l’amplitude relative pour un intervalle de temps à 0,0001s et un graphique de pression en fonction du temps. Il faut le changer en « FFT Graph » pour obtenir les amplitudes relatives selon leurs fréquences. Étant donné que le mémoire porte sur la qualité du son, nous allons focaliser plutôt sur les amplitudes relatives et le temps.

**RÉSULTATS**

**Tableaux**

Tableau 1. Amplitudes des harmoniques avec la plus grande intensité selon le temps et le numéro d’harmonique pour les quatre cordes d’alto

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | **Expérience 1** | **Expérience 2** | **Expérience 3** |
| Corde de do | *t* max (s) | 0.1136 | 0.4511 | 0.0856 |
| A max (± 0.000001 ua) | 0.180303 | 0.035447 | 0.154052 |
| n max | 4 | 4 | 3 |
| Corde de sol | *t* max (s) | 0.1077 | 0.7062 | 0.1058 |
| A max (± 0.000001 ua) | 0.259659 | 0.112364 | 0.857626 |
| n max | 3 | 5 | 3 |
| Corde de ré | *t* max (s) | 0.2152 | 0.4290 | 0.1578 |
| A max (± 0.000001 ua) | 0.564918 | 0.119681 | 1.071438 |
| n max | 4 | 2 | 3 |
| Corde de la | *t* max (s) | 0.1782 | 0.3554 | 0.0891 |
| A max (± 0.000001 ua) | 0.160144 | 0.055670 | 0.182173 |
| n max | 2 | 1 | 1 |

Tableau 2. Rapport des amplitudes pour les quatre cordes d’alto

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | A2max/A1max | A3max/A1max |
| Corde de do | 0.196599 ± 0.000007 | 0.854402 ± 0.000010 |
| Corde de sol | 0.432737 ± 0.000006 | 3.302897 ± 0.000017 |
| Corde de ré | 0.211856 ± 0.000002 | 1.896626 ± 0.000005 |
| Corde de la | 0.347627 ± 0.000008 | 1.137555 ± 0.000013 |

:Temps de l’harmonique avec la plus grande amplitude

: Amplitude de l’harmonique avec la plus grande amplitude (archet tiré à une vitesse rapide)

: Amplitude de l’harmonique avec la plus grande amplitude (archet tiré à une vitesse lente)

: Amplitude de l’harmonique avec la plus grande amplitude (archet poussé à une vitesse rapide)

:Numéro de l’harmonique avec la plus grande amplitude

Tableau 3. Moyenne des vitesses de l’archet sur les quatre cordes d’alto

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | **Valeur** | **∆ Totale** |
| Vitesse rapide (Tiré) (cm/s) | 19.42 | 0.03 |
| Vitesse lente (Tiré) (cm/s) | 10.66 | 0.02 |
| Vitesse rapide (Poussé) (cm/s) | 18.23 | 0.02 |

**Graphiques**

**[…]**

**DISCUSSION**

Les graphiques 1 à 12 nous permettent de voir tous les harmoniques présents et de repérer ceux qui ont la plus grande amplitude. Chaque point d’un graphique représente le numéro d’harmonique. Par exemple, si on se fie au graphique 1, on remarque que le quatrième point a la plus grande amplitude (0,180303 ± 0,000001), c’est-à-dire que le quatrième harmonique sonne le plus fort parmi les harmoniques relatives d’une note jouée. L’échelle du temps est différente pour celui du milieu à cause du temps alloué au musicien de jouer la note. Sachant que les expériences 1 à 3 sont plus courtes (approximativement deux secondes) que l’expérience 2 (six secondes), l’échelle du temps des graphiques 1 et 3 (bond de 0,1 seconde) est différente que le graphique 2 (bond de 0,5 seconde). Même principe qu’on applique aux trois autres cordes d’alto.

D’après nos données, on constate que lorsqu’on tire l’archet avec une plus grande vitesse, les amplitudes relatives des harmoniques sont beaucoup plus élevées que celles où l’archet est tiré avec une vitesse plus lente. Par contre, quand on pousse l’archet les amplitudes relatives sont plus grandes que celles où l’archet est tiré à une vitesse à peu près semblable. Ces données infirment en partie notre hypothèse sachant que nous avons soutenu que les amplitudes seront plus fortes lorsqu’on tire l’archet. On remarque que la corde de do est la seule corde qui confirme l’hypothèse (0.180303 > 0.154052).

**Vitesse de l’archet**

Dans le tableau 2, le ratio entre et est de 0,196599 ± 0,000007; 0,432737 ± 0,000006; 0,211856 ± 0,000002 et 0,347627 ± 0,000008 pour les cordes de do, de sol, de ré et de la. Une amplitude dite « maximale » indique l’harmonique qui a la plus grande amplitude pour chaque graphique. Avec les données recueillies et les graphiques, on constate que pour toutes les cordes, le son est beaucoup plus fort lorsqu’on frotte la corde avec une vitesse plus rapide comparée à une vitesse lente. Ainsi, quand on tire l’archet, le mouvement commence par la main qui se trouve juste au-dessus de la corde. Par conséquent, la main ajoutera plus de poids sur la corde et quand il est temps de la frotter, le son sera plus fort que si on commence le mouvement de l’archet par la pointe. Remarquez que la vitesse indique celle pour un seul coup d’archet.

Si on met en application ce que nous avons obtenu comme données, en tant que musicien, il est important de mettre l’accent sur l’interaction entre l’archet, la corde et la vitesse avec laquelle le musicien joue. Par exemple, quand l’altiste interprète une pièce lente, il faut donc mettre plus de pression sur la corde en appuyant davantage sur l’archet, sinon le son ne sera pas assez fort. Par contre, le musicien doit quand même avoir une vitesse assez stable pour créer un son riche et rond dans le but d’éviter un bruit de crin. Quant à une pièce rapide, le musicien doit moins peser sur l’archet et doit faire des mouvements vifs et courts et le son demeure fort à cause de la rapidité du mouvement, ce qui explique pourquoi le 2e graphique de la corde de do possède une fonction plus « aplatie » lorsqu’on le compare au 1er graphique de la même corde. Cette constatation demeure la même pour les trois autres cordes. De plus, quand on parle de la richesse du son, quand on tire l’archet avec une vitesse rapide, on remarque que dans les graphiques 1, 4, 7 et 10, plusieurs pics sont prononcés, c’est-à-dire que plusieurs harmoniques sont présents dans le son. Par contre, en les comparant aux graphiques 2, 5, 8 et 11, les fonctions de ces derniers sont plutôt « linéaires », donc on peut dire que le son est beaucoup riche si on tire l’archet rapidement. C’est pour cela que plusieurs musiciens ont l’intuition de faire du vibrato lorsqu’ils jouent des longues notes. Le vibrato est une « légère ondulation du son produite sur les instruments de musique ». En vibrant la corde, la fréquence change un peu, ce qui crée un son beaucoup plus riche et chaleureux. En musique, on soulève toujours comme idée qu’une pièce lente est plus compliquée à interpréter qu’une pièce rapide, ce qui n’est pas un présupposé faux d’après nos données recueillies.

<https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/vibrato_vibratos/81802>

**Force exercée sur l’archet**

Les données du ratio entre et est de 0,854402 ± 0,000010; 3,302897 ± 0,000017; 1,896626 ± 0,000005; 1,137555 ± 0,000013 pour les cordes de do, de sol, de ré et de la. On constate que si on pousse ou on tire l’archet pour une vitesse approximativement similaire, en comparant les trois différentes amplitudes (, et ), on remarque que le son est plus fort lorsqu’on pousse l’archet à un court laps de temps ( > ). Ceci infirme notre hypothèse sachant qu’on a soutenu que le son sera plus fort si on tire l’archet en raison du poids de la main qui « écrase » la corde. Seule la corde de do qui confirme l’hypothèse sachant que son rapport entreet est inférieur à 1.

Logiquement, si on part de la pointe de l’archet, notre main s’éloigne de la corde, donc on s’attend que les amplitudes relatives soient moins élevées que celles où on tire la corde. Ce phénomène peut être expliqué à travers un schéma de forces. On réalise que la main écrase la corde lorsqu’on tire l’archet, donc la force extérieure possède non seulement une composante en *z*, mais aussi une composante en *y*.

Par contre, on découvre que (3,302897 ± 0,000017) > (0,432737 ± 0,000006) pour la corde de sol, (1,896626 ± 0,000005) > (0,211856 ± 0,000002) pour la corde de ré ainsi que (1,137555 ± 0,000013) > (0,347627 ± 0,000008) pour la corde de la. Autrement dit, le est supérieure à , ce qui est le contraire de nos attentes. Plusieurs explications possibles pourraient démontrer ce phénomène. Il se peut que plusieurs causes d’erreurs aient influencé les données de nos expériences, mais il se peut qu’il existe un raisonnement derrière cela.

Certes, notre main s’éloigne de la corde, mais pour contrer ceci, il aurait fallu trouver un moyen de faire se déplacer l’archet autrement qu’en le tenant avec la main. Donc, ceux et celles qui jouent les instruments à cordes frottées ont l’intuition d’appuyer plus fort sur la pointe qu’au talon de l’archet. Avec la pratique, ils remarquent que le son devient de moins en moins fort lorsqu’on éloigne la main de la corde, donc afin de compenser cela, ils vont ajouter plus de forces même si l’archet se trouve à la pointe de la corde. Si on met tous cela en application, prenons comme exemple qu’une personne joue une seule note avec beaucoup d’intensité. Dans ce cas-ci, il pourrait tirer pour avoir le plus de son possible, mais supposons à la suite de cette note, le musicien doit jouer rapidement une série de notes sur la corde de ré avec un seul coup d’archet. On remarque que l’amplitude la plus élevée est à 0,0891 seconde lorsqu’on pousse l’archet, tandis que si on tire ce dernier, l’amplitude se trouve à 0,1782 seconde, quasiment deux fois plus longue que la donnée précédente. Un musicien ne peut pas remarquer cela, mais à l’aide de ces données, il serait idéal de pousser l’archet quand il est temps de jouer rapidement une série de notes avec un seul coup d’archet. Avec une force suffisante, le son sortira plus rapidement et plus clairement. Quand on pousse, la force sera assez pour créer un son net et précis et plus on approche du talon de l’archet, plus le son devient fort. C’est pour cela qu’en musique, les enseignants suggèrent de jouer un groupe de notes en poussant (clarté) et de jouer une note forte et brève en tirant (son fort).

**Répartition des amplitudes relatives des harmoniques**

Quand on regarde les spectres, logiquement, la fréquence fondamentale est l’harmonique où il y a la plus grande amplitude sachant que cette dernière correspond à la note que nous entendons. Autrement dit, le premier point de chaque graphique de ce mémoire doit correspondre au maximum de la fonction. Par contre, c’est seulement le cas pour la corde de la, car plus le son est aigu, plus les harmoniques sont difficiles à percevoir dans le *Data Logger Pro*. Les notes graves sont plus riches que les notes aiguës parce qu’on peut voir plusieurs harmoniques présents notamment les graphiques 1, 3, 4 et 6. Cela explique aussi la raison pour laquelle les amplitudes « maximales » des cordes graves n’appartiennent au premier mode d’harmonique à l’exception de la corde de la. En ce qui concerne des manipulations, plusieurs causes pourraient expliquer ce phénomène. Sachant qu’il est impossible de trouver les fréquences à l’écoute, il est nécessaire d’utiliser des outils comme le micro *Vernier* et l’isolateur en bois pour amplifier le son de la corde et pour minimiser le bruit. Cependant, cela pourrait être une « contrainte supplémentaire pour ce qui concerne le son, car toutes les fréquences ne seront pas amplifiées de la même façon. » Dans l’expérience, en enregistrant les mouvements de l’archet, on remarque qu’en frottant la corde, celle-ci pourrait toucher l’isolateur en bois, ce qui crée des sons aigus qui pourraient fausser nos résultats. En outre, on remarque par exemple pour la corde de do que la fréquence fondamentale est de 86,72 Hz (note de Fa2), mais l’harmonique ayant la plus grande amplitude est d’environ 346,45 Hz (note de Fa4). La majorité des manipulations a le même phénomène et on remarque que la fréquence et l’harmonique ayant la plus grande amplitude correspond à la même note, mais de registres différents. Bref, c’est avec la répartition des amplitudes relatives des harmoniques qu’on remarque que plusieurs causes d’erreurs peuvent influencer la performance de notre expérience.

<http://tpe.harmoniques.free.fr/Timbre.htm>

**Causes d’erreurs**

Plusieurs points doivent être améliorés dans cette expérience. Premièrement, un essai n’est pas assez pour justifier un propos. Par exemple, quand on compare les amplitudes relatives lorsqu’on tire ou on pousse l’archet, étant donné que c’est difficile de quantifier cela, on ne peut pas se fier uniquement à un seul graphique par test différent pour confirmer notre hypothèse. Deuxièmement, en ce qui concerne de la comparaison entre un mouvement tiré et poussé de l’archet, on peut dire que nos tests ne reflètent pas nécessairement la réalité. Quand on joue de l’alto, on fait un mouvement du haut en bas ou vice-versa. Cependant, sachant que la corde est installée sur un morceau de bois, le mouvement était de gauche à droite. En outre, le fait d’ôter la corde de l’alto influence aussi nos résultats, car nous n’avons pas tenu compte de la résonance dans la caisse de l’alto. La tension n’est pas la bonne étant donné que celle-ci ne représente la valeur de la tension de la corde fixée sur l’alto. Finalement, sachant que le frottement n’est pas tenu en compte dans ce mémoire, plusieurs résultats peuvent être influencés par ce facteur non étudié.

**Améliorations possibles**

Une des possibilités serait de faire trois essais par test différent afin de cerner l’incertitude due à la méthode utilisée. Par exemple, si on tire l’archet en 2 secondes et nous obtenons des données, nous pourrons faire cette action deux autres fois pour obtenir trois essais afin d’assurer que les données ne soient pas fausses. En ce qui concerne du mouvement de l’archet, on pourrait filmer un altiste faire un seul mouvement à un temps donné et ensuite analyser l’enregistrement sur Tracker afin d’obtenir des données plus réalistes. De plus, au lieu d’enlever la corde de l’alto, une solution possible est d’utiliser un microphone de contact. Certains microphones de contact ont une pince qui est aussi un micro qu’on pourrait la mettre sur le chevalet afin qu’on puisse jouer une corde qui se trouve sur l’alto. Finalement, au lieu d’utiliser le micro *Vernier*, il pourrait être utile de se servir d’un sonomètre pour qu’on puisse trouver l’intensité du son en dB au lieu d’une amplitude avec une unité arbitraire.

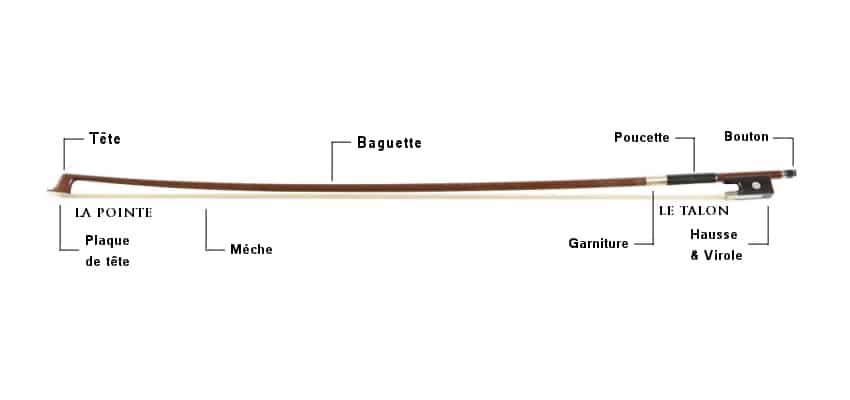
**CONCLUSION**

Somme toute, l’objectif est de voir l’influence des amplitudes relatives selon la force exercée sur l’archet et sa vitesse. On remarque que la qualité du son est définie par la présence des harmoniques; plus il y a d’harmoniques différents, plus le son est riche. Quant à la grandeur du son, on remarque que le ratio entre et possède une valeur plus grande que le ratio entre et . Si on prend la corde de ré, le premier ratio serait de 1,89663 ± 0,00005, tandis que le deuxième s’agit de 0,21186 ± 0.00002. Ces valeurs montrent que notre hypothèse est partiellement vraie. Il est vrai qu’en observant le schéma des forces, on remarque que l’amplitude « maximale » lorsqu’on tire l’archet à une vitesse longue est plus petite que si on tire ce dernier à une vitesse plus courte. Cependant, sachant que les musiciens sont conscients du fait que le son produit à la pointe est moins fort que celui du talon, ils mettront plus de pression à la tête de l’archet afin d’avoir un son fort et clair, ce qui explique pourquoi le ratio entre et a une valeur supérieure à 1. Ce principe s’applique aussi aux autres cordes à l’exception de la corde de do.

L’objectif est bien atteint, mais plusieurs causes d’erreurs pourraient être évitées. Le fait d’enlever les cordes et de les déposer sur un morceau de bois ne reflète pas du tout la qualité du son quand la corde est sur l’alto. En outre, il faut faire plusieurs essais pour une seule expérience afin de bien confirmer nos résultats. Si l’expérience était à refaire, l’emploi d’un microphone sur le chevalet de l’alto et la vidéo qui filme le mouvement vertical de l’archet seraient le plus idéal. Par contre, l’étude du mémoire mène à plusieurs autres découvertes intéressantes à explorer comme la relation entre les numéros d’harmoniques et les vitesses de l’archet.

Les images

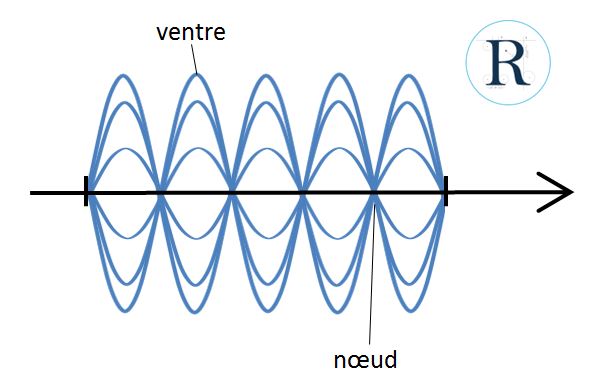
CONTEXTE THÉORIQUE



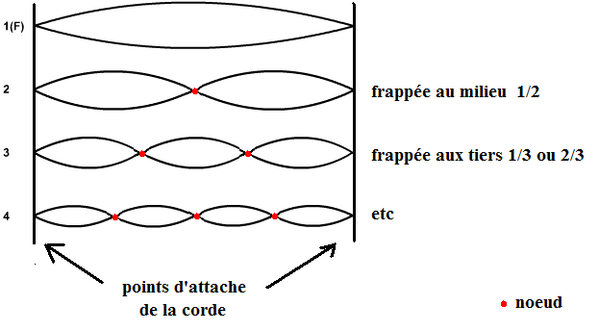
<https://www.guillaume-kessler.fr/comment-choisir-un-archet>

RÉFÉRENCE TRANSFORMATION DE FOURIER (p.2) (dans la bibliographie)

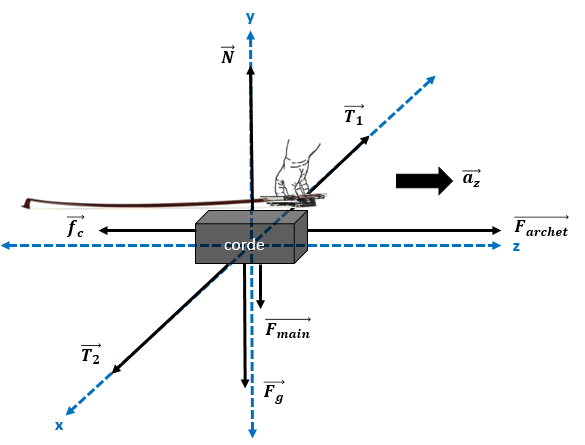
<https://www.math.u-bordeaux.fr/~smarques/cours/Physique/exosup/fourier.pdf>

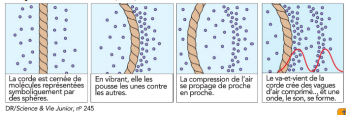


<https://www.revisionsbac.com/compte-cours-application.php?id=6393>



<http://lefourtout-dolivier.over-blog.net/article-11686207.html>





<http://tatullisab.free.fr/laboratoire/7_Terminale%20S/2_Specialite/2-sons/instrument%20a%20cordes.pdf>