

MASTER ATIAM

RAPPORT DE STAGE M2

---

# JOUABILITÉ DU VIOLONCELLE : LA NOTE DU LOUP

---



Encadré par Claudia FRITZ  
et José ANTUNES

Alexis FONT

Organisme d'accueil : LAM

Durée du stage : 5 mois

*Date de rédaction* : 1<sup>er</sup> Juillet 2018 - 16 Août 2018



## Résumé

Durant ce stage, on a réalisé une étude des différents paramètres pouvant permettre de contrôler la note du loup sur un violoncelle. Des systèmes mécaniques, que l'on nomme "anti-rouleurs", permettent d'atténuer cette note assez perturbante pour les musiciens. Trois anti-rouleurs ont été caractérisés à travers des mesures de mobilités afin de voir leurs influences sur la signature spectrale et la jouabilité du violoncelle. Une tentative de modélisation du comportement mécanique d'un anti-rouleur a ensuite été réalisée et comparé avec des résultats expérimentaux de fonction de transfert du violoncelle. Ce modèle, appelé modèle de Özgüven (du nom de son inventeur) permet d'analyser une structure soumise à des modifications structurelles. Dans notre cas la "structure" est le violoncelle, et la modification structurelle est l'anti-rouleur. La note du loup peut aussi être contrôlée directement par le musicien, sans l'aide d'anti-rouleur. C'est pourquoi des mesures de capture de mouvement avec un violoncelliste professionnel ont été mises en place. L'idée étant de remonter aux différents paramètres de contrôle d'archet que le musicien utilise d'une part pour contrôler le loup, et d'autre part pour le faire entendre fortement. L'influence des trois anti-rouleurs sur le jeu du musicien et sur la facilité ou non de contrôler le loup a aussi été menée lors de cette session de mesure et a permis de voir quel anti-rouleur était le plus efficace.

## Abstract

During this internship, we made a study of the different parameters which can allow to control the wolf note on a cello. Mechanical systems, called "wolf-killers", mitigate this note which is quite disturbing for the musicians. Three wolf-killers were characterized through mobility measurements in order to see their influence on the spectral signature and the playability of the cello. An attempt to model the mechanical behavior of a wolf-killer was then realized and compared with experimental results of cello transfer function. This model, named Özgüven model (due to its inventor) allows to analyze a structure subject to structural modifications. In our case the "structure" is the cello, and the structural modification is the wolf-killer. The wolf note can also be controlled directly by the musician, without the help of wolf-killers system. That's why, motion capture measurements with a professional cellist have been realised. The goal is to have the different bow control parameters that the musician uses on the one hand to control the wolf, and on the other hand to make it heard strongly. The influence of the three wolf-killers on the playability of the musician and on the ease or not to control the wolf note also led in this session of measurement and allowed to see what wolf killers is the most effective.

## Mots-clés

Violoncelle - note du loup - anti-rouleur - partie morte corde - supprimeur - amortisseur - fonction de transfert - mobilité - force minimum d'archet - modèle de özgüven - paramètres modaux - matrice de contrainte - capture de mouvement - capteur piézoélectrique - corps rigide - théorème de Gram-Schmidt - paramètre de contrôle d'archet.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>État de l'art et objectifs du stage</b>	<b>1</b>
1.1	La note du loup	1
1.2	Diagramme de jouabilité des instruments à cordes frottées	2
1.3	Comment atténuer le loup ?	6
1.3.1	Par des dispositifs mécaniques	6
1.3.2	Par des modifications de jeu	8
1.4	Détermination des paramètres de contrôle du musicien par capture de mouvement	8
1.5	Objectifs du stage	9
<b>2</b>	<b>Caractérisation et modélisation mécanique des anti-rouleurs</b>	<b>10</b>
2.1	Anti-rouleurs utilisés	10
2.2	Caractérisation	12
2.2.1	Principe	12
2.2.2	Dispositif expérimental	14
2.2.3	Résultats	16
2.3	Modélisation	26
2.3.1	Principe : Modèle de Özgüven	26
2.3.2	Dispositif expérimental	28
2.3.3	Résultats	30
<b>3</b>	<b>Étude du contrôle gestuel du musicien</b>	<b>34</b>
3.1	Principe	34
3.1.1	Marqueur violoncelle/archet	34
3.1.2	Théorème de Gramm-Schmidt	35
3.1.3	Application théorème de Gramm-Schmidt : calcul des repères	36
3.1.4	Calcul des paramètres principaux d'archet	36
3.1.5	Position marqueur étalon en situation de jeu	39
3.2	Dispositif expérimental	40
3.2.1	Capture de mouvement	40
3.2.2	Capteurs piézoélectrique	41
3.3	Protocole expérimental	41
3.4	Résultats	42
3.4.1	Répétabilité étapes 1 et 2	44
3.4.2	Différences entre l'étape et l'étape 4	44
3.4.3	Adaptation des paramètres de contrôle	47
<b>4</b>	<b>Conclusion et Discussion</b>	<b>49</b>

# Chapitre 1

## État de l'art et objectifs du stage

### 1.1 La note du loup

La note du loup est une note qui se trouve typiquement entre le  $E_2$  et  $G_2$  ( $\approx$  entre  $160\text{Hz}$  et  $196\text{Hz}$ ) sur la corde de do et sol du violoncelle. Cette note est plus présente sur les violoncelles de bonne qualité que les violoncelles bas de gamme mais n'est généralement pas un critère déterminant dans le choix des violoncellistes. La note du loup est souvent décrite comme une sorte de hululement. Il est alors plus difficile pour le musicien de produire un son stable et de bonne qualité quand il joue proche de cette note.

Ce phénomène est dû à un fort couplage entre une résonance importante du corps du violoncelle et la corde lorsque le musicien l'excite à une certaine fréquence. La figure 1.1 montre les principaux modes de signature que peut avoir un violoncelle. L'identification des modes est en pratique plus compliquée pour le violoncelle que pour le violon, et donc seul une analyse modale complète permet d'y arriver. Les modes du violoncelle provoquant le loup sont les modes  $CBR$ ,  $B_{1-}$  ou bien le mélange entre les deux.

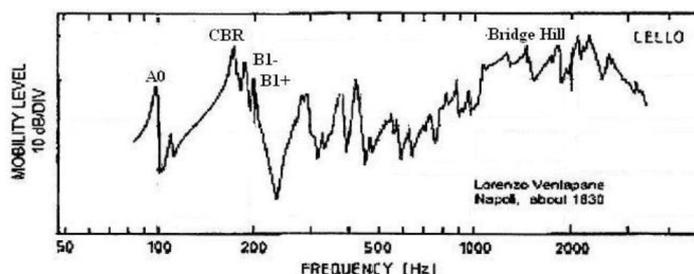


FIGURE 1.1 – Mobilité d'un violoncelle Lundberg par [1], avec  $CBR/B_{1-}$  les modes responsables de la note du loup.

Plus précisément, pour Raman [2], ce son provient d'une alternance cyclique entre la prédominance de l'oscillation du corps, et de la corde de l'instrument. En fait, lorsque le musicien excite la corde à une fréquence  $f_s$  proche des résonances du corps  $CBR$  et  $B_{1-}$  :

1. Le corps commence à absorber le mouvement de la corde. L'énergie absorbée par le corps devient de plus en plus importante jusqu'à ce que le corps se mette à osciller de manière anormalement forte. A de telles énergies la corde n'arrive plus à compenser la pression apportée par l'archet.
2. Ainsi la fréquence fondamentale de la corde passe de  $f_s$  à  $2f_s$ , et le couplage fort entre la corde et le corps disparaît (nous nous sommes éloignés de la fréquence du loup  $f_s$ ).
3. Enfin l'énergie de dissipation entre la corde et le corps reprend son niveau normal, et la corde reprend sa forme de vibration à  $f_s$

Puis de nouveaux le cycle  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$  se produit donnant cet effet de battement.

Pour Schelleng [3], en analogie avec des circuits électriques, ce battement peut être vu comme deux circuits résonnants couplés, de fréquences proches, séparées de  $\Delta f$ , centrées autour de la fréquence du loup :  $f_s + \Delta f/2$  et  $f_s - \Delta f/2$ . La note du loup sera donc composée de ces deux fréquences.

Schelleng a créé un diagramme relatif aux propriétés physiques d'une corde, pour prédire le moment où la note du loup émerge sur les instruments à cordes frottées. Il s'est aperçu que la note du loup a encore plus de chance d'apparaître sur les cordes graves du violoncelle (comme le sol et surtout le do), et est pratiquement inexistante sur le violon.

Enfin McIntyre et Woodhouse dans [4], en mesurant avec un transducteur piézoélectrique la forme d'onde de la force transverse au niveau du chevalet et le spectre correspondant, ont montré expérimentalement ce que prédisait Raman du point de vue temporel, et Schelleng du point de vue fréquentiel (voir en figure 1.2). On voit clairement sur cette figure les battements de la note du loup dus à l'alternance cyclique entre la prédominance de l'oscillation du corps et de la corde.

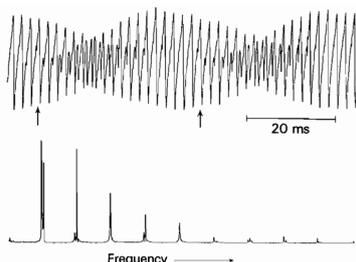


FIGURE 1.2 – Note du loup sur la corde de sol d'un violon des points de vues temporel et fréquentiel. Figure extraite de [4].

## 1.2 Diagramme de jouabilité des instruments à cordes frottées

De nombreuses études se sont concentrées sur la jouabilité des instruments à cordes frottées. La force minimum et maximum d'archet sont deux exemples de facteurs pouvant l'influencer. Les travaux menés par Raman [5] et Schelleng [6] ont permis de trouver une formulation simple de ces deux forces :

$$F_{max} = \frac{2\nu_b}{\Delta\mu\beta Y_0} \quad \text{et} \quad F_{min} = \frac{\nu_b}{2R\Delta\mu\beta^2 Y_0^2} \quad (1.1)$$

avec  $\nu_b$  la vitesse d'archet,  $\beta$  la position relative de l'archet par rapport au chevalet,  $\Delta\mu = \mu_s - \mu_d$  la différence entre le coefficient de friction statique et dynamique définie comme constante,  $Y_0$  l'admittance de la corde, et  $R$  une résistance mécanique prenant en compte en parallèle la résistance due au corps de l'instrument avec l'interaction entre la corde et l'archet, les pertes dues aux frictions internes de la corde et les réflexions sur le chevalet et le sillet.

Ces deux forces sont très importantes puisqu'elles délimitent les régions où la corde est en mouvement de Helmholtz (ce que recherche le musicien) sur le "diagramme de Schelleng". Ce diagramme est une représentation log-log de la force normale d'archet  $F_N$  par rapport à sa distance relative avec le chevalet  $\beta$  pour une vitesse d'archet  $\nu_b$  et une fréquence donnée (voir figure 1.3). Les violoncellistes jouent habituellement à une distance située entre 2.5cm et 10cm du chevalet et pour des forces d'archet allant de 0.3N (*pianissimo*) à 3N (*forte*). Avec de tels paramètres de jeu, ils se trouvent dans la zone "normale" sur le diagramme de Schelleng (mouvement de Helmholtz de la corde).

Ce diagramme a été très récemment raffiné dans [7] à voir à gauche sur la figure 1.4.

Il permet de rendre compte des différents mouvements possibles des cordes pour ce type d'instrument (mouvement d'Helmholtz/raouque/glissement multiple/glissement constant) à voir à droite de la figure 1.4 issu de [7], et surtout les paramètres de jeux à respecter pour que la corde soit en

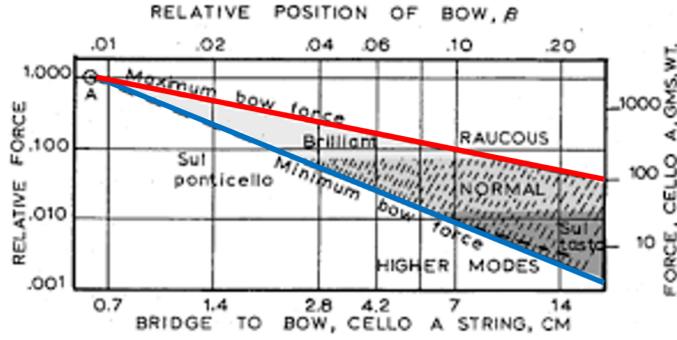


FIGURE 1.3 – Diagramme de Schelleng. En bleu  $F_{min}$  et en rouge  $F_{max}$

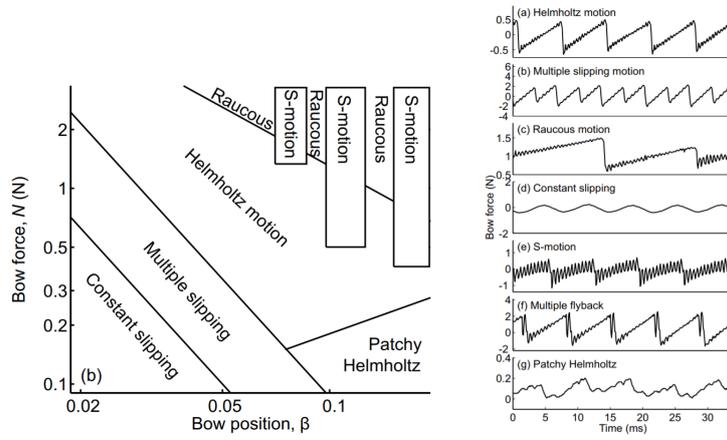


FIGURE 1.4 – A gauche : Diagramme de Schelleng mesuré dans [7] sur la corde de ré d'un violoncelle A droite : les différents mouvements de la corde. Figure extraite de [7].

mouvement de Helmholtz. Par exemple, en s'éloignant du chevalet ( $\beta$  élevé) la force minimum d'archet  $F_{min}$  à appliquer sur la corde pour obtenir un mouvement de Helmholtz est plus faible que si on se rapproche du chevalet (faible  $\beta$ ) et donc la facilité de jeu est plus simple loin du chevalet. Mais en s'en éloignant trop on peut obtenir un mouvement non souhaité par le musicien, un mouvement de Helmholtz irrégulier par exemple ("Patchy Helmholtz").

Une refonte des hypothèses de Schelleng sur les forces limites d'archet calculées à partir de l'équation 1.1 a été réalisée par [8] en utilisant une machine à frotter (qui simule l'archet). Ils se sont notamment rendus compte que l'hypothèse comme quoi les coefficients de friction étaient constants (et donc indépendants de la vitesse d'archet) était fausse surtout à faible  $\nu_b$ . En introduisant une fonction hyperbolique sur la variation de  $\Delta\mu$  dépendant de  $\nu_b$  cette fois-ci, ils ont obtenu des zones de jouabilité plus proches de la réalité sur le diagramme de Schelleng. Ils ont de plus montré que la proportionnalité prédite par Schelleng entre  $F_{max}$  et  $\nu_b$  s'avérait juste (équation 1.1), mais fausse pour  $F_{min}$  (indépendant de  $\nu_b$  pour la corde de ré et mi d'un violon), et ont réajusté la relation entre cette force et la résistance  $R$ .

Suite aux études de Schelleng et Raman, Woodhouse publie dans [9] une nouvelle formulation de la force minimum d'archet. Il s'appuie sur un modèle en décomposition de Fourier de la force en dents de scie au niveau du chevalet, qui contrairement à Raman, ne traite plus le chevalet comme une simple résistance (sert uniquement de réflecteur des ondes issues de la corde), et en déduit la formulation suivante :

$$F_{min} = \frac{2\nu_b}{(\pi\beta Y_0)^2 \Delta\mu} \left( \max \left[ \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{n^2} Y_1(2n\pi f_0) e^{2j\pi n f_0 t} \right] + \operatorname{Re} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{Y_1(2n\pi f_0)}{n^2} \right) \quad (1.2)$$

avec  $Y_1$  l'admittance du chevalet,  $f_0$  la fréquence de la corde supposée en dents de scie. Cette formu-

lation est assez proche de celle de Raman (1.1) si on considère uniquement le mode le plus dominant dans cette série avec  $n=1$  :

$$F_{min} \approx \frac{4\nu_b}{(\pi\beta Y_0)^2 R\Delta\mu} \quad (1.3)$$

L'équation 1.2 lui a permis de prédire la dépendance fréquentielle de  $F_{min}$  à travers des mesures d'admittance au niveau du chevalet, et donc de prédire si telle ou telle note est facile à jouer. Elle permet aussi de rendre compte du couplage entre le corps et la corde de l'instrument au niveau du chevalet. D'après le modèle de Woodhouse, la force minimum d'archet présente une forte résonance autour de la fréquence du loup  $f_s$  à voir en figure 1.5 faite par [10]. Le musicien devra donc augmenter sa force d'archet pour produire un mouvement de Helmholtz lorsqu'il joue des notes proches de celles du loup.

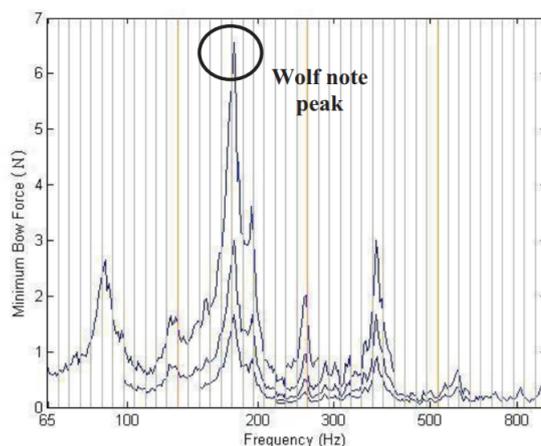


FIGURE 1.5 – Force minimum d'archet en fonction de la note jouée, mesurée sur les 4 cordes d'un violoncelle. Figure extraite de [10].

Cependant l'hypothèse forte d'excitation parfaite en dents de scie faite par Schelleng, reste toujours valable dans ce modèle. Or on sait que lorsque la fréquence de collage/relâchement de la corde tombe près d'une forte résonance du corps de l'instrument, le mouvement de Helmholtz souhaité devient déformé et est décrit par le musicien comme un roulement de la note qui nuit fortement à la jouabilité : la note du loup (étudiée sur le violon dans [11]). Hossein *et al* [12], ont récemment amélioré cette formulation en ne considérant plus uniquement une excitation en dents de scie. Leur modèle vérifie la perte du mouvement de Helmholtz de la corde lorsque l'on joue une note proche des résonances du corps, plus précisément sur sa première résonance (région de la note du loup  $\approx 170Hz$ ) à voir en figure 1.6.

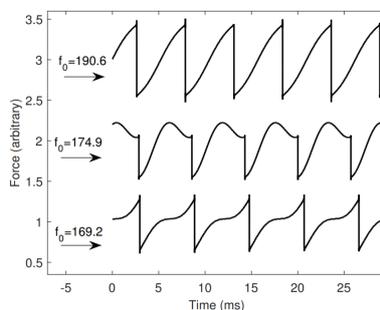


FIGURE 1.6 – Perte du mouvement de Helmholtz de la corde proche de la note du loup. Figure extraite de [12].

Il suffit pour cela de remplacer  $Y_1$  dans l'équation 1.2 par  $\zeta(2\pi n f_0)Y_1(2\pi n f_0)$  avec  $\zeta$  un paramètre de correction de la force au niveau du chevalet (dû au caractère non rigide du corps) défini comme

suit :

$$\zeta = \frac{\sin(k\beta L)}{\sin(k\beta L) - i\frac{Y_1}{Y_0}\cos(k\beta L)} \quad (1.4)$$

avec  $L$  la longueur de la corde, et  $k = w/c$  la nombre d'onde. Ils ont par ailleurs montré l'influence de la sympathie des cordes sur la force minimum d'archet et qu'il est possible de négliger les effets de torsion et dispersion dans la corde pour le calcul de  $F_{min}$  (qui consisterait à remplacer  $Y_0^2$  par  $Y_0Y_{0R} + Y_0^2$  avec  $Y_{0R}$  l'impédance caractéristique des ondes de torsion dans la corde). Grâce à leur nouveau modèle, de nouveaux diagrammes de Schelleng dépendants de la fréquence de jeu sont apparus. Les plus intéressants à étudier sont ceux que l'on obtient quand on joue des notes proches de la note du loup à voir en figure 1.7.

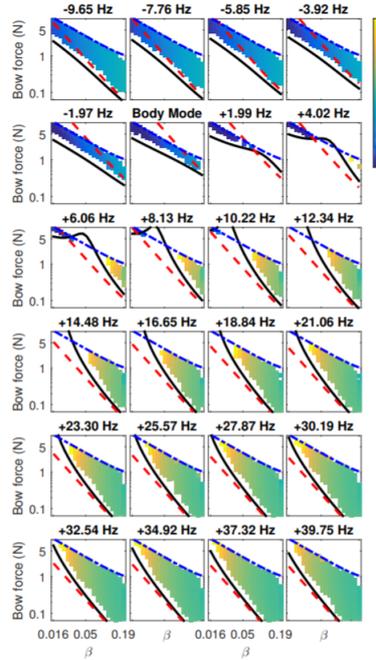


FIGURE 1.7 – Diagramme de Schelleng pour une corde de do d'un violoncelle avec une corde de masse  $m = 120g$ , sans onde de torsion et une résonance de corps à  $172Hz$ . Les nombres en haut de chaque figure représente le décalage en fréquence par rapport à  $f_s$ . En pointillé bleu  $F_{max}$  calculée en 1.1, en pointillé rouge  $F_{min}$  calculée par Woodhouse en 1.2 et en noir  $F_{min}$  d'après leur modèle issu de 1.4. Figure extraite de [12].

Comme nous l'avons dit précédemment, la zone de jouabilité des instruments à cordes frottées se trouve dans la zone délimitée par  $F_{min}$  et  $F_{max}$  (respectivement en noir et en pointillé bleu sur la figure 1.7). Autour de la première résonance du corps, on s'aperçoit que cette zone devient de plus en plus restreinte sur la figure 1.7. Les paramètres de contrôle d'archet (à savoir la distance au chevalet et la force d'archet) autour et pour la note du loup sont donc très importants pour que la corde soit en mouvement de Helmholtz contrairement aux autres notes où la zone de jouabilité est bien plus grande. Par exemple pour une fréquence de jeu de  $+39.75$  Hz par rapport à la fréquence du loup  $f_s$ , la zone de jouabilité du violoncelle est beaucoup plus large que pour un décalage de  $+4.02$  Hz par rapport à  $f_s$ . Dans ce cas là, le violoncelliste devra soit jouer loin du chevalet avec une force supérieure à  $0.5N$ , soit très proche du chevalet avec une grande force d'archet ( $\approx 5N$ ) pour pouvoir produire un mouvement de Helmholtz.

Un autre diagramme important pour étudier la jouabilité des instruments à cordes frottées est celui de Guettler (diagramme représentant la force d'archet en fonction de l'accélération d'archet) qui rend compte des transitoires du mouvement d'Helmholtz : départ immédiat ou non après le premier relâchement de la corde sur l'archet. Dans l'article [7], ils ont montré qu'en éloignant l'excitation du chevalet on couvre plus de zones dans le diagramme de Guettler pour un établissement rapide du mouvement de Helmholtz.

## 1.3 Comment atténuer le loup ?

Il existe plusieurs méthodes pour atténuer le loup : l'une consiste à placer des dispositifs mécaniques sur le violoncelle, l'autre se base sur le jeu du violoncelliste.

### 1.3.1 Par des dispositifs mécaniques

Dans [10], au chapitre 5, une étude sur les différents paramètres pouvant influencer la note du loup sur un violoncelle a été menée. Il a notamment été montré expérimentalement que l'ajout d'une masse au niveau du chevalet diminue la  $F_{min}$  sur la fréquence du loup  $f_s$ , mais modifie aussi de  $F_{min}$  pour d'autres fréquences (voir figure 5.14 de cette thèse). L'angle entre la masse ajoutée et le chevalet joue aussi un rôle important sur  $F_{min}(f)$  (voir figure 5.16 de cette thèse), et a été validé par des expériences faites avec des violoncellistes professionnels. Le désaccordage de la corde peut aussi emmener d'énormes variations sur l'amplitude de  $F_{min}(f_s)$  (voir figure 5.8 cette thèse).

Plusieurs dispositifs permettent d'abaisser le loup sur le violoncelle. On peut les appeler différemment : les *anti-rouleurs* (dus à la caractéristique de "battement"/"roulement" de la note du loup) ou encore *suppresseurs/éliminateurs/tueurs de loup*. Ils permettent d'abaisser la force minimum d'archet  $F_{min}$  au niveau de la fréquence du loup  $f_s$  et donc de faciliter le jeu du musicien pour des fréquences proches du loup.

Depuis de nombreuses années les facteurs d'instrument se sont rendu compte qu'en ajoutant une petite masse sur la partie morte de la corde (entre le chevalet et le cordier) abaissait les effets de la note du loup. Ces système ont été étudiés dans [13] et leur disposition sur le violoncelle sont voir en figure 1.8.



FIGURE 1.8 – Anti-rouleur typique monté sur la partie morte de la corde de sol d'un violoncelle

Dans [14], une formulation théorique modale complète du violoncelle avec certains tueurs de loup a été réalisée. Dans le prolongement de ce modèle, une expérience avec un violoncelliste professionnel a été menée pour voir l'efficacité des éliminateurs de loup selon leurs masse et leurs position par rapport au chevalet. Ils disposaient de quatre anti-rouleurs de la même marque, identiques, et seulement différents en terme de poids. Les résultats obtenus sur la corde sol d'un violoncelle sont à voir en figure 1.9 (les fréquences affichées étant mesurées à partir du signal de l'accéléromètre au niveau du chevalet du violoncelle). On s'aperçoit que plus le supprimeur est proche du chevalet, plus l'émergence du loup est difficile (en vert sur la figure 1.9), et la fréquence du loup (si elle apparaît) est modifiée s'accordant sur d'autres résonances du corps. Par ailleurs plus la masse de l'éliminateur du loup est faible, plus il est facile de supprimer le loup pour le musicien. On s'aperçoit aussi que la fréquence du loup n'est pas la même selon la masse et la position de l'anti-rouleur.

De plus ils ont observé que sur la corde de sol, le loup est beaucoup moins présent que sur la corde de do quel que soit le supprimeur utilisé, comme le prédisait Schelleng. Les mêmes auteurs ont récemment étudié dans [15] la stabilité de leur modèle modale linéarisé (plus simple et moins coûteux en temps de calcul par rapport à des simulations numérique temporelles). Ils se sont aperçu que

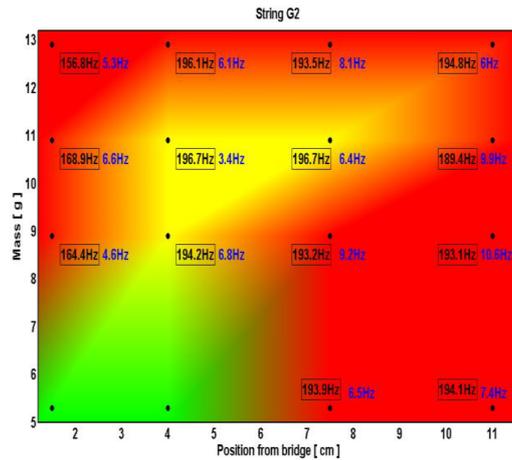


FIGURE 1.9 – Apparition du loup sur la corde de sol d’un violoncelle pour différentes distances du suppresseur par rapport au chevalet, et différentes masses d’anti-rouleur. En rouge, "la note du loup est très facile à faire apparaître", en jaune "un peu moins" et enfin en vert "il est impossible de faire ressortir la note du loup". En noir la fréquence du loup et en bleu la fréquence de battement.  
Figure extraite de [14].

même si ce modèle ne rend pas compte de toute la diversité des phénomènes dynamiques d’un instrument à corde frottée, il permet d’en donner un aperçu et une nouvelle alternative de description du mouvement des cordes par rapport au modèle classique

D’autres tueurs de loup existent, et consiste à placer un système masse ressort sur un endroit approprié de la caisse de résonance à voir en figure 1.10. Sachant que l’émergence du loup est dû aux premières résonances du corps (voir partie 1.1), il est généralement placé là où l’amplitude modale de ce mode est maximum afin de l’atténuer fortement.

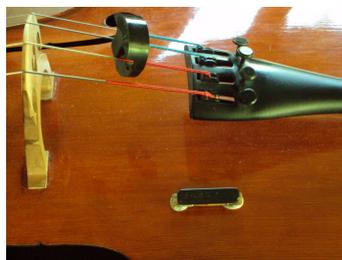


FIGURE 1.10 – Anti-rouleur typique placé sur la table d’harmonie d’un violoncelle

Robin Aitchison et Sarah Mnatzaganian, ont écrit un article pour "apprivoiser le loup" publié dans [22]. Plusieurs suppresseurs ont été testés (voir figure 1.11) et beaucoup de musiciens professionnels s’accordent sur le fait que les suppresseurs standards (masse ressort placé sur la partie morte des corde C ou G du violoncelle) suppriment convenablement le loup lorsque leur masse est faible et lorsqu’ils sont correctement accordés. L’article écrit par Schelleng [16] montre comment accorder correctement son suppresseur pour qu’il soit le plus efficace possible.

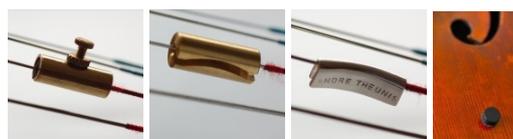


FIGURE 1.11 – De gauche à droite, Standard Cropped, New Harmony, Theunis Wolf Tuner et Krentz eliminator

### 1.3.2 Par des modifications de jeu

Cependant la plupart des musiciens détestent utiliser des éliminateurs car ils enlèvent trop de résonance et d'harmoniques à l'instrument, sont assez compliqués à accorder pour des résultats optimaux, et nuisent au son du violoncelle lorsqu'ils sont placés trop proche du chevalet (agissent comme une sourdine). Par ailleurs ils ont relevé que les conditions météorologiques comme l'humidité, la température de la pièce dans laquelle ils jouent et si l'instrument a été récemment utilisé ou pas, avaient une énorme influence sur le loup. De plus le contact entre le musicien et le corps de l'instrument peut aussi favoriser la suppression du loup comme l'explique Nicholas Trygstad, James Barraet et Hannah Roberts dans l'article [22], en serrant le violoncelle plus fort entre leurs genoux quand ils jouent proche du loup. Une autre manière de tuer le loup est d'arrêter les octaves inférieures ou supérieures à celle du loup sur les autres cordes avec la main gauche. Comme l'explique James Barralet si vous avez un loup sur la note  $F$  par exemple de la corde sol du violoncelle, en stoppant le  $F$  inférieur sur la corde de do, le loup est très bien apprivoisé. Les gestuelles d'archet sont aussi très importante, et Corrine Frost par exemple arrive à supprimer le loup en utilisant une main gauche puissante (et si un doigt n'est pas suffisant, utiliser deux doigt proche l'un de l'autre sur la corde), en rapprochant l'archet du chevalet, en gardant une vitesse d'archet régulière et en utilisant un angle d'archet particulier. Elle trouve aussi que la position du musicien a un fort impact sur la note du loup : rester tendu, mal respirer par exemple et le loup n'en sera que plus important.

En conclusion, il y a beaucoup de paramètres qui peuvent influencer sur la forte présence ou non du loup, à savoir : les conditions météorologiques, si l'instrument a été utilisé récemment, le contact entre le musicien et le corps de l'instrument, la position du musicien ainsi que les gestuelles d'archet. Outre le musicien lui-même, des systèmes que l'on nomme "anti-rouleurs", permettent de mieux contrôler le loup mais peuvent détériorer le timbre de l'instrument.

## 1.4 Détermination des paramètres de contrôle du musicien par capture de mouvement

Une méthode d'extraction de différents paramètres d'archet pour une performance de violon a été réalisée dans [17] en utilisant du matériel de capture de mouvement à voir en figure 1.12. Avec ce système ils ont pu remonter à différents paramètres d'archet :

- sa position par rapport à la corde
- sa position entre son point de contact sur la corde et le chevalet
- sa position entre son point de contact sur la corde et le talon ('frog' sur la figure 1.12)
- sa vitesse
- ses différents angles par rapport au repère du violon

De plus, avec différents capteurs ils ont aussi pu remonter à :

- son accélération
- sa force appliquée sur la corde

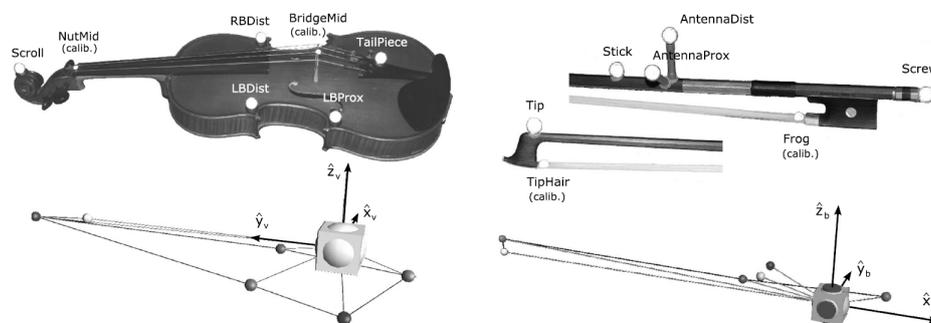


FIGURE 1.12 – Configuration des marqueurs utilisés et modèle cinématique correspondant sur le logiciel *Vicon*. Figure extraite de [17].

Il est important de noter est que le système mis en place ne perturbe pas le musicien en situation de jeu. Une récente étude utilisant ce matériel a été publiée dans [18], avec quatre violonistes alto et soprano, qui révèle une tendance claire d'adaptation des paramètres principaux d'archet sur les propriétés physiques de la corde et de l'instrument en restant toujours dans une zone de jouabilité sur le diagramme de Schelleng (mouvement de Helmholtz de la corde).

Un système similaire à été mis en place au LAM par Timothy Wofford durant sa thèse sur la jouabilité du violoncelle [19]. Nous verrons en détails la formulation des différents paramètres d'archet qui a été faite dans cette thèse dans la partie 3.

## 1.5 Objectifs du stage

Les objectifs de ce stage sont les suivants :

- Caractériser différents types d'anti-rouleurs sur la réponse d'un violoncelle à travers des mesures de mobilité.
- Modéliser le comportement de certains types de supprimeurs à travers un modèle mécanique s'appuyant sur des modifications structurelles (modèle de Özgüven).
- Remonter aux paramètres d'archet que le musicien utilise pour contrôler le loup, et voir l'influence des anti-rouleurs sur le jeu du musicien.

## Chapitre 2

# Caractérisation et modélisation mécanique des anti-rouleurs

Dans cette partie nous voulons voir l'influence de trois anti-rouleurs sur la signature spectrale du violoncelle à travers une première étape de **caractérisation** de ces différents systèmes. Une deuxième étape consiste à **modéliser** nos supprimeurs à travers un modèle mécanique s'appuyant sur des modifications structurelles : le modèle de Özgüven.

### 2.1 Anti-rouleurs utilisés

Les anti-rouleurs que nous allons utiliser sont à voir sur la figure 2.1.

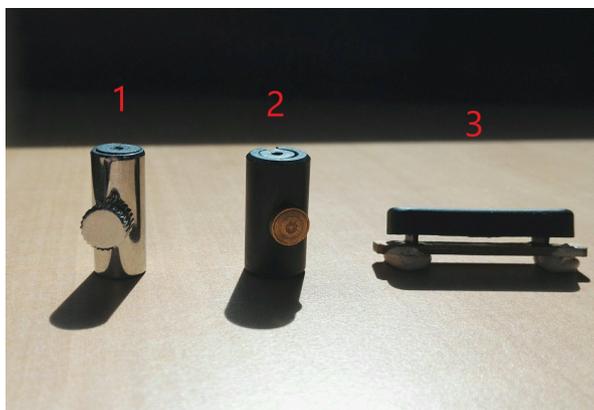


FIGURE 2.1 – Différent types de supprimeurs utilisé pour les mesures de mobilités

Les supprimeurs **1** et **2** sont des supprimeurs à placer directement sur la partie morte de la corde du violoncelle où l'on souhaite abaisser le loup (la corde de do ou sol). Ils sont constitués d'un support rigide en métal et de caoutchouc à l'intérieur de ce support à voir en figure 2.2. Le **1** est beaucoup plus commercialisé que le **2**, sans doute pour son efficacité sur le loup.

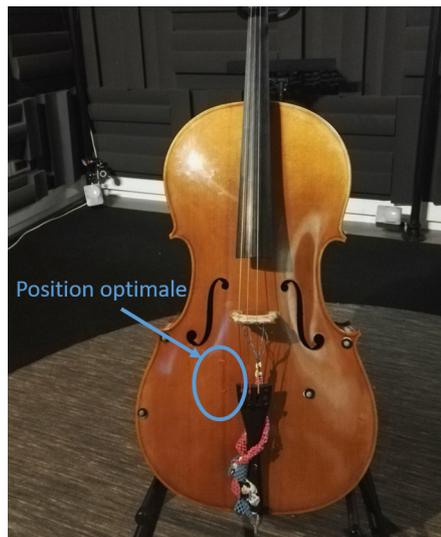
Enfin nous disposons d'un autre type d'anti-rouleur, le **3** qui est à placer directement sur la table d'harmonie du violoncelle. Quant à ce supprimeur, il est moins utilisé par les violoncellistes car il doit être disposé dans la caisse de résonance du violoncelle par un luthier. Il est donc très complexe de l'enlever dans le cas où le musicien souhaiterait ne plus avoir d'anti-rouleur sur son instrument.

La note du loup étant beaucoup plus souvent jouée sur la corde de sol du violoncelle, on décide de disposer les anti-rouleurs **1** et **2** en différentes positions sur la partie morte de la corde de sol afin de voir leurs efficacités sur le loup comme énoncé en partie 1.3.1.

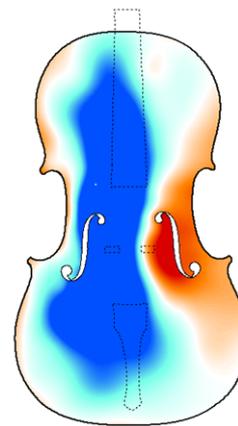


FIGURE 2.2 – Composition anti-rouleur 2

Quant à l'anti-rouleur 3 on le place sur le ventre de vibration des modes  $CBR/B_{1-}$  comme dit en partie 1.3.1 que l'on nommera désormais la "position optimale" pour des questions de facilités de lecture. Cette position a été choisie avec un luthier et un violoncelliste lorsque le musicien jouait le loup, en déterminant au touché la position où la table d'harmonie vibrait le plus. Cette position se trouve en dessous de l'ouïe en f du côté de la corde do du violoncelle à voir en figure 2.3a. En plaçant sur cette position, l'anti-rouleur est censé amortir le ventre de vibration des modes  $CBR/B_{1-}$  et donc d'abaisser le loup. Sur la figure 2.3b, un exemple des déformées modales du mode  $B_{1-}$  sur un violoncelle a été réalisé (en rouge et bleu ventres de vibrations, et en blanc nœuds de vibrations). Ce mode étant souvent mixé avec le mode  $CBR$  on ne peut pas réellement dire que ces déformées viennent uniquement du mode  $B_{1-}$ .



(a) Position optimale sur notre violoncelle



(b) Déformées modales du mode  $B_{1-}$  d'un violoncelle souvent mixé avec le mode  $CBR$ .

FIGURE 2.3

## 2.2 Caractérisation

Dans cette partie on souhaite caractériser nos différents suppresseurs à travers des mesures de fonction de transfert.

### 2.2.1 Principe

Pour observer les différentes résonances du corps du violoncelle il est nécessaire de réaliser des mesures de fonction de transfert au niveau du chevalet. Pour un système linéaire, une mesure de fonction de transfert peut être définie comme le rapport entre la sortie et l'entrée, donc entre la réponse de mon système (=sortie) à une certaine excitation (=entrée). Dans le cas des instruments à cordes frottées il est commun de considérer que le corps de l'instrument se comporte comme un système linéaire bien que l'excitation par l'archet (introduisant des phases de collage/relâchement de la corde) soit fortement non linéaire. La méthode la plus couramment utilisée consiste à venir taper avec un marteau d'impact le coin du chevalet, puis venir mesurer la réponse à cette excitation de l'autre côté du chevalet avec un vibromètre (réponse en vitesse) ou bien avec un accéléromètre (réponse en accélération) à voir en figure 2.4.

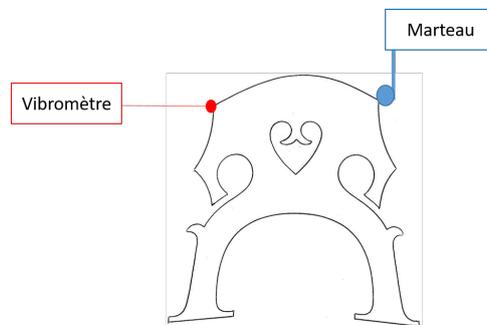


FIGURE 2.4 – Schéma de mesure de mobilité avec excitation au marteau d'impact et réponse au vibromètre

Sachant que nous voulons déterminer la réponse fréquentielle du corps de l'instrument, l'impact est censé être le plus court possible dans le domaine temporel ( $\Rightarrow$  le plus large bande dans le domaine fréquentiel) afin d'exciter toutes les fréquences du corps. Ainsi le rapport entre la sortie (=coin du chevalet) et l'entrée (=coin opposé du chevalet) nous donne la fonction de transfert, appelée mobilité,  $Y(\omega)$  définie comme suit :

$$Y(\omega) = \frac{V(\omega)}{F(\omega)} \quad (2.1)$$

avec  $V(\omega)$  la réponse en vitesse du chevalet (dans le cas où on utilise un vibromètre) et  $F(\omega)$  la force du marteau d'impact de l'autre côté du chevalet. D'autres méthodes existent, dont l'une qui consiste à exciter les cordes de l'instrument avec du fil de cuivre. Le problème avec cette méthode et qu'elle est peu répétable du fait de la difficulté à rompre le fil de cuivre toujours de la même manière durant les expériences.

#### 2.2.1.1 Quelles excitations ?

Les différences entre les méthodes existantes (fil de cuivre, marteau d'impact) et une véritable excitation à l'archet pour un violoncelle a été réalisée dans [10] et est à voir en figure 2.5. Les différences sont faibles entre chacune de ces méthodes et arrivent surtout à basse fréquence (en dessous de  $100Hz$ ) et à plus haute fréquence (au dessus de  $2000Hz$ ). Cependant la méthode à excitation au

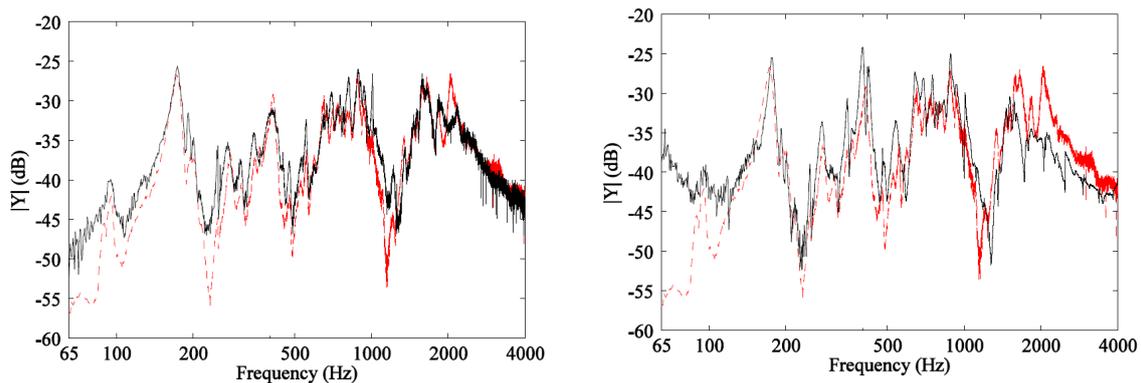


FIGURE 2.5 – Comparaison des mobilités sur un violoncelle (supporté sur de la mousse) pour différentes excitations au chevalet. A gauche : excitation au fil de cuivre en noir, en rouge excitation à l’archet. A droite : excitation au marteau d’impact en noir, en rouge excitation à l’archet. Figure extraite de [10].

marteau d’impact (à droite et en noir sur la figure 2.5) est plus répétable et est plus simple à mettre en place qu’une excitation au fil de cuivre. D’après ces mesures, on peut conclure que cette méthode est suffisamment précise pour mesurer le comportement vibratoire des instruments à cordes frottées, et en particulier dans le cas du violoncelle.

### 2.2.1.2 Quelles mesures de réponses ?

De même dans [10], la différence sur les fonctions de transfert avec un accéléromètre et un vibromètre a été réalisée et est à voir en figure 2.6. Les mobilités avec ces deux systèmes de mesure (vibromètre en noir, et accéléromètre en rouge pointillé) sont très proches même si l’accéléromètre présente plus de bruit au delà de  $2000\text{Hz}$ .

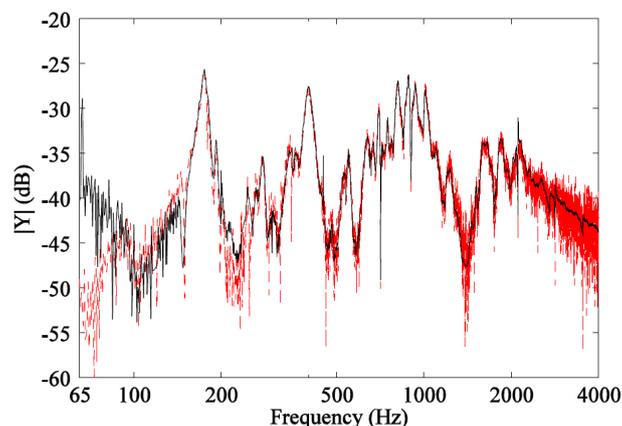


FIGURE 2.6 – Comparaison des mobilités sur un violoncelle (supporté sur de la mousse) pour différentes mesures de réponse vibratoire du chevalet à une excitation au marteau. En noir réponse mesurée au vibromètre et en pointillé rouge réponse mesurée avec un accéléromètre. Figure extraite de [10].

### 2.2.1.3 Quels supports ?

Une autre question est de savoir sur quel support doit-on poser l’instrument lors des mesures de fonction de transfert. Dans cette même thèse, [10] montre différents types de supports, et l’influence

qu'ils ont sur les fonctions de transferts d'un violoncelle à voir en figure 2.7.

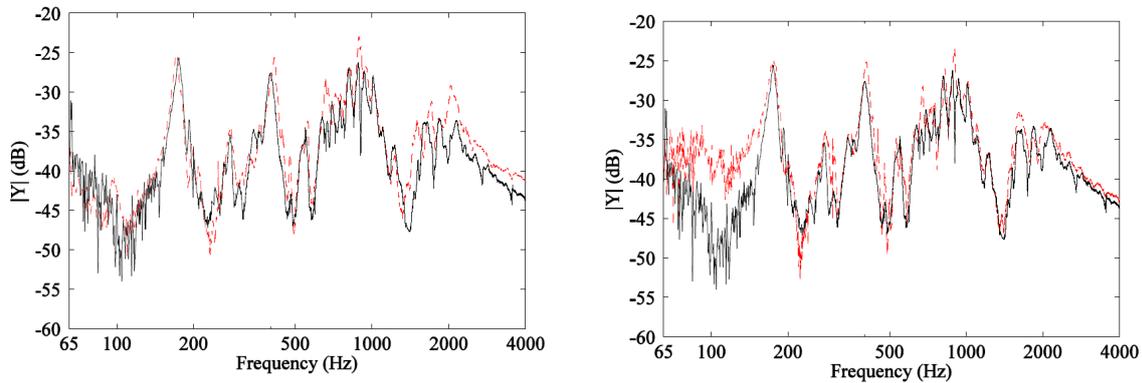


FIGURE 2.7 – Comparaison des mobilités sur un violoncelle placé sur différents supports (mesuré dans la configuration marteau d'impact/accéléromètre). A gauche : en noir violoncelle supporté par des tiges en acier et en pointillé rouge supporté sur de la mousse. A droite : en noir violoncelle supporté par des tiges en acier et en pointillé rouge tenu par un violoncelliste professionnel. Figure extraite de [10].

Là encore peu de différences apparaissent entre ces configurations : violoncelle supporté par des tiges en acier (en noir sur la figure 2.7), violoncelle maintenu horizontalement sur de la mousse (en pointillé rouge sur la figure 2.7 à gauche) et enfin tenu par un violoncelliste professionnel (en pointillé rouge sur la figure 2.7 à droite).

## 2.2.2 Dispositif expérimental

D'après la partie 2.2.1, nous décidons de faire nos mesures de mobilités en mettant le violoncelle sur un support métallique et en utilisant la configuration (excitation/réponse) = (marteau/vibromètre). Toutes nos mesures ont été réalisées en tapant avec le marteau sur le coin à côté de la corde de do du violoncelle, et le vibromètre pointant sur le coin du chevalet à côté de la corde la du violoncelle à voir en figure 2.8.

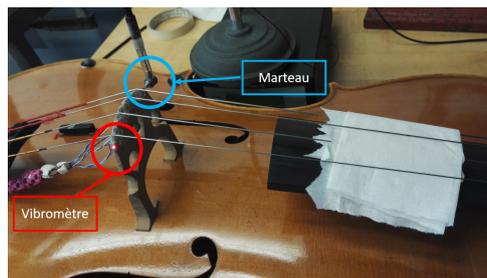


FIGURE 2.8 – Photo du violoncelle placé sur de la mousse en configuration de mesure marteau/vibromètre.

Par ailleurs pour correctement réfléchir le signal issu du vibromètre nous mettons sur le coin du chevalet de la poudre réfléchissante ou du papier réfléchissant. Bien entendu nous veillons à bloquer la vibration des cordes avec du papier, car nous nous intéressons uniquement à la vibration du corps de l'instrument (pour rappel les premières résonances du corps sont celles responsables de l'apparition du loup). Pour les mêmes raisons, le corps ne doit pas être en contact avec le support utilisé pour ne pas perturber la vibration du corps. Nous décidons d'utiliser une structure métallique pour minimiser les contacts entre la structure et le violoncelle à voir en figure 2.9. Ils viennent uniquement de la pique et de la volute de l'instrument. La longueur de la pique peut avoir une influence

sur les fonctions de transferts mesurées, c'est pourquoi, durant notre session de mesure la longueur de pique reste fixée à  $9\text{cm}$ .



FIGURE 2.9 – Suspension du violoncelle sur une structure en métal

Le matériel retenu pour les mesures de mobilité est à voir en figure 2.10 ainsi que les données de calibration dans le tableau 2.1.



FIGURE 2.10 – Matériels utilisés. De gauche à droite : Support métallique, Marteaux d'impact B&K, Conditionneur B&K, Carte acquisition NI 9162

Sensibilité Marteau (en $\text{pC/N}$ )	1.92
Gain d'entrée Marteau (en $\text{m.s}^{-2}/\text{V}$ )	$1/0.03116$
Gain d'entrée Vibromètre (en $\text{m.s}^{-1}/\text{V}$ )	0.125
Délai Vibromètre (en $\text{s}$ )	0.00123

TABLE 2.1 – Données de calibration du matériel utilisé

Un schéma explicatif du montage mis en place pour les mesures de mobilité est à voir sur la figure 2.11. Le marteau d'impact est relié au conditionneur qui est lui-même connecté à la carte d'acquisition NI. Le vibromètre laser quant à lui est directement relié à la carte d'acquisition. Les entrées de la carte NI ne doivent pas dépasser une tension supérieure à  $5\text{V}$ , c'est pourquoi nous réglons le gain du marteau à une certaine valeur sur le conditionneur à voir sur le tableau 2.1. Le traitement des données se fait ensuite sur le programme écrit en *matlab* daqplot qui permet de calculer des fonctions de transfert et  $F_{min}$  à travers la formulation de Woodhouse de l'équation 1.2.

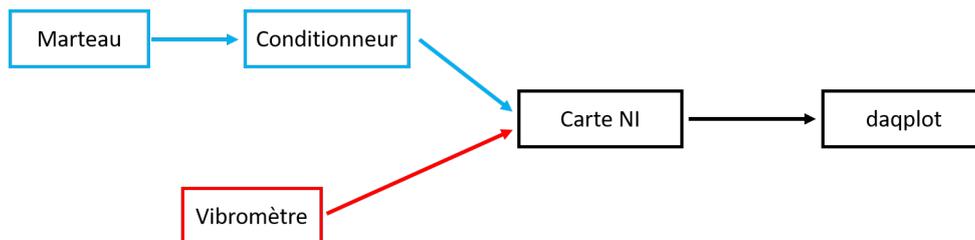


FIGURE 2.11 – Schéma du montage mesure de mobilité

## 2.2.3 Résultats

Toutes les mesures que nous avons effectuées ont été réalisées trois à cinq fois pour minimiser les incertitudes liées au matériel de mesures et à l'impact au marteau (assez peu répétable). Pour des questions de lisibilité sur les graphes, la cohérence entre chaque mesure n'a pas été affichée mais est toujours très bonne. Nous affichons toujours en premier les mesures de mobilités puis les forces minimums d'archet dans chacun des cas : sans suppresseur, avec le suppresseur 1, 2 et 3.

### 2.2.3.1 Sans suppresseur

(2.2.3.1.1) **Mobilité :** La mobilité du violoncelle que nous avons à disposition au laboratoire est à voir en figure 2.12

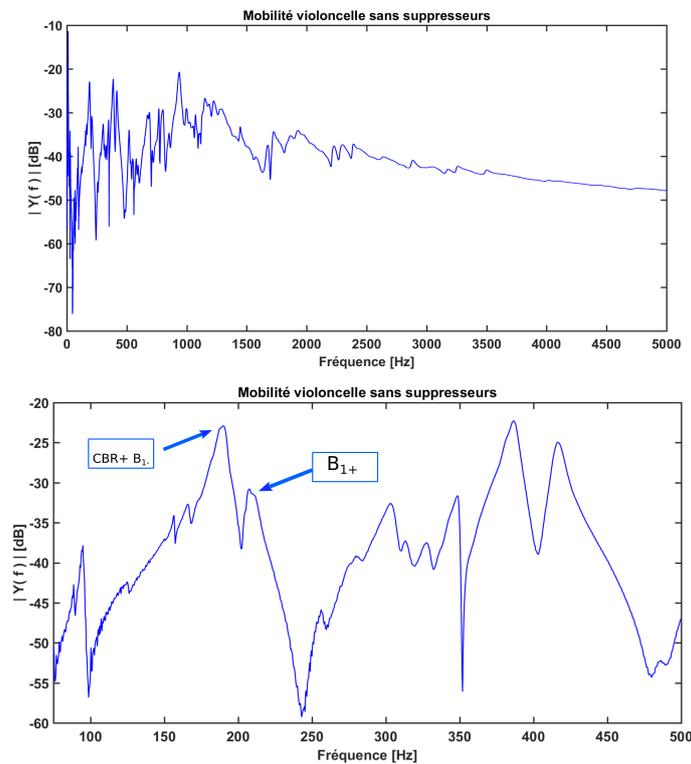


FIGURE 2.12 – Mobilité violoncelle sans suppresseurs entre 0 et 5000Hz en haut, entre 75 et 500Hz en bas avec mode du violoncelle.

La mixture du mode  $CBR$  et  $B_{1-}$  responsable de l'apparition de la note du loup sur notre violoncelle se trouve autour de 189.8Hz et a une amplitude de  $-22.89dB$ . Le mode  $B_{1+}$  est autour de 207Hz.

(2.2.3.1.2) **Force minimum d'archet :** En s'appuyant sur la formulation de Woodhouse pour le calcul de la force minimum d'archet (equation 1.2) avec  $Y_0 = 0.71m.s^{-1}/N$  pour la corde de do,  $Y_0 = 1.05m.s^{-1}/N$  pour la corde de sol,  $Y_0 = 1.44m.s^{-1}/N$  pour la corde de ré,  $Y_0 = 1.94m.s^{-1}/N$  pour la corde de la,  $\beta = 10cm$ ,  $v_b = 0.5m.s^{-1}$  et  $\Delta\mu = 0.5$  on obtient la figure 2.13.

On s'intéresse dans notre étude uniquement à la note du loup sur la corde de sol (très peu jouée sur la corde de do même si elle est plus présente) affichée en rouge sur la figure 2.13. Chaque barre représente une note, et la barre orange le  $C$  de chaque octave. Le loup sur notre violoncelle est donc autour de  $f_s \approx 190Hz$  (soit entre  $F_2\#$  et  $G_2$ ) puisque c'est à cette fréquence que  $F_{min}$  présente une forte résonance. La force minimum d'archet sur cette fréquence est de  $F_{min}(f_s) = 2.85N$ . Cela

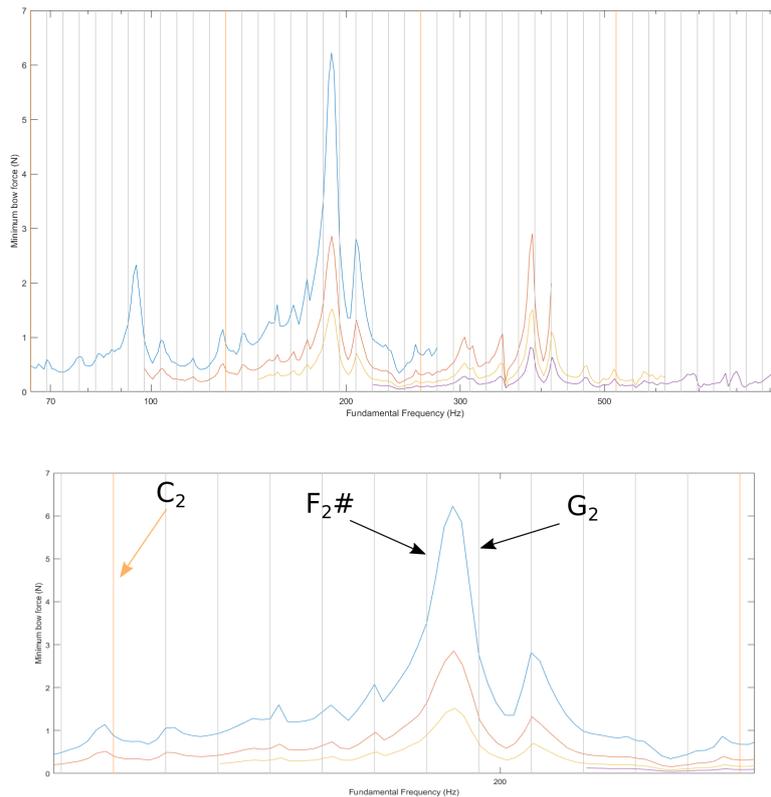


FIGURE 2.13 –  $F_{min}$  d’après équation 1.2 sur le violoncelle sans supprimeur. En bleu,  $F_{min}$  sur la corde do, en rouge sur la corde de sol, en jaune sur la corde de ré et en violet sur la corde la. En haut affichage entre  $65Hz$  et  $900Hz$ , en bas zoom sur une octave entre  $125Hz$  et  $265Hz$ .

signifie que le musicien devra appliquer une force d’archet minimum de  $2.85N$  lorsqu’il souhaite jouer entre  $F_2\#$  et  $G_2$  sur la corde de sol.

### 2.2.3.2 Avec le supprimeur 1

**(2.2.3.2.1) Modification spectrale :** Pour observer les modifications qu’introduisent le supprimeur 1 sur la signature spectrale du violoncelle on doit observer les mobilités.

Les mobilités du violoncelle avec le supprimeur 1 placé en différentes positions par rapport au chevalet sur la partie morte de la corde sol du violoncelle est à voir en figure 2.14.

On s’aperçoit tout d’abord que quelle que soit la position où l’on place l’anti-rouleur par rapport au chevalet (en vert, rouge et jaune sur la figure 2.14), il modifie la signature spectrale du violoncelle sans supprimeur (en bleu sur la figure 2.14). En effet ces modifications spectrales se voient surtout entre  $150Hz$  et  $190Hz$  (mixture entre mode  $CBR$  et  $B_{1-}$ ) et autour de  $210Hz$  (mode  $B_{1+}$ ) :

- à  $d = 5mm$ , le supprimeur affecte assez peu le mode issu de la mixture  $CBR + B_{1-}$ . Il abaisse beaucoup la résonance autour de  $210Hz$  ( $\approx -10dB$ ).
- $d = 10mm$ , le supprimeur affecte beaucoup le mode  $CBR + B_{1-}$  en créant une anti-résonance sur ce mode et une résonance à plus basse fréquence. Il amplifie de presque  $5dB$  la résonance autour de  $210Hz$ .
- à  $d = 15mm$ , le supprimeur fait de même que à  $d = 10mm$  mais plus bas en fréquence : il crée une anti-résonance autour  $178Hz$  et crée une résonance sur  $164Hz$ . Il amplifie de  $3dB$  le mode autour de  $210Hz$ .

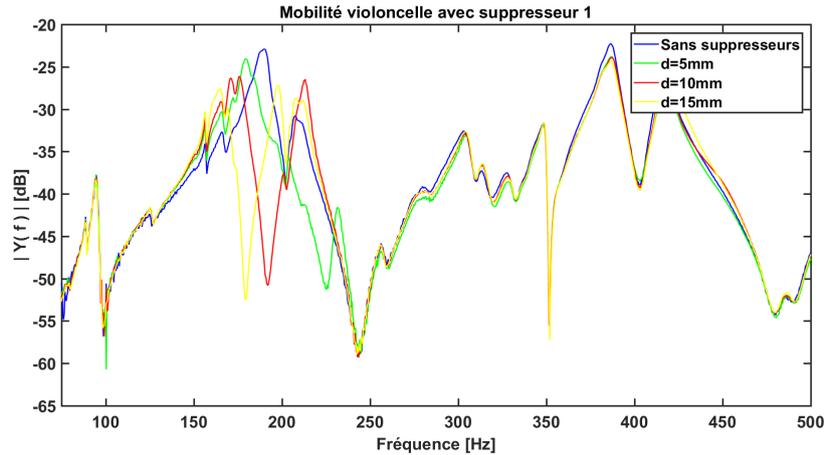


FIGURE 2.14 – Mesure mobilité violoncelle avec supprimeur 1. En bleu mobilité sans supprimeur, en vert supprimeur à  $d = 5\text{mm}$  du chevalet sur la corde sol, en rouge à  $d = 10\text{mm}$  du chevalet et en jaune à  $d = 15\text{mm}$  du chevalet

Distance au chevalet (mm)	Amplitude $CBR + B_{1-}$ (dB)
Sans supprimeur	-22.89
$d = 5\text{mm}$	-31.29
$d = 10\text{mm}$	-48.83
$d = 15\text{mm}$	-36.8
$d = 20\text{mm}$	-31.08
$d = 30\text{mm}$	-27.01
$d = 40\text{mm}$	-23.69

TABLE 2.2 – Amplitude mode  $CBR + B_{1-}$  (autour de  $f_s = 190\text{Hz}$ ) pour le supprimeur 1

L'amplitude de la mobilité sur la fréquence du loup pour différentes distances par rapport au chevalet du supprimeur 1 est à voir sur le tableau 2.2.

Lorsque le supprimeur est placé à  $d = 10\text{mm}$  et  $d = 15\text{mm}$  du chevalet sur la corde de sol, il abaisse le plus la résonance du corps à  $f_s = 190\text{Hz}$  (voir tableau 2.2 encadré en rouge). Cependant à cette position, il modifie fortement la signature du violoncelle comme dit précédemment, avec de nouvelles résonances à plus basses fréquences (autour de  $170\text{Hz}$ ), et à plus hautes fréquences (autour de  $210\text{Hz}$ ) par rapport à la signature d'origine du violoncelle. Si on souhaite réellement voir l'influence du supprimeur sur la jouabilité du violoncelle autour du loup, on doit désormais observer les modifications sur la  $F_{min}$

**(2.2.3.2.2) Modification sur la force minimum d'archet :** Les différentes  $F_{min}$  d'archet avec le supprimeur 1 s'appuyant sur la formulation de Woodhouse (équation 1.2 et avec les mêmes paramètres que dans le cas sans anti-rouleur) est à voir en figure 2.15 et les valeurs de  $F_{min}(f_s)$  dans le tableau 2.3.

On s'aperçoit que pour de grandes distances par rapport au chevalet, le supprimeur 1 n'affecte pas beaucoup le loup, puisque la  $F_{min}$ , pour produire un mouvement de Helmholtz sur la corde, reste dans le même ordre de grandeur que sans supprimeur ( $\approx 3\text{N}$ ).  $d = 10\text{mm}$  la  $F_{min}$  sur le loup est environ cinq fois plus petite que dans le cas sans supprimeur (à voir sur le tableau 2.3). Le musicien devra donc appliquer une force d'archet cinq fois plus petite avec l'anti-rouleur 1 que lorsqu'il jouait sans. Le problème est que le supprimeur ne fait que déplacer le loup en fréquence pour de telles distances. En effet sur la figure 2.15c on s'aperçoit qu'une autre résonance apparaît d'une amplitude de  $1.87\text{N}$ , non plus en  $f_s \approx 190\text{Hz}$  (note  $F_2\#$ ) mais aux alentours de  $f = 175\text{Hz}$  (note  $F_2$ ). Dans le cas sans supprimeur l'amplitude de  $F_{min}$  à cette fréquence est d'environ de  $0.81\text{N}$  soit 2x plus petite qu'avec l'anti-rouleur à  $d = 10\text{mm}$ . Ainsi même si la  $F_{min}$  est très faible sur la fréquence du loup,

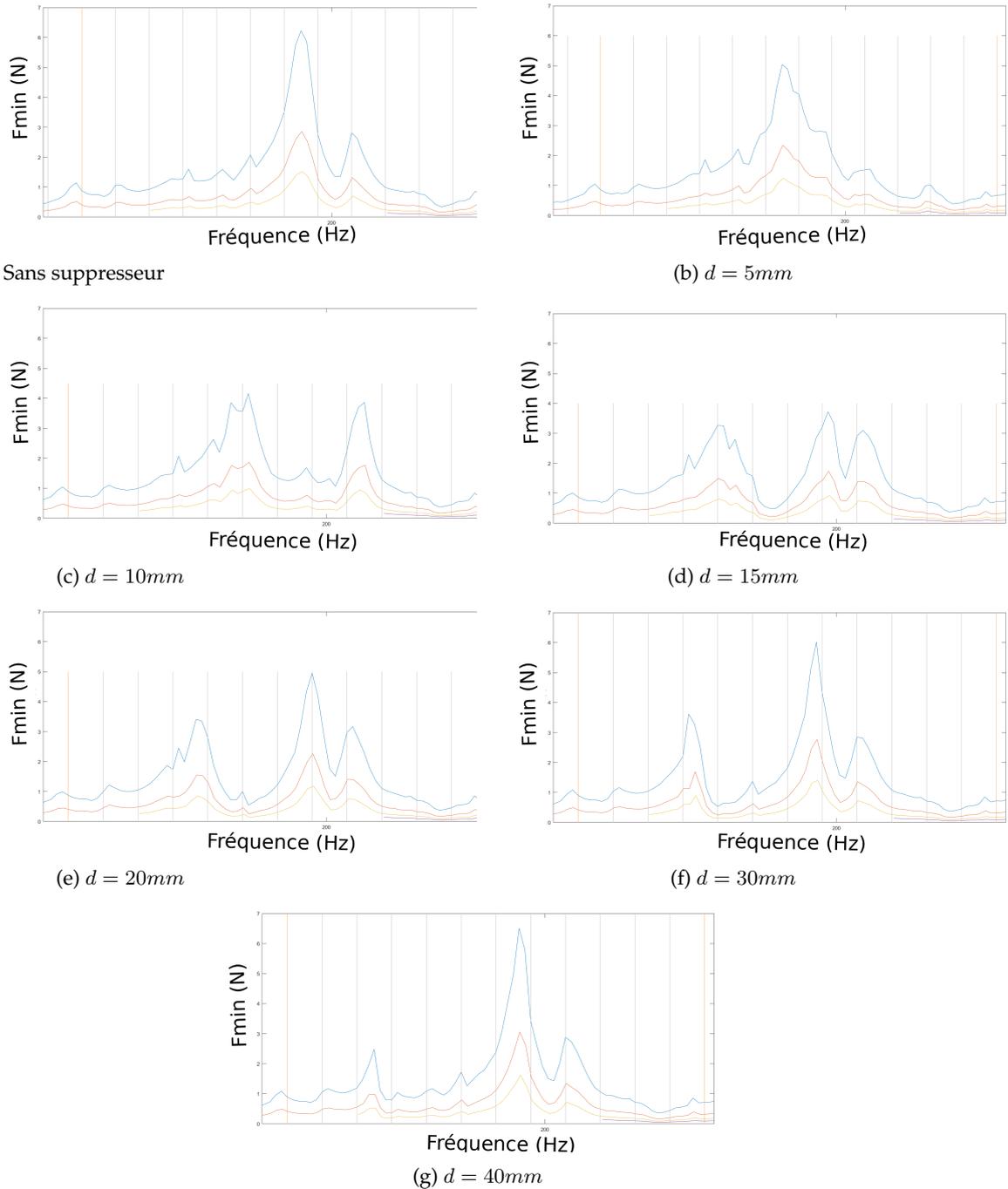


FIGURE 2.15 –  $F_{min}$  d'archet pour différentes distances  $d$  du suppresseur 1 par rapport au chevalet. En bleu,  $F_{min}$  sur la corde do, en rouge sur la corde de sol, en jaune sur la corde de ré et en violet sur la corde la

un autre "loup" apparaît en  $f \approx 175Hz$  et peut perturber la facilité de jeu du musicien sur cette note.

Quelle que soit la distance de l'anti-rouleur par rapport au chevalet, il modifie d'autres zones que celles du loup sur la  $F_{min}$ . En effet sur la tableau 2.3, on s'aperçoit qu'à partir de  $d = 10mm$  jusqu'à  $d = 40mm$  d'autres résonances sont créées sur la force minimum d'archet entre  $150Hz$  et  $175Hz$  qui n'existaient pas dans le cas sans suppresseur, et une augmentation de la  $F_{min}$  autour de  $207Hz$ . Cela signifie que la jouabilité du violoncelle va être modifiée par la mise en place de ce système : des

Distance au chevalet (mm)	$F_{min}(f_s)$ (N)	$F_{min}(f < f_s)$ (N)	$F_{min}(f > f_s)$ (N)
Sans suppressueur	2.85	∅	1.32 à 207Hz
$d = 5mm$	2.34	∅	∅
$d = 10mm$	0.59	1.87 à 175Hz	1.77 à 213Hz
$d = 15mm$	1.73	1.5 à 164Hz	1.39 à 209Hz
$d = 20mm$	2.25	1.55 à 161Hz	1.41 à 207Hz
$d = 30mm$	2.76	1.69 à 158Hz	1.35 à 207Hz
$d = 40mm$	3.055	0.98 à 150Hz	1.34 à 207Hz

TABLE 2.3 – Amplitude  $F_{min}$  avec suppressueur 1 autour de  $f_s = 190Hz$  (2<sup>me</sup> colonne) et autres résonances de  $F_{min}$  en dessous de  $f_s$  et au dessus de  $f_s$  (3<sup>me</sup> et 4<sup>me</sup> colonne).

notes vont être plus faciles/difficiles à jouer par rapport au cas sans suppressueur.

### 2.2.3.3 Avec le suppressueur 2

(2.2.3.3.1) **Modification spectrale :** Pour observer les modifications qu'introduisent le suppressueur 2 sur la signature spectrale du violoncelle on doit observer les mobilités.

Les mobilités du violoncelle avec le suppressueur 2 placé en différentes positions par rapport au chevalet sur la partie morte de la corde sol du violoncelle est à voir en figure 2.16.

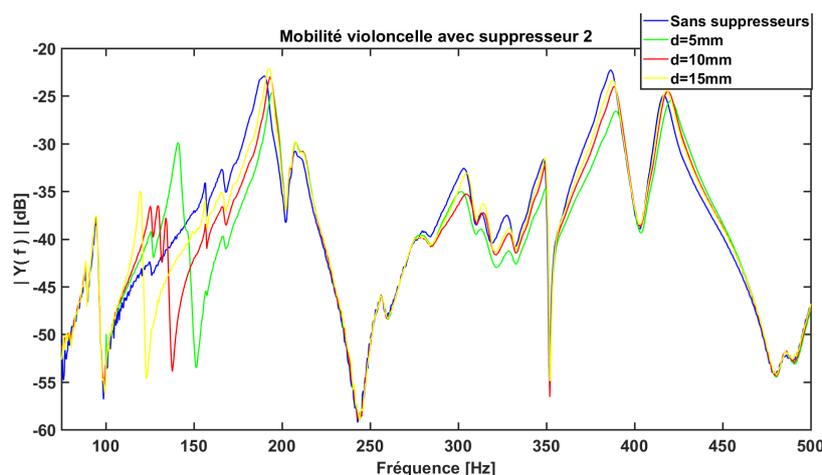


FIGURE 2.16 – Mesure mobilité violoncelle avec suppressueur 2. En bleu mobilité sans suppressueur, en vert suppressueur à  $d = 5mm$  du chevalet sur la corde sol, en rouge à  $d = 10mm$  du chevalet et en jaune à  $d = 15mm$  du chevalet

De nouveau le suppressueur introduit des modifications sur la signature spectrale du violoncelle mais en moindre mesure par rapport au suppressueur 1 (voir en figure 2.14). Ces modifications spectrales se voient surtout entre 120Hz et 190Hz (la zone du loup : mixture entre mode  $CBR$  et  $B_{1-}$ ) et autour de 300Hz et 400Hz, par contre le mode  $B_{1+}$  est peu modifié :

- à  $d = 5mm$ , le suppressueur affecte les modes issus de la mixture  $CBR + B_{1-}$  et crée une résonance autour de 140Hz et une anti-résonance autour de 149Hz. Il affecte aussi la zone entre 300 et 400Hz par rapport au cas sans suppressueur.
- à  $d = 10mm$ , le suppressueur affecte un peu moins le mode  $CBR + B_{1-}$  par rapport à  $d = 5mm$  et crée une anti-résonance autour de 138Hz. De même qu'à  $d = 5mm$  il affecte la zone autour de 300 et 400Hz.
- à  $d = 15mm$ , le suppressueur affecte encore un peu moins la résonance du loup par rapport au cas  $d = 5mm$  et  $d = 10mm$ . De plus il crée une anti-résonance sur 122Hz. Par rapport à  $d = 5mm$  et  $d = 10mm$ , dans une moindre mesure il affecte la zone autour de 300 et 400Hz

On s'aperçoit donc qu'au plus le supprimeur 2 est proche du chevalet plus il abaisse la résonance du corps à  $f_s$ , modifie plus la signature du violoncelle autour de 300 et 400Hz, et crée un couple anti-résonance/résonance plus proche du loup en terme de fréquence.

L'amplitude de la mobilité sur la fréquence du loup pour différentes distances par rapport au chevalet du supprimeur 2 est à voir sur le tableau 2.4.

Distance au chevalet (mm)	Amplitude $CBR + B_{1-}$ (dB)
Sans supprimeur	-22.89
$d = 5mm$	-28.64
$d = 10mm$	-26.56
$d = 15mm$	-24.46
$d = 20mm$	-23.53
$d = 30mm$	-23.06
$d = 40mm$	-22.66

TABLE 2.4 – Amplitude mode  $CBR + B_{1-}$  (autour de  $f_s \approx 190Hz$ ) pour le supprimeur 2

Lorsque le supprimeur est placé à  $d = 5mm$  du chevalet sur la corde de sol, il abaisse le plus la résonance du corps à  $f_s = 190Hz$  (voir tableau 2.4 encadré en rouge). Cependant à cette position, il modifie fortement la signature du violoncelle comme dit précédemment. Si on souhaite réellement voir l'influence du supprimeur autour du loup on doit désormais observer les modifications sur la  $F_{min}$ .

**(2.2.3.3.2) Modification sur la force minimum d'archet :** Les différentes  $F_{min}$  d'archet s'appuyant sur la formulation de Woodhouse (équation 1.2 et avec les mêmes paramètres que dans le cas sans anti-rouleur) avec le supprimeur 2 est à voir en figure 2.17 et les valeurs de  $F_{min}(f_s)$  dans le tableau 2.5.

Distance au chevalet (mm)	$F_{min}(f_s)$ (N)	$F_{min}(f < f_s)$ (N)	$F_{min}(f > f_s)$ (N)
Sans supprimeur	2.85	$\emptyset$	1.32 à 207Hz
$d = 5mm$	1.22	1.30 à 141Hz	1.37 à 209Hz
$d = 10mm$	1.64	$\emptyset$	1.39 à 209Hz
$d = 15mm$	2.64	$\emptyset$	1.42 à 207Hz
$d = 20mm$	2.95	$\emptyset$	1.37 à 207Hz
$d = 30mm$	3.07	$\emptyset$	1.36 à 207Hz
$d = 40mm$	3.09	$\emptyset$	1.36 à 207Hz

TABLE 2.5 – Amplitude  $F_{min}$  avec supprimeur 2 autour de  $f_s \approx 190Hz$  (2<sup>me</sup> colonne) et autres résonances de  $F_{min}$  en dessous de  $f_s$  et au dessus de  $f_s$  (3<sup>me</sup> et 4<sup>me</sup> colonne).

On s'aperçoit de même qu'avec le supprimeur 1, que pour de grandes distances par rapport au chevalet, le supprimeur 2 n'affecte pas beaucoup le loup, puisque la  $F_{min}$  pour produire un mouvement de Helmholtz sur la corde reste dans le même ordre de grandeur que sans supprimeur ( $\approx 3N$ ) à voir sur le tableau 2.5. Autour de  $d = 5mm$  la  $F_{min}$  sur le loup est environ deux fois plus petite que dans le cas sans supprimeur (à voir sur le tableau 2.5 encadré en rouge). Le musicien devra donc appliquer une force d'archet deux fois plus petite avec l'anti-rouleur 2 que quand il joue sans anti-rouleur. Ce supprimeur est donc moins efficace sur le loup que le supprimeur 1 qui divise  $F_{min}(f_s)$  par cinq. Par ailleurs avec une telle distance par rapport au chevalet, en supprimant le loup sur  $f_s$  on crée un "autre loup" sur des fréquences plus basses. En effet à  $d = 5mm$ , le supprimeur crée une résonance sur  $F_{min}(f)$  pour  $f \approx 141Hz$  (note  $D_2$ ). Dans le cas sans anti-rouleur (à voir en figure 2.17a) l'amplitude de  $F_{min}$  à cette même fréquence est 2.5 fois plus petite. Cela signifie qu'avec ce supprimeur placé en  $d = 5mm$ , bien que le loup a correctement été abaissé sur  $F_{min}$ , le violoncelliste devra forcer 2.5 fois plus qu'auparavant lorsqu'il souhaite jouer un  $D_2$ .

De même qu'avec le supprimeur 1, mais en moindre mesure, quelle que soit la distance de l'anti-rouleur par rapport au chevalet, il modifie d'autres zones que celles du loup sur la  $F_{min}$ . En effet mis

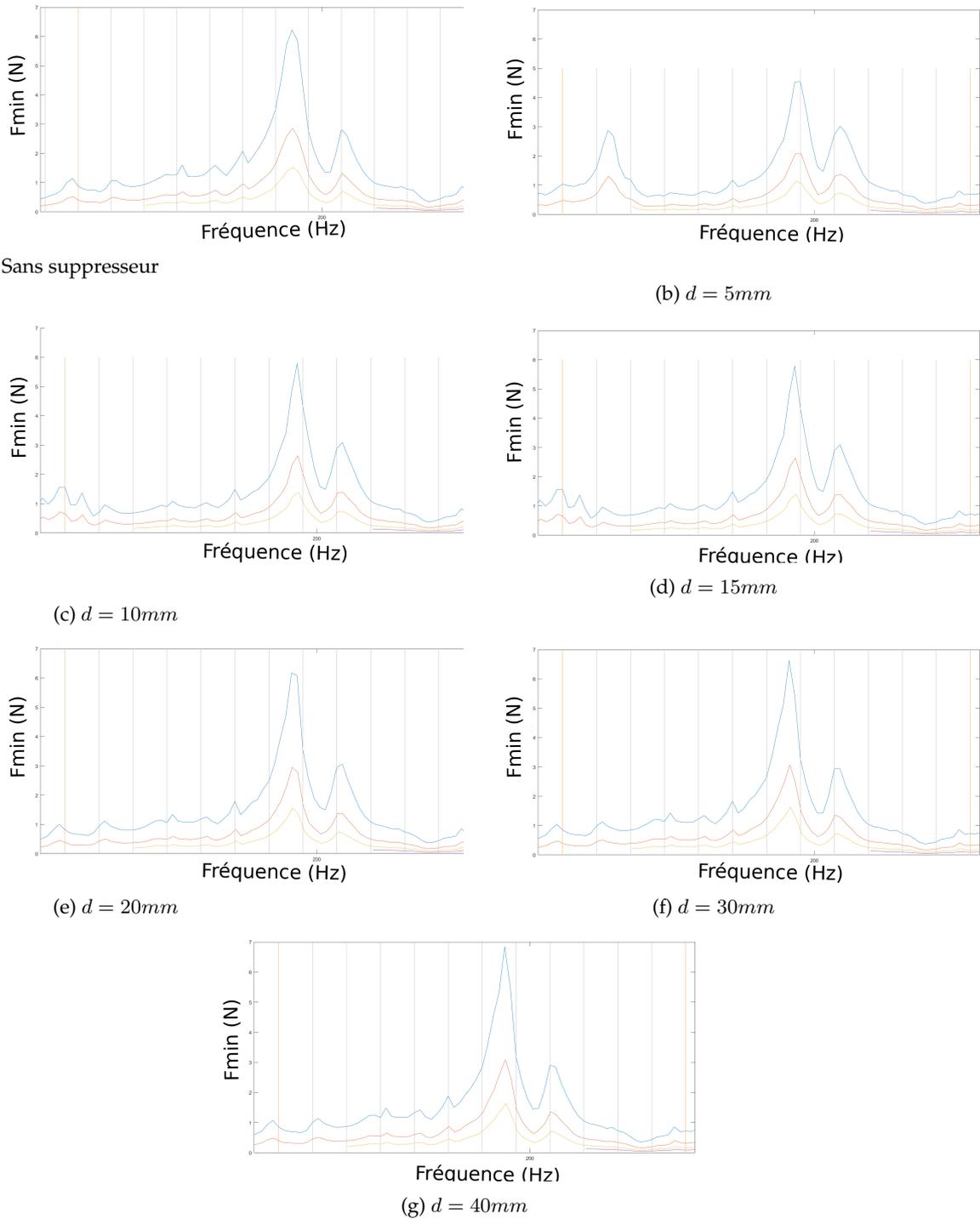


FIGURE 2.17 –  $F_{min}$  d’archet pour différentes distances  $d$  du suppresseur 2 par rapport au chevalet. En bleu,  $F_{min}$  sur la corde do, en rouge sur la corde de sol, en jaune sur la corde de ré et en violet sur la corde la

à part le cas  $d = 5mm$  qui crée une nouvelle résonance sur  $F_{min}(141)$ , on voit sur le tableau 2.5, que de  $d = 10mm$  à  $d = 40mm$  la résonance de  $F_{min}$  autour de  $207Hz$  est très peu modifiée et qu’aucune nouvelle résonance est créée autour de  $141Hz$ . Ce qui signifie que la jouabilité du violoncelle, sur des notes autres que celles du loup sera moins affecté par la mise en place de ce système par rapport à l’anti-rouleur 1.

### 2.2.3.4 Avec le suppresseur 3

**(2.2.3.4.1) Modification spectrale :** Pour observer les modifications qu'introduisent le suppresseur 3 sur la signature spectrale du violoncelle on doit observer les mobilités.

Les mobilités du violoncelle avec le suppresseur 3 placé sur la "position optimale" est à voir en figure 2.18.

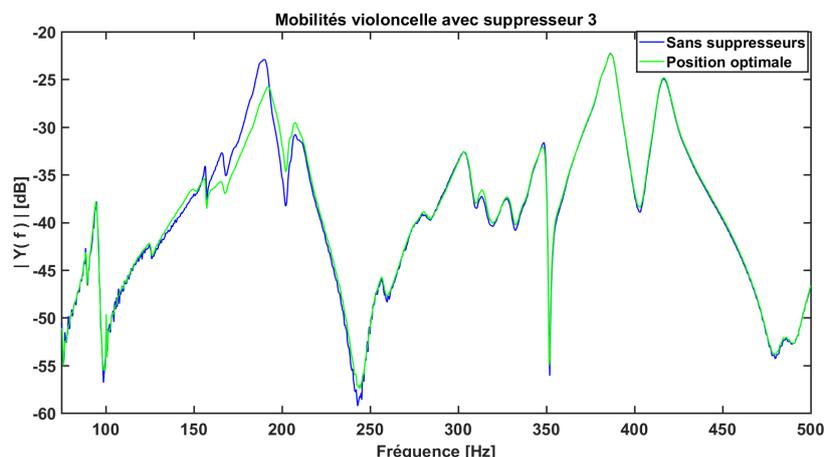


FIGURE 2.18 – Mesure mobilité violoncelle avec suppresseur 3. En bleu mobilité sans suppresseur, en vert mobilité avec le suppresseur 3 placé sur la position optimale

De nouveau, le suppresseur (en vert sur la figure 2.18) introduit des modifications sur la signature du violoncelle (en bleu sur la figure 2.18) mais dans une moindre mesure par rapport aux deux autres suppresseurs. En effet cet anti-rouleur affecte uniquement la zone du loup en ne créant pas de résonance/anti-résonance "parasites" autour du loup comme le faisait les anti-rouleurs 1 et 2 (à voir en figure 2.14 et 2.16).

L'amplitude de la mobilité sur la fréquence du loup du suppresseur 3 est à voir sur le tableau 2.6.

Distance au chevalet (mm)	Amplitude $CBR + B_{1-}$ (dB)
Sans suppresseur	-22.89
Position optimale	-26.24

TABLE 2.6 – Amplitude mode  $CBR + B_{1-}$  (autour de  $f_s \approx 190Hz$ ) pour le suppresseur 3

On s'aperçoit sur la table 2.6, que le suppresseur 3 abaisse à peu près autant le mode  $CBR + B_{1-}$  que le suppresseur 2 en  $d = 10mm$  (atténuation de  $\approx 3dB$ ), mais beaucoup moins que l'anti-rouleur 1 qu'il l'atténue de presque  $26dB$  en  $d = 10mm$  (voir table 2.2). Si on souhaite réellement voir l'influence du suppresseur sur le loup on doit désormais observer les modifications sur la  $F_{min}$ .

**(2.2.3.4.2) Modification sur la force minimum d'archet :** La  $F_{min}$  d'archet s'appuyant sur la formulation de Woodhouse (équation 1.2 et avec les mêmes paramètres que dans le cas sans anti-rouleur) avec le suppresseur 3 est à voir en figure 2.19 et la valeur de  $F_{min}(f_s)$  dans le tableau 2.7.

Position suppresseur	Amplitude $F_{min}(f_s)$ (N)
Sans suppresseur	2.85
Position optimale	1.75

TABLE 2.7 – Amplitude  $F_{min}$  avec suppresseur 3 autour de  $f_s \approx 190Hz$

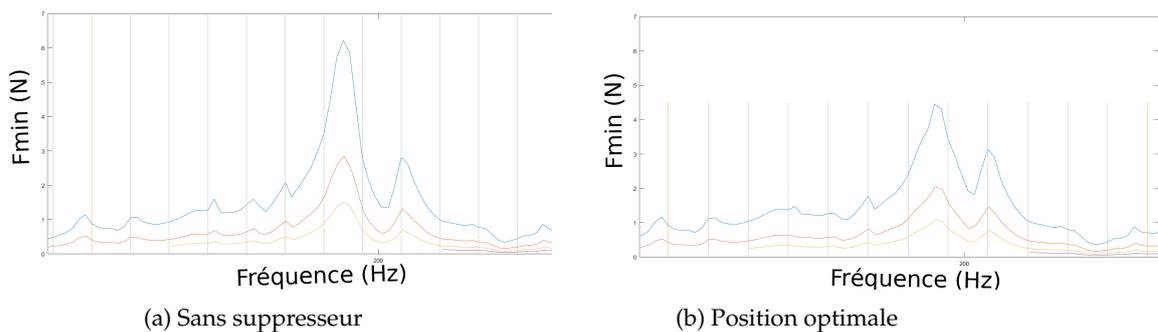


FIGURE 2.19 –  $F_{min}$  d’archet pour le suppresseur 3 placé sur la table à la position optimale. En bleu,  $F_{min}$  sur la corde do, en rouge sur la corde de sol, en jaune sur la corde de ré et en violet sur la corde la

On s’aperçoit que cet anti-rouleur modifie moins  $F_{min}(f)$  par rapport au suppresseur 1 et 2 lorsqu’ils sont placés proche du chevalet (voir figure 2.15 et 2.17). En ce qui concerne le loup, cet anti-rouleur divise par 1.6 la  $F_{min}$  par rapport au cas sans suppresseur (voir table 2.7). Il est donc un peu moins efficace que l’anti-rouleur 2 positionné à une distance  $d = 5mm$  du chevalet (voir table 2.4 encadré en rouge) et est beaucoup moins efficace que l’anti-rouleur 1 qui divise par cinq la  $F_{min}$  au niveau du loup en  $d = 10mm$  (voir table 2.3 encadré en rouge).

### 2.2.3.5 Comparaison des trois suppresseurs

Une comparaison des mesures de mobilité avec nos différents suppresseurs est à voir en figure 2.20. Les positions  $d$  par rapport au chevalet des anti-rouleurs 1 et 2 ( $d = 10mm$  et  $d = 5mm$ ) ont été choisies en raison de leur fort abaissement de  $F_{min}$  sur le loup (voir table 2.3 et table 2.5 encadré en rouge).

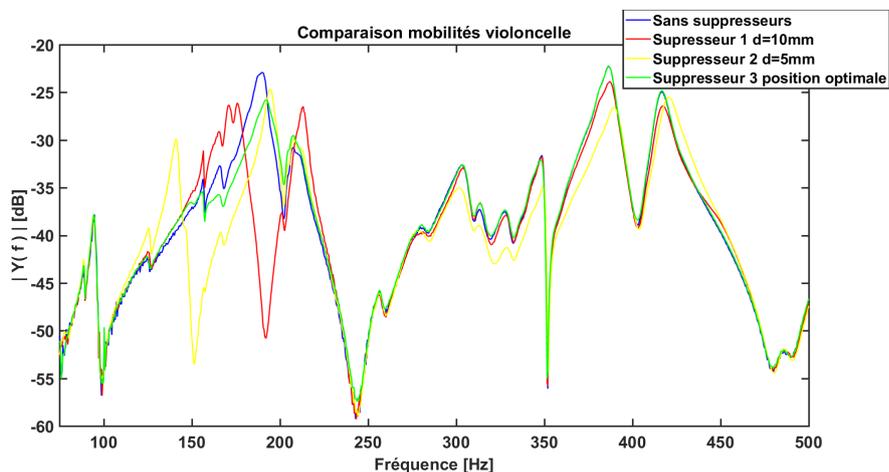


FIGURE 2.20 – Comparaison mesures de mobilité du violoncelle avec les 3 suppresseurs. En bleu, mobilité sans suppresseur, en rouge mobilité avec le suppresseur 1 placé à  $d = 10mm$  du chevalet, en jaune mobilité avec le suppresseur 2 placé  $d = 5mm$  du chevalet et en vert mobilité avec le suppresseur 3 à la position optimale

Comme dit précédemment, on voit clairement que le suppresseur 3 (en vert sur la figure 2.20) est celui qui modifie le moins la signature spectrale du violoncelle. Les anti-rouleurs 1 et 2 (en rouge et en jaune sur la figure 2.20), quant à eux créent des résonances/anti-résonances "parasites" autour du loup. Avec ces deux systèmes un "autre loup" est donc créé autour de  $175Hz$  et  $207Hz$  (anti-rouleur 1) et sur  $141Hz$  (anti-rouleur 2).

Les différences mentionnées ci-dessus se voient aussi sur les  $F_{min}$  d'archet : le supprimeur le plus efficace est le **1** à la fréquence du loup  $f_s \approx 190Hz$  mais c'est celui qui va le plus modifier la jouabilité du violoncelle par rapport au cas sans supprimeur sur les autres notes (voir figure 2.21). Par exemple il crée une nouvelle résonance sur le  $F_2$  ( $\approx 175Hz$ ) de  $1.87N$ , et amplifie la résonance de  $F_{min}$  autour de  $207Hz$  par rapport au cas sans supprimeur. L'anti-rouleur **2** crée une nouvelle résonance autour sur le  $C_2\#$  ( $\approx 141Hz$ ) de  $1.3N$  et modifie peu  $F_{min}$  sur les autres fréquences. Le supprimeur **3** ne modifie pas  $F_{min}$  sur des fréquences autres que celle du loup par rapport au cas sans supprimeur.

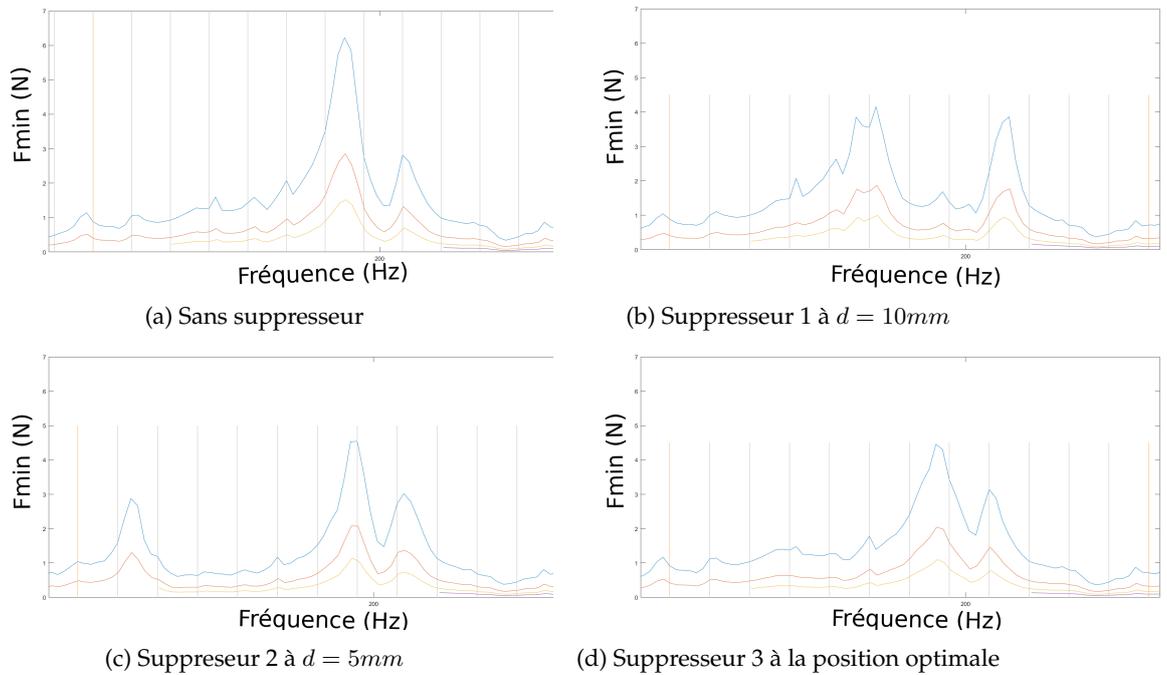


FIGURE 2.21 – Comparaison  $F_{min}$  d'archet des différents anti-rouleurs. En bleu,  $F_{min}$  sur la corde do, en rouge sur la corde de sol, en jaune sur la corde de ré et en violet sur la corde la

Une figure récapitulative sur l'efficacité des trois supprimeurs sur le loup et les modifications spectrales qu'ils introduisent par rapport à la signature spectrale du violoncelle sans supprimeur est à voir sur la figure 2.22.

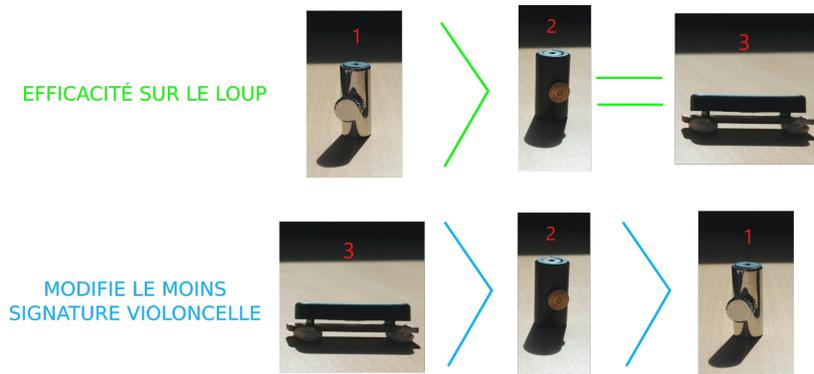


FIGURE 2.22 – Récapitulatif sur l'efficacité et les modifications spectrale qu'introduisent les trois supprimeurs.

## 2.3 Modélisation

Dans cette partie on souhaite modéliser le comportement mécanique d'un anti-rouleur grâce au modèle d'Özgülven.

### 2.3.1 Principe : Modèle de Özgülven

Le principe de ce modèle est détaillé dans [20]. Cette méthode générale utilise des fonctions de transfert et permet d'analyser une structure soumise à des modifications structurelles (dans notre cas structure=violoncelle, et modification structurelle=anti-rouleur). Les modifications structurelles peuvent prendre la forme de composantes structurelles supplémentaires dans les équations mécaniques du système qui peuvent être exprimées en termes de masse, de rigidité et d'amortissement supplémentaire. L'avantage de cette formulation est qu'elle nécessite peu de temps de calcul dans le cas d'un changement local dans une structure par rapport aux équations classique de la mécanique. Dans notre cas nous utiliserons la formulation d'Özgülven lorsque les modifications structurelles introduisent des degrés de liberté supplémentaires dans le système d'origine et lorsque la **liaison entre le système original et l'amortisseur se fait en un point**.

#### 2.3.1.1 Exemple

Pour introduire cette formulation, partons d'un exemple simple d'un système masse ressort à trois degrés de liberté, de masse  $m_1, m_2, m_3$ , de raideur  $k_1, k_2, k_3$  et d'amortissement  $c_1, c_2, c_3$  à voir en figure 2.23.

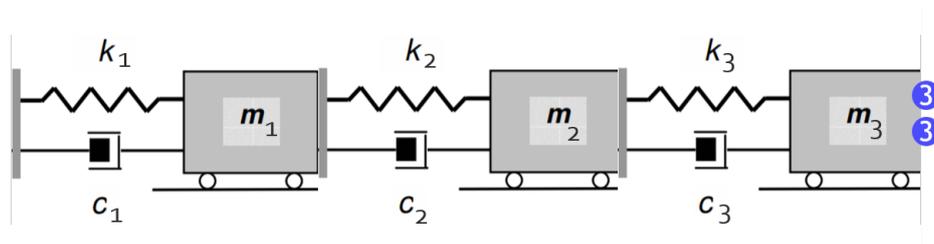


FIGURE 2.23 – Système masse ressort à trois degrés de liberté. Ronds bleus représentent l'excitation et la mesure de la réponse à cette excitation pour le calcul de la fonction de transfert  $H_{33}^O(\omega)$ .

Pour cet exemple on prend comme paramètre de masse :  $m_1 = 0.25kg$ ,  $m_2 = 0.50kg$ ,  $m_3 = 1.00kg$ , comme paramètre de raideur  $k_1 = 1500N/m$ ,  $k_2 = 1500N/m$ ,  $k_3 = 1500N/m$  et comme paramètre de dissipation  $c_1 = 0.001N.s/m$ ,  $c_2 = 0.01N.s/m$  et  $c_3 = 0.1N.s/m$ .

La fonction de transfert de ce système lorsqu'on excite et relève la réponse à cette excitation sur le même point au niveau de la masse 3  $m_3$  (voir figure 2.23, excitation et réponse en rond bleu) est à voir en figure 2.24. On note cette fonction de transfert  $H_{33}^O(\omega)$  car elle vient du rapport entre une réponse et une excitation au même point 3 au niveau de la masse  $m_3$  du **système original**.

On souhaite diminuer le premier mode (de fréquence  $f_1 \approx 3Hz$ ) de ce système en lui fixant ponctuellement un absorbeur dynamique qui possède une seule résonance autour de  $f_{res} \approx 3Hz$  à voir en figure 2.25. L'absorbeur étant correctement accordé sur  $f_1$  il est censé abaisser ce mode.

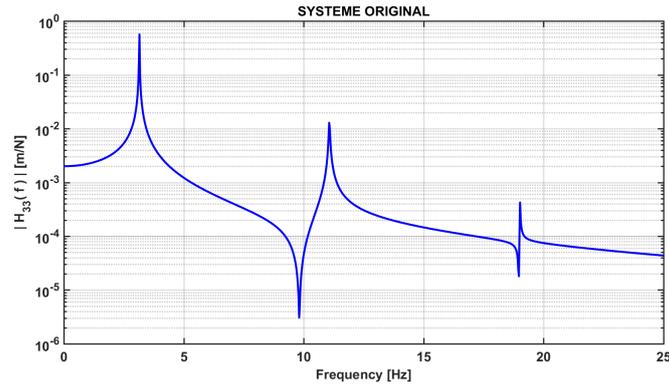


FIGURE 2.24 – Fonction de transfert  $H_{33}^O(\omega)$  du système masse ressort à trois degrés de liberté

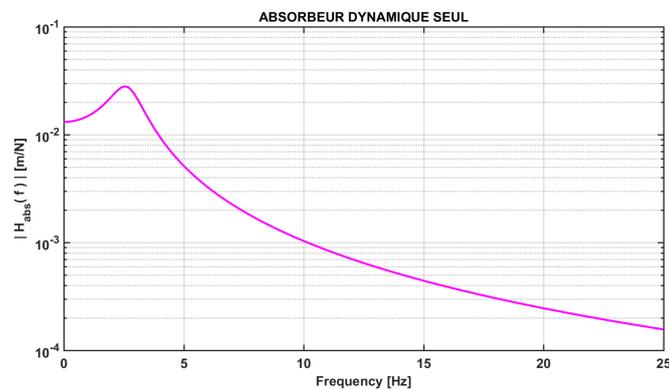


FIGURE 2.25 – Fonction de transfert de l'absorbeur seul

### 2.3.1.2 Formulation du modèle d'Özgülven

Le modèle d'Özgülven permet de calculer la fonction de transfert du **système modifié** à voir en figure 2.26 : système masse ressort + absorbeur dynamique que l'on note  $H^D(\omega)$ .

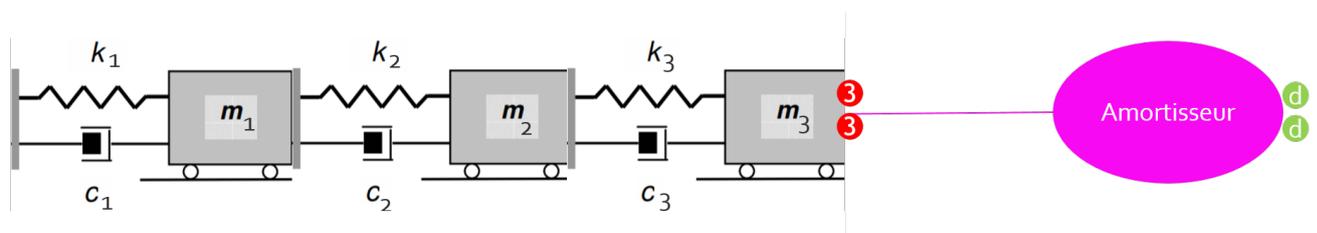


FIGURE 2.26 – Système masse ressort + amortisseur. Ronds rouges représentent l'excitation et la mesure de la réponse à cette excitation pour le calcul de  $H_{33}^D(\omega)$ , et les ronds verts représentent l'excitation et la mesure de la réponse à cette excitation pour le calcul de  $H_{dd}^D(\omega)$ .

La formulation de ce modèle est la suivante :

$$\begin{bmatrix} H_{33}^D(\omega) & H_{3d}^D(\omega) \\ H_{d3}^D(\omega) & H_{dd}^D(\omega) \end{bmatrix} = \left( \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_{33}^O(\omega) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} [D(\omega)] \right)^{-1} \begin{bmatrix} H_{33}^O(\omega) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

avec  $I$  la matrice identité de même dimension que  $H_{33}^O(\omega)$ , et  $D(\omega)$  la matrice de contrainte de l'amortisseur seul, définie comme :

$$[D(\omega)] = -\omega^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & M_d \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} C_d & -C_d \\ -C_d & C_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_d & -K_d \\ -K_d & K_d \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

avec  $M_d$ ,  $C_d$  et  $K_d$ , la masse, l'amortissement et la raideur de l'amortisseur pouvant être déterminés sur la fonction de transfert en figure 2.25. Dans cet exemple on a  $M_d = 0.262kg$ ,  $C_d = 2.16N.s/m$  et  $K_d = 76.16N/m$ .

L'équation 2.2 permet de calculer les fonctions de transfert du système modifié en différents points d'excitation et points de mesures à voir sur la figure 2.26 :

- $H_{33}^D(\omega)$  la fonction de transfert du système modifié quand on vient exciter et mesurer la réponse à cette excitation au point 3
- $H_{3d}^D(\omega)$  la fonction de transfert du système modifié quand on vient exciter au point 3 et mesurer la réponse à cette excitation au point d
- $H_{d3}^D(\omega)$  la fonction de transfert du système modifié quand on vient exciter au point d et mesurer la réponse à cette excitation au point 3
- $H_{dd}^D(\omega)$  la fonction de transfert du système modifié quand on vient exciter et mesurer la réponse à cette excitation au point d

La fonction de transfert du système modifié  $H_{33}^D(\omega)$  par rapport au système original  $H_{33}^O(\omega)$  est affiché sur la figure 2.27. La masse étant correctement accordée sur le premier mode de  $H_{33}^O(\omega)$ , il agit comme un amortisseur sur ce mode et affecte peu les autres modes (comme prévu).

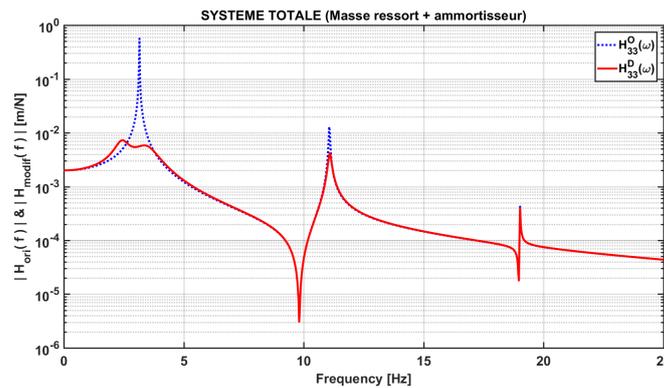


FIGURE 2.27 – Fonction de transfert du système modifié  $H_{33}^D(\omega)$  et du système original  $H_{33}^O(\omega)$

Utilisons cette même formulation (équation 2.2 et 2.3) dans le cas du violoncelle (**système original**) et le violoncelle + anti-rouleur (**système modifié**). En connaissant la dynamique de notre anti-rouleur (à savoir  $D(\omega)$ ), et la fonction de transfert  $H_{33}^O(\omega)$  au point d'application de l'anti-rouleur (le point 3 dans l'exemple précédent), on pourra comparer les fonctions de transfert théoriques et expérimentales du système modifié.

### 2.3.2 Dispositif expérimental

Pour mesurer les différentes fonctions de transfert nous utilisons le même matériel qu'en section 2.2.2, à savoir un marteau d'impact pour l'excitation, un vibromètre laser pour mesurer la réponse à cette excitation et des tiges métalliques pour supporter le violoncelle. De même que dans 2.2.2, on empêche les cordes de vibrer à l'aide de papier en carton et les seuls contacts entre le violoncelle et le support viennent de la pique et de la volute de l'instrument. Nous décidons d'utiliser la formulation de Özgüven avec l'anti-rouleur 3 pour des questions de facilités de mesure : il est plus compliqué de faire des mesures de fonction de transfert sur la partie morte des cordes du violoncelle (réflexion du laser sur une faible surface) que sur sa table d'harmonie du violoncelle..

### 2.3.2.1 Fonction de transfert sur le violoncelle

Les différentes fonctions de transfert à mesurer sur le violoncelle sont à voir en figure 2.28.



FIGURE 2.28 – Fonctions de transferts à mesurées sur le violoncelle

Les fonctions de transfert du violoncelle qui nous intéressent dans l'équation 2.2 (en bleu, rouge et vert), doivent être mesurées au même point en ce qui concerne l'excitation et la réponse. Dans notre cas il est impossible de venir exciter et mesurer la réponse à cette excitation exactement au même point, tout simplement car le laser ne peut être correctement réfléchi. C'est pourquoi le marteau et le laser sont systématiquement écartés de quelques *mm*. A noter que la fonction de transfert  $H_{33}^D(\omega)$  (à voir sur la figure 2.28b) doit être mesurée au point de jonction entre la table d'harmonie et le supprimeur d'après le modèle de Özgüven. Or, il est impossible avec ce matériel, de venir exciter avec le marteau d'impact et recueillir la réponse à cet excitation avec le laser sous le supprimeur. C'est pourquoi, nous nous sommes légèrement décalés du supprimeur sur la gauche pour la mesure de  $H_{33}^D(\omega)$ . Un comparatif des fonctions de transfert mesurées proche de la position optimale  $FRF_1$  (en rouge) et sur la position optimale  $FRF_2$  (en bleu) est à voir en figure 2.29 et montre l'influence de ce décalage sur la mesures des FRF (abrégé de "Fonction De Transfert" en anglais).

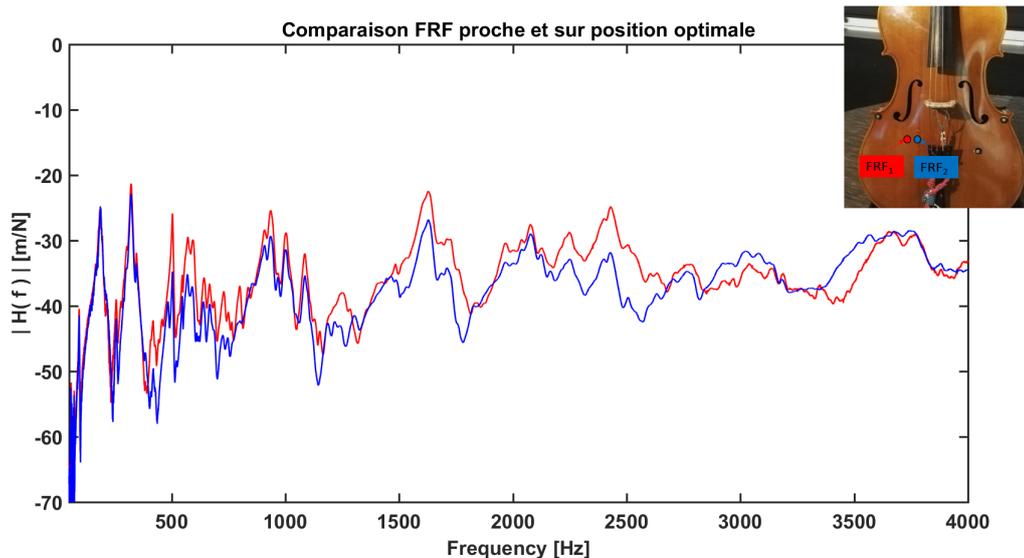


FIGURE 2.29 – Comparaison fonction de transfert proche ( $FRF_1$ ) et sur la position optimale ( $FRF_2$ )

Même si l'écart entre ces deux points de mesure est de quelques *mm*, on s'aperçoit que de grandes

différences apparaissent surtout au delà de  $500Hz$ . Cependant il n'y a quasiment pas de différences au niveau de la fréquence du loup ( $\approx 188Hz$  ici) que l'on soit sur la position optimale ou proche de cette position.

### 2.3.2.2 Fonction de transfert sur le supprimeur

La fonction de transfert à mesurer sur le supprimeur 3 est à voir en figure 2.30. Pour correctement réfléchir le laser, nous disposons sur l'anti-rouleur un papier réfléchissant ne perturbant pas la vibration de celui-ci.

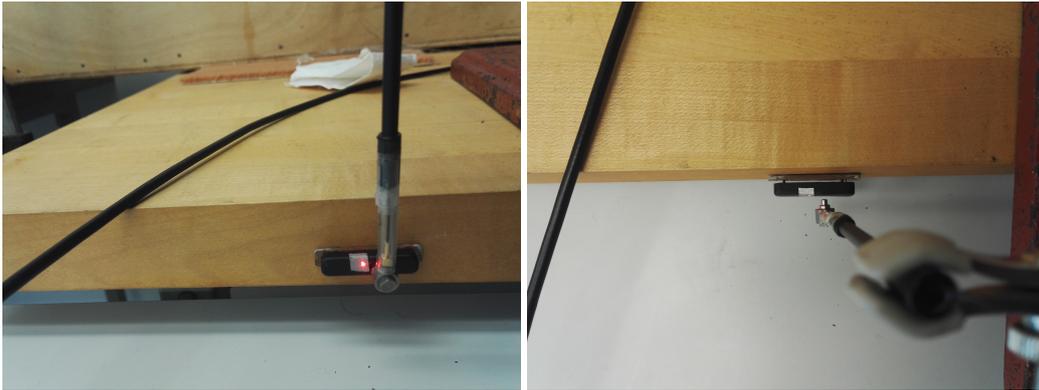


FIGURE 2.30 – Fonction de transfert à mesurer sur le supprimeur pour le calcul du  $D(\omega)$

Elle peut être mesurée de deux manières différentes :

- En tapant au milieu du supprimeur, au quel cas un seul mode apparaît : le mode de translation
- En tapant sur l'extrémité du supprimeur, au quel cas deux modes apparaissent : le mode de translation et le mode de rotation

La formulation de l'équation 2.3 est valable dans le cas où l'on considère uniquement un mode. C'est pourquoi nous déterminerons les paramètres modaux  $M_d$ ,  $C_d$  et  $K_d$  de  $D(\omega)$  uniquement sur le premier mode de l'amortisseur, à savoir le mode de translation.

## 2.3.3 Résultats

### 2.3.3.1 Résultats expérimentaux

Les différentes fonctions de transfert mesurées sur le violoncelle et sur le supprimeur sont à voir en figure 2.31.

Un comparatif des fonctions de transfert avant l'ajout du supprimeur ( $H_{33}^O(\omega)$ ) et après l'ajout du supprimeur ( $H_{33}^D(\omega)$ ) entre  $75Hz$  et  $500Hz$  est à voir en figure 2.32.

On s'aperçoit que le supprimeur vient diminuer la résonance autour de  $160Hz - 190Hz$  et qu'il n'affecte pas les autres modes sur cette bande de fréquence. Cet abaissement au niveau du loup est due à la résonance du supprimeur (voir figure 2.31d) autour de  $f_{res} \approx 160Hz$ . Il vient donc amortir les modes de la caisse autour de  $f_{res}$  comme dans l'exemple du système constitué de trois masses ressorts et d'un amortisseur accordé sur le premier mode du système original à voir en figure 2.27.

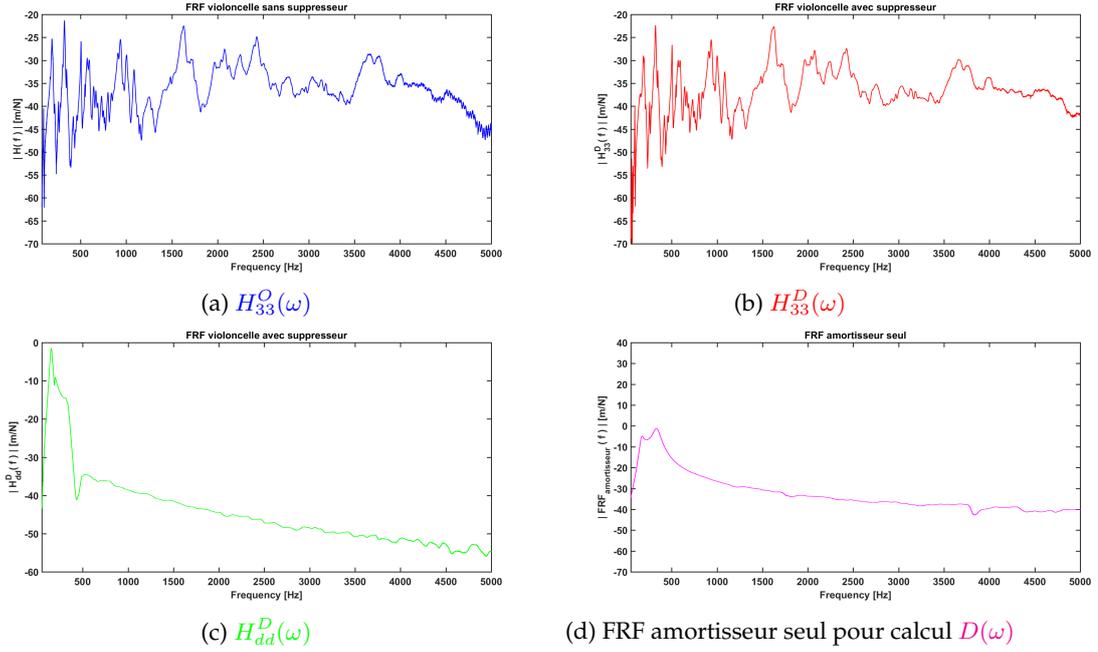


FIGURE 2.31 – Fonctions de transferts mesurées sur le violoncelle et sur le suppresseur

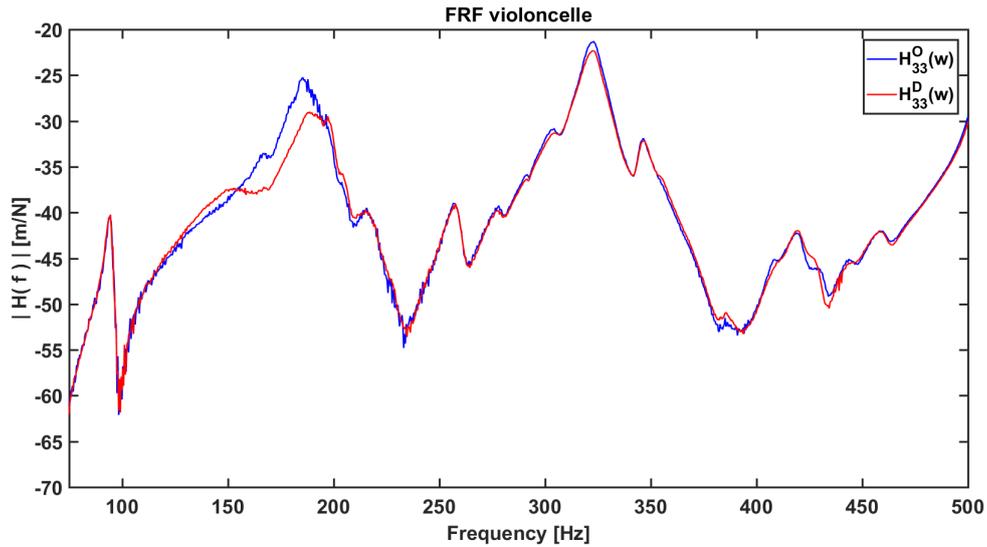


FIGURE 2.32 – Comparaison entre  $H_{33}^O(\omega)$  et  $H_{33}^D(\omega)$

### 2.3.3.2 Résultats théoriques

Pour utiliser la formulation de Özgüven (donnée en équation 2.2) nous avons besoin de la fonction de transfert expérimentale de notre système original, soit  $H_{33}^O(\omega)$  et de la fonction de transfert de l'amortisseur seul permettant de déterminer la matrice  $D(\omega)$  (équation 2.3).

Une analyse modale des différents modes de l'amortisseur est donnée en figure 2.33, et les paramètres modaux associés en table 2.8.

Il faut identifier les paramètres  $M_d$ ,  $C_d$  et  $K_d$  pour calculer  $D(\omega)$  issu de l'équation 2.3. On mesure  $M_d$  en pesant notre amortisseur, soit  $M_d = 8g$ . Par ailleurs  $K_d = M_d \omega_d^2$ , en considérant uniquement le premier mode de vibration de l'amortisseur (Mode 1 sur la figure 2.33 et en table 2.8), on a  $K_d = M_d \omega_1^2 = 1.0315 * 10^4 kg.s^{-2}$ . Enfin  $C_d = 2M_d \omega_d \zeta_d$  avec  $\zeta_d$  le taux d'amortissement défini comme

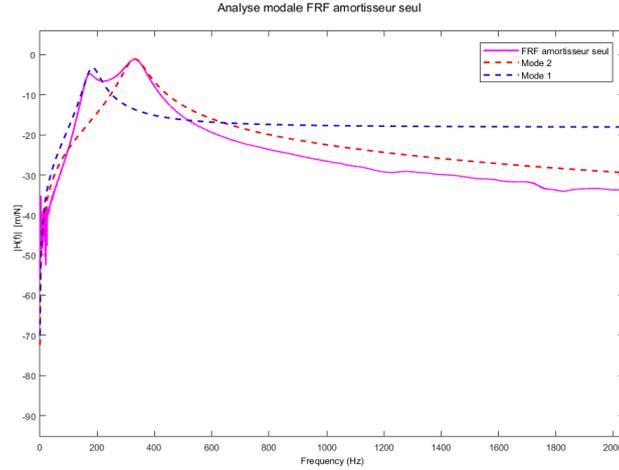


FIGURE 2.33 – Analyse modale sur la fonction de transfert de l’amortisseur seul

Mode	Fréquence (Hz)	Facteur de qualité Q
Mode 1	182.82	3.1
Mode 2	329.52	4.3

TABLE 2.8 – Paramètres modaux de l’amortisseur seul

$\zeta_d = \frac{1}{2Q_d}$ . En ne considérant que le mode 1, on a  $C_d = 2M_d\omega_1 \frac{1}{2Q_1} = 2.5954 kg.s^{-1}$ .

D’où

$$[D(\omega)] = -\omega^2 \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0.008 \end{bmatrix} + i\omega \begin{bmatrix} 2.5954 & -2.5954 \\ -2.5954 & 2.5954 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1.0315 * 10^4 & -1.0315 * 10^4 \\ -1.0315 * 10^4 & 1.0315 * 10^4 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

En appliquant l’équation 2.4 et en utilisant la fonction de transfert expérimentale  $H_{33}^O(\omega)$ , on calcule  $H_{33}^D(\omega)$  et  $H_{dd}^D(\omega)$  grâce à la formulation de Özgüven (équation 2.2). Les résultats obtenus sont en figure 2.34.

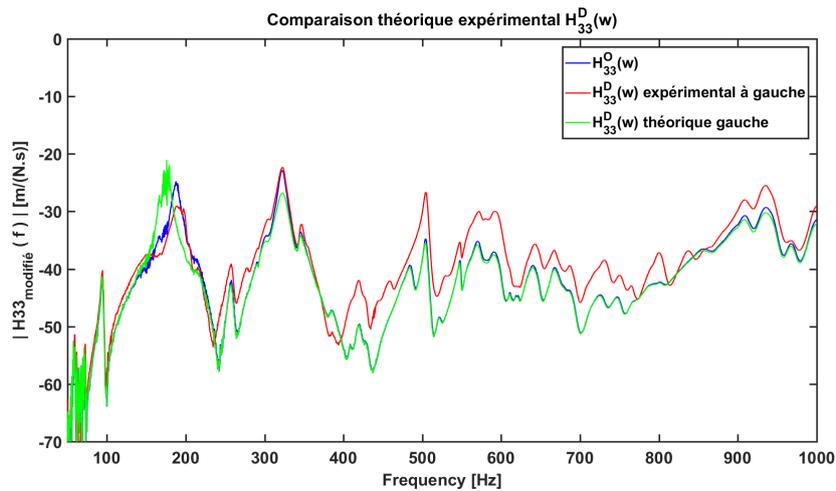


FIGURE 2.34 – Comparaison résultats expérimentaux et théoriques. En bleu fonction de transfert expérimentale du violoncelle sans l’anti-rouleur, en rouge expérimentale violoncelle avec anti-rouleur et en vert résultat théorique dans le cas du violoncelle avec anti-rouleur.

On s'aperçoit que le modèle théorique de Özgüven n'est pas en accord avec les résultats expérimentaux sur l'amortissement du loup autour de  $150Hz - 200Hz$  et sur le pic de fréquence  $322Hz$ . Au delà de de cette fréquence les résultats expérimentaux et théoriques concordent.

Les différences entre le modèle et les résultats expérimentaux peuvent être provenir :

- d'une mauvaise identification des modes de l'amortisseur (facteur d'amortissement pas assez grand)
- de la non prise en compte du deuxième mode de l'amortisseur au quel cas la formulation  $D(\omega)$  serait différente
- des mesures des fonctions de transfert qui doivent se faire en un point, ce qui n'est pas réellement le cas (écart de quelque  $mm$  entre le marteau d'impact et le laser).
- de la fonction de transfert expérimentale  $H_{33}^D(\omega)$  qui doit être mesurée au point de jonction entre la table d'harmonie du violoncelle et le suppresseur (et donc en dessous du suppresseur), or dans notre cas nous l'avons mesurée légèrement à gauche du suppresseur (voir figure 2.28b).
- de la liaison entre amortisseur et table d'harmonie qui est supposée ponctuelle alors que notre amortisseur est fixé en **plusieurs points** sur la table d'harmonie à voir sur la figure 2.35. Si on considère dans un premier temps, qu'il est uniquement fixé sur ses deux extrémités, chaque fonctions de transferts de l'équation 2.2 deviennent des matrices carrés dépendant de ces deux points de fixation. Par exemple la fonction de transfert  $H_{33}^O(\omega)$  doit désormais être mesurée de quatre manières différentes : en tapant sur la première extrémité (noté  $a$ ) et en mesurant la réponse à cette excitation sur cette même extrémité, en tapant sur la première extrémité et en mesurant la réponse à cette excitation sur la deuxième extrémité (noté  $b$ ), en tapant sur la deuxième extrémité et en relevant la réponse à cette excitation sur la première extrémité et enfin en tapant sur la deuxième extrémité et en relevant la réponse à cette excitation sur cette même extrémité. D'où  $H_{33}^O(\omega)$  qui devient la matrice suivante :

$$H_{33}^O(\omega) = \begin{bmatrix} H_{33}^O(\omega)_{aa} & H_{33}^O(\omega)_{ab} \\ H_{33}^O(\omega)_{ba} & H_{33}^O(\omega)_{bb} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

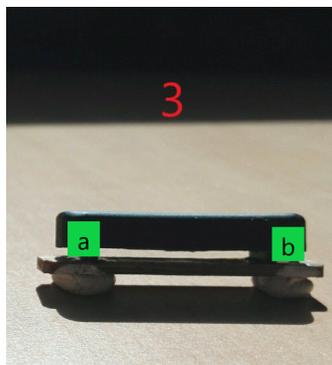


FIGURE 2.35 – Fixation suppresseur 3

## Chapitre 3

# Étude du contrôle gestuel du musicien

Dans cette partie on souhaite remonter aux paramètres d'archet que le musicien utilise pour contrôler le loup, et voir l'influence des anti-rouleur sur la jouabilité de l'instrument mentionnée lors de leur caractérisation en section 2.2.3.

### 3.1 Principe

#### 3.1.1 Marqueur violoncelle/archet

En section 1.3, une discussion sur les différents paramètres impactant la note du loup montre que les mouvements d'archet peuvent permettre au musicien de mieux contrôler le loup. Pour déterminer ces paramètres d'archet nous disposons plusieurs marqueurs sur l'archet et le violoncelle à voir en figure 3.1 et 3.2.

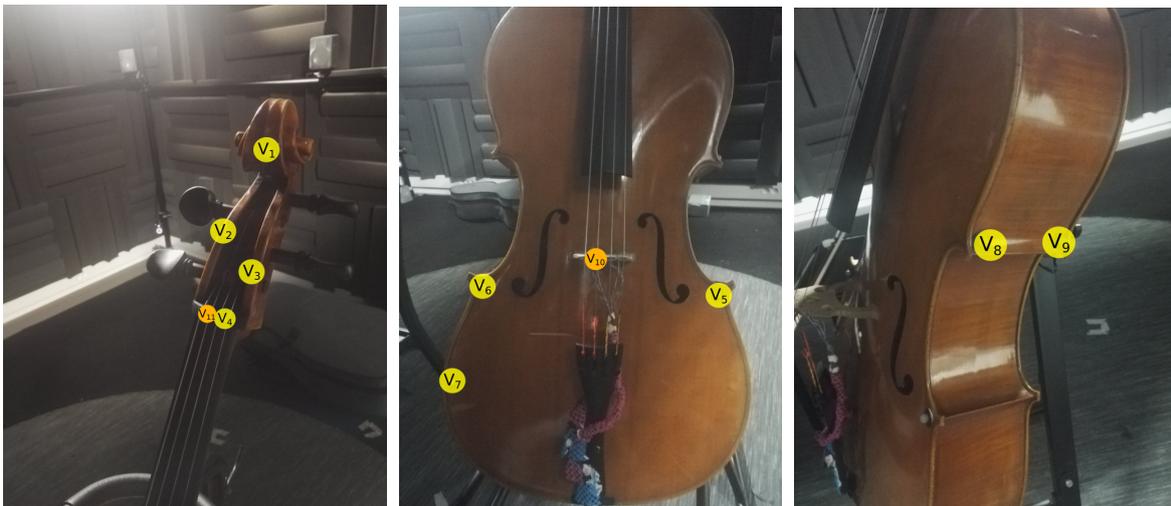


FIGURE 3.1 – Différents marqueurs sur le violoncelle. En jaune marqueurs "fixes" et en orange marqueurs "étalons"

Les marqueurs en orange sur les figures 3.1 et 3.2 sont des marqueurs qui ne sont pas permanents, susceptibles de tomber et seront enlevés lors des sessions de mesure pour ne pas perturber le musicien, c'est pour cela qu'on les nomme "marqueurs étalons". Ils sont très importants lors de la création des différents repères (voir section 3.1.3). Par exemple les marqueurs  $V_{10}$  et  $V_{11}$ , respectivement sur le

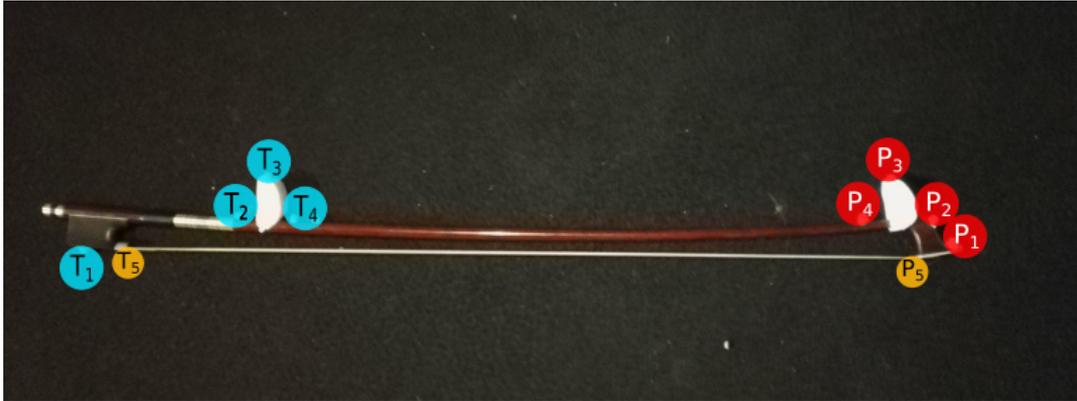


FIGURE 3.2 – Différents marqueurs sur l'archet. En bleu les marqueurs "fixes" du talon de l'archet, en rouge les marqueurs "fixes" de la pointe, et en orange des marqueurs "étalon"

chevalet et au bout de la corde sol du violoncelle, vont permettre de définir spatialement la position de la corde. Les autres marqueurs, que l'on nomme "marqueurs fixes", seront présent tout au long des sessions de mesure (situation de jeu) car ils ne perturbent pas le musicien. Grâce à la position de ces marqueurs dans la salle nous allons pouvoir définir le repère associé au violoncelle et à l'archet grâce au procédé de Gramm-Schmidt détaillé ci dessous.

### 3.1.2 Théorème de Gramm-Schmidt

Soit un vecteur  $\vec{u}_1$  défini dans la base orthonormée  $(\vec{e}_1, \vec{e}_2)$  à voir en figure 3.3.

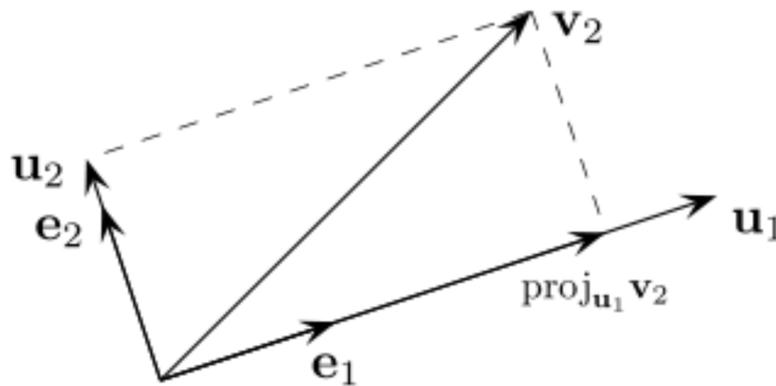


FIGURE 3.3 – Procédé de Gramm-Schmidt sur  $\vec{u}_1$

Si l'on souhaite obtenir un vecteur orthogonal à  $\vec{u}_1$  à partir d'un vecteur non orthogonal à celui-ci noté  $\vec{v}_2$ , l'algorithme de Gramm-Schmidt nous permet de calculer le vecteur  $\vec{u}_2$  orthogonal à  $\vec{u}_1$ . Il suffit de projeter le vecteur  $\vec{v}_2$  sur  $\vec{u}_1$  :

$$proj_{\vec{u}_1}(\vec{v}_2) = \frac{\langle \vec{u}_1, \vec{v}_2 \rangle}{\langle \vec{u}_1, \vec{u}_1 \rangle} \vec{u}_1 \quad (3.1)$$

Le vecteur  $\vec{u}_2$  est ensuite déterminé par l'équation suivante :

$$\vec{u}_2 = \vec{v}_2 - proj_{\vec{u}_1}(\vec{v}_2) \quad (3.2)$$

### 3.1.3 Application théorème de Gramm-Schmidt : calcul des repères

*NB* : Les vecteurs cités ci-dessous sont exprimés dans le repère de la salle  $(x_0, y_0, z_0)$  d'origine  $O$ . Au lieu de noter  $\overrightarrow{OV_5}$  par exemple pour exprimer la position du marqueur  $V_5$  dans la salle, on le notera directement  $\vec{V}_5$  pour des simplicités d'écriture.

Les repères définis ci-dessous sont à voir en figure 3.4.

Dans le cas de l'archet, on définit :

$$\vec{x}_{\text{archet}} = \frac{\vec{P}_5 - \vec{T}_5}{\|\vec{P}_5 - \vec{T}_5\|} \quad (3.3)$$

qui est un vecteur normalisé partant du début de la mèche de l'archet au niveau du talon jusqu'à l'autre bout de la mèche de l'archet au niveau de la pointe.

- Grâce au procédé de Gramm-Schmidt (équation 3.2) avec  $\vec{v}_2 = \vec{T}_2 - \vec{T}_5$  (voir figure 3.2), nous déterminons

$$\vec{z}_{\text{archet}} = \frac{(\vec{T}_2 - \vec{T}_5) - \vec{x}_{\text{archet}} \langle \vec{x}_{\text{archet}}, (\vec{T}_2 - \vec{T}_5) \rangle}{\|(\vec{T}_2 - \vec{T}_5) - \vec{x}_{\text{archet}} \langle \vec{x}_{\text{archet}}, (\vec{T}_2 - \vec{T}_5) \rangle\|} \quad (3.4)$$

qui est un vecteur normalisé orthogonal à  $\vec{x}_{\text{archet}}$  dans le plan de l'archet défini par  $(\overrightarrow{T_5 P_5}, \overrightarrow{T_5 T_3})$

- Et enfin on détermine  $\vec{y}_{\text{archet}}$  en réalisant le produit vectoriel entre  $\vec{z}_{\text{archet}}$  et  $\vec{x}_{\text{archet}}$  :

$$\vec{y}_{\text{archet}} = \frac{\vec{z}_{\text{archet}} \wedge \vec{x}_{\text{archet}}}{\|\vec{z}_{\text{archet}} \wedge \vec{x}_{\text{archet}}\|} \quad (3.5)$$

Dans le cas du violoncelle, on définit le repère de la corde sol :

$$\vec{y}_v = \frac{\vec{V}_{11} - \vec{V}_{10}}{\|\vec{V}_{11} - \vec{V}_{10}\|} \quad (3.6)$$

qui est un vecteur normalisé partant du chevalet au bout de la corde de sol.

- Puis grâce à l'équation 3.2 avec  $\vec{v}_2 = \vec{V}_5 - \vec{V}_6$  (voir figure 3.1), nous déterminons

$$\vec{x}_v = \frac{(\vec{V}_5 - \vec{V}_6) - \vec{y}_v \langle \vec{y}_v, (\vec{V}_5 - \vec{V}_6) \rangle}{\|(\vec{V}_5 - \vec{V}_6) - \vec{y}_v \langle \vec{y}_v, (\vec{V}_5 - \vec{V}_6) \rangle\|} \quad (3.7)$$

qui est un vecteur normalisé orthogonal à  $\vec{y}_v$ , parallèle à la table d'harmonie du violoncelle.

- Et enfin, on détermine  $\vec{z}_v$  en réalisant le produit vectoriel entre  $\vec{x}_v$  et  $\vec{y}_v$  :

$$\vec{z}_v = \frac{\vec{x}_v \wedge \vec{y}_v}{\|\vec{x}_v \wedge \vec{y}_v\|} \quad (3.8)$$

qui est un vecteur normalisé orthogonal à  $\vec{x}_v$  et  $\vec{y}_v$  dirigé de la table d'harmonie vers le haut du chevalet.

### 3.1.4 Calcul des paramètres principaux d'archet

Dans cette partie nous nous intéressons aux différents paramètres d'archet important à analyser.

Les différents paramètres de contrôle de distance à calculer sont définis sur la figure 3.5.

- La distance  $\beta$  entre le point de contact de la corde et l'archet et le chevalet. Au plus  $\beta$  est grand au plus on joue loin du chevalet.

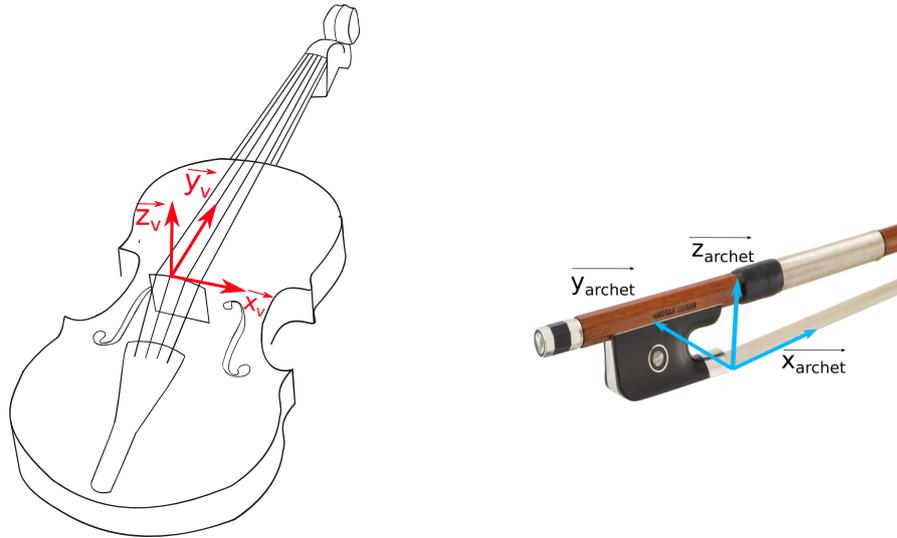


FIGURE 3.4 – Repère du violoncelle et de l'archet

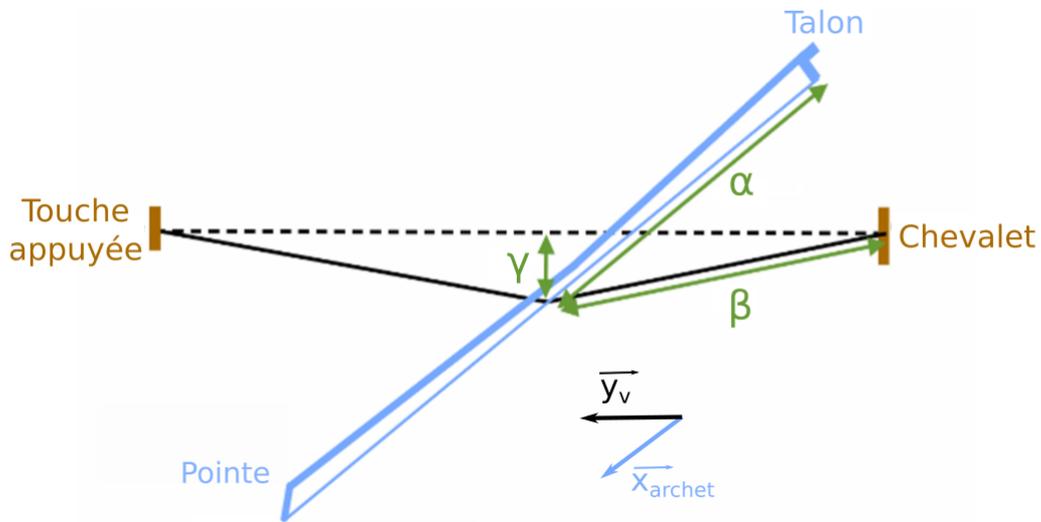


FIGURE 3.5 – Paramètre de contrôle de distance

- La distance  $\alpha$  entre le début de la mèche au niveau du talon et le point de contact entre l'archet et la corde. Ainsi lors d'un tiré (respectivement poussé)  $\alpha$  augmente (respectivement diminue).
- La distance  $\gamma$  correspond à l'enfoncement de la corde par rapport à sa position initiale (en pointillé sur la figure 3.5)

Le calcul de ces différentes distances a été mené dans [19], et leur formulation est la suivante :

$$\beta = (\vec{T}_5 - \vec{V}_{10}) \cdot \frac{\vec{y}_v - \langle \vec{x}_{archet}, \vec{y}_v \rangle \vec{x}_{archet}}{1 - \langle \vec{x}_{archet}, \vec{y}_v \rangle^2} \quad (3.9)$$

$$\alpha = (\vec{T}_5 - \vec{V}_{10}) \cdot \frac{\vec{x}_{archet} - \langle \vec{x}_{archet}, \vec{y}_v \rangle \vec{y}_v}{1 - \langle \vec{x}_{archet}, \vec{y}_v \rangle^2} \quad (3.10)$$

$$\gamma = (\vec{T}_5 - \vec{V}_{10}) \cdot \frac{\vec{x}_{archet} \wedge \vec{y}_v}{\|\vec{x}_{archet} \wedge \vec{y}_v\|} \quad (3.11)$$

Les paramètres de contrôle d'angle entre l'archet et le violoncelle sont représentés à la figure 3.6 :

- L'angle de lacet  $\varphi$  (*skewness* en anglais) est défini de sorte à caractériser la déviation de la direction d'archet  $\vec{x}_{archet}$  par rapport à l'axe de la corde  $\vec{y}_v$ . Par convention il est nul lorsque la direction de l'archet est perpendiculaire à la corde c'est à dire quand le musicien joue « droit ».
- L'angle de tangage  $\theta$  (*inclination* en anglais) définit l'inclinaison de l'archet par rapport au plan des cordes. Il varie d'une corde à l'autre, étant plus grand lorsqu'on joue sur les cordes extérieur do et la et est presque nul lorsqu'on joue sur les cordes du milieu sol et ré.
- L'angle de roulis  $\psi$  (*tilt* en anglais) qui permet de rendre compte du contact entre la mèche et la corde. Il est nul lorsque la mèche est totalement à plat sur la corde (surface de contact maximum entre la mèche et la corde) et augmente lorsque le violoncelliste incline l'archet grâce à un mouvement de torsion du poignet.

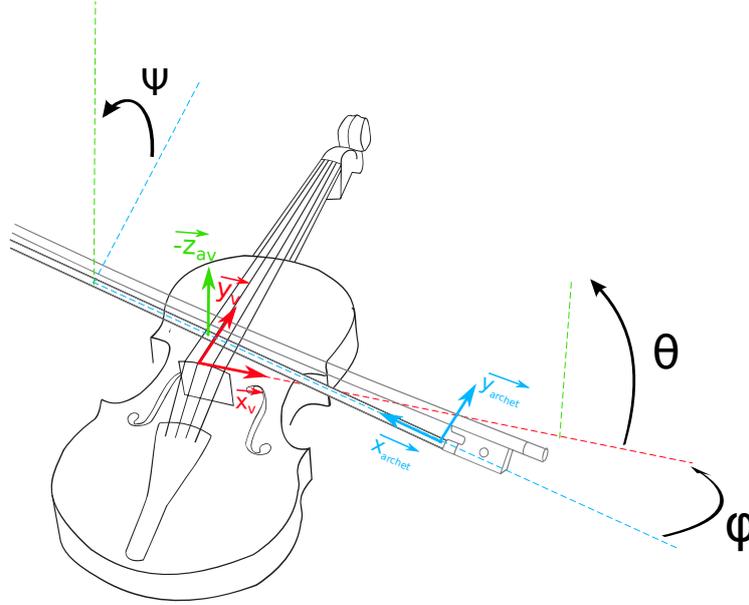


FIGURE 3.6 – Paramètre de contrôle d'angle

Le calcul de ses différents angle a été mené dans [19], et leur formulation est la suivante :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \arccos(\langle \vec{x}_{archet}, \vec{y}_v \rangle) \quad (3.12)$$

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \arccos(\langle \vec{x}_v, \vec{z}_{av} \rangle) \quad (3.13)$$

avec  $\vec{z}_{av}$  vecteur normalisé orthogonal à  $\vec{x}_{archet}$  et  $\vec{y}_v$  :  $\vec{z}_{av} = \frac{\vec{x}_{archet} \wedge \vec{y}_v}{\|\vec{x}_{archet} \wedge \vec{y}_v\|}$  à voir en figure 3.6.

$$\psi = -\frac{\pi}{2} + \arccos(\langle \vec{y}_{archet}, \vec{z}_{av} \rangle) \quad (3.14)$$

Un autre paramètre de contrôle important est la vitesse d'archet. Pour ce calcul nous nous intéressons uniquement au mouvement qui cause le déplacement transverse des cordes, ainsi la composante de la vitesse d'archet qui nous intéresse est celle selon l'axe  $\vec{x}_v$ , soit :

$$v_{archet} = \frac{d\alpha}{dt} \cos(\varphi) \quad (3.15)$$

Grâce aux équations 3.9 à 3.15, on peut déterminer plusieurs paramètres de contrôle importants quant à l'analyse des mouvements d'archet pour contrôler le loup.

### 3.1.5 Position marqueur étalon en situation de jeu

Tout les calculs précédents, que ce soit les calculs de repère de l'archet et du violoncelle, ou le calcul des paramètres de contrôle, dépendent de la position des "marqueurs étalons" en orange sur les figures 3.1 et 3.2. En situation de jeu, ces marqueurs n'étant pas présent, il faut déterminer leur position grâce à celles des "marqueurs fixes" en jaune, bleu et rouge sur les figures 3.1 et 3.2.

Prenons l'exemple du violoncelle dans le cas où on souhaite déterminer la position du chevalet ( $V_{10}$ ) en situation de jeu. Dans une configuration où le violoncelle est immobile, on peut déterminer la position des marqueurs étalons et des marqueurs fixes ainsi que leur distance les uns par rapport aux autres dans le repère de la salle. Nous déterminons alors la position du marqueur  $V_{10}$  dans une base orthonormée associée au violoncelle  $B_1=(\vec{x}_1, \vec{y}_1, \vec{z}_1)$  à voir sur la figure 3.7. Cette base a été déterminée avec pour point d'origine  $V_6$ ,  $\vec{x}_1$  créé à partir des marqueurs  $V_6$  et  $V_5$ , et  $\vec{y}_1$  et  $\vec{z}_1$  grâce au procédé de Gram-Schmidt. La position du marqueur étalon  $V_{10}$  (chevalet) dans cette base  $B_1$  est donc :

$$\overrightarrow{V_6 V_{10}} = \begin{pmatrix} \langle \vec{V}_{10} - \vec{V}_6, \vec{x}_1 \rangle \\ \langle \vec{V}_{10} - \vec{V}_6, \vec{y}_1 \rangle \\ \langle \vec{V}_{10} - \vec{V}_6, \vec{z}_1 \rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{x_1} \\ p_{y_1} \\ p_{z_1} \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

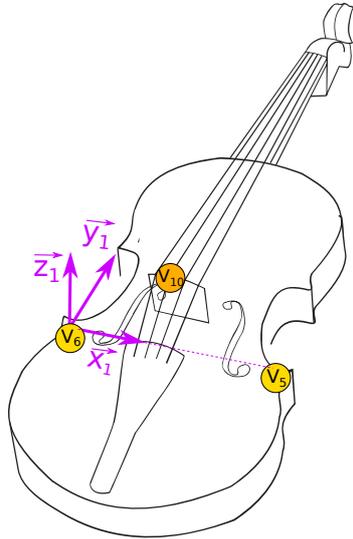


FIGURE 3.7 – Base  $B_1 = (x_1, y_1, z_1)$  avec  $x_1$  créé à partir des marqueurs  $V_6$  et  $V_5$  et  $(y_1, z_1)$  grâce au procédé de Gram-Schmidt

En situation de jeu, en calculant la base  $B_1$  (possible puisqu'elle dépend uniquement des marqueurs fixes) on pourra retrouver la position du chevalet dans cette base :

$$\overrightarrow{V_6 V_{10}} = p_{x_1} \vec{x}_1 + p_{y_1} \vec{y}_1 + p_{z_1} \vec{z}_1 \quad (3.17)$$

Et donc dans le repère de la salle, l'équation 3.17 devient :

$$\vec{V}_{10} = p_{x_1} \vec{x}_1 + p_{y_1} \vec{y}_1 + p_{z_1} \vec{z}_1 + \vec{V}_6 \quad (3.18)$$

Nous réalisons le même processus dans le cas du marqueur étalon placé sur le violoncelle  $V_{11}$  dans la base  $B_1$ , et les marqueurs étalons placés sur l'archet  $T_5$  et  $P_5$  dans une base  $B_2 = (\vec{x}_2, \vec{y}_2, \vec{z}_2)$ . Avec  $\vec{x}_2$  défini par rapport aux marqueurs fixe  $T_1$  et  $P_1$  et les deux autres axes  $\vec{y}_2$  et  $\vec{z}_2$  grâce au théorème de Gram-Schmidt. Ainsi en situation de jeu, nous pourrions déterminer la position des marqueurs étalons  $V_{10}$ ,  $V_{11}$ ,  $T_5$  et  $P_5$  grâce à la base  $B_1$  (associée au violoncelle) et  $B_2$  (associée à l'archet).

## 3.2 Dispositif expérimental

### 3.2.1 Capture de mouvement

Au *LAM* nous disposons d'une salle de capture de mouvement avec dix caméras sensibles à la lumière infrarouge ainsi que du logiciel *Opti Tracks Motive* qui permet de suivre le mouvement des marqueurs disposés sur le violoncelle et l'archet (figure 3.1 et 3.2). La zone de capture de chacune des caméras est à voir en figure 3.8.

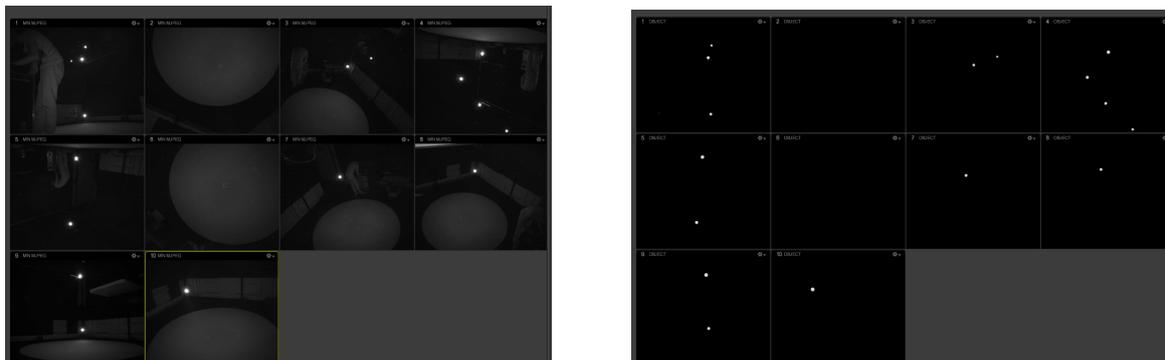


FIGURE 3.8 – Zone de capture des dix caméras. A gauche en noir et blanc, et à droite en infrarouge.

Une étape de calibrage consiste à venir balayer les zones de captures des caméras avec un objet couvert de marqueurs et de définir le repère  $(O, x_0, y_0, z_0)$  de la salle. Les marqueurs utilisés sont en fait des sphères de quelques *mm* d'épaisseur qui réfléchissent la lumière infrarouge émise par les caméras.

Nous créons ensuite sur le logiciel *Opti Tracks Motive* des corps rigides associés au violoncelle, au talon et à la pointe de l'archet à voir sur la figure 3.9.

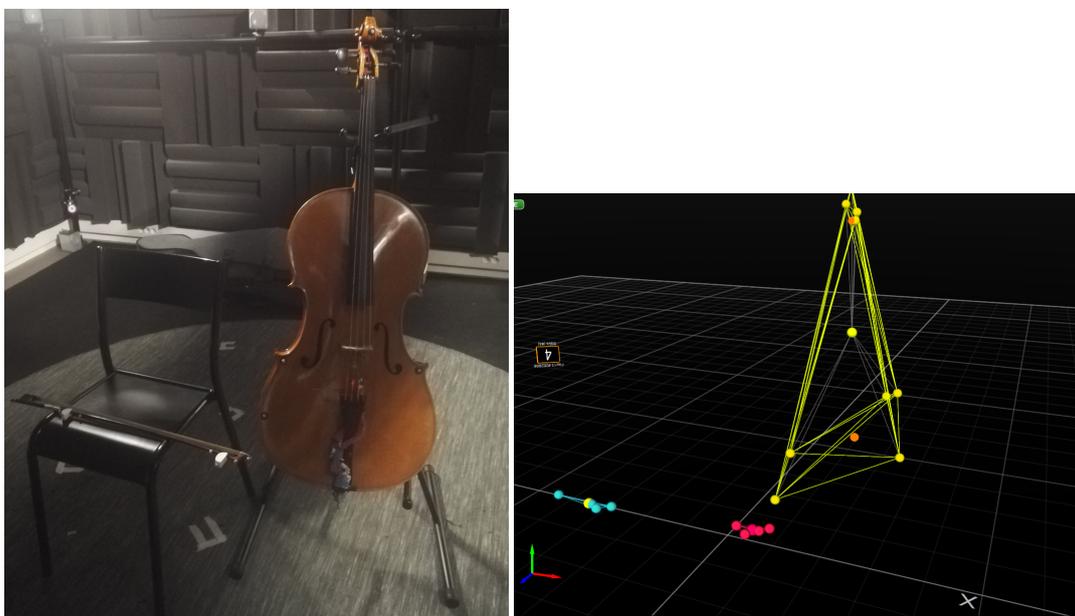


FIGURE 3.9 – A gauche, photo disposition violoncelle + archet immobiles. A droite corps rigide créé sur Motive, en jaune le violoncelle, en bleu clair le talon et en rouge la pointe de l'archet

Un corps rigide est un solide constitué d'un ensemble de points (marqueurs) liés entre eux. Pour définir un corps rigide, le nombre de point le constituant doit être d'au moins trois, et ils doivent être non alignés et asymétriques entre eux. Les liaisons entre chaque point a été défini sur les figures

3.1 et 3.2. La définition des corps rigides permet notamment de compenser la perte visuelle d'un ou plusieurs marqueurs. En effet, si un marqueur n'est plus visible par au moins trois caméras, et qu'il n'appartient pas à un corps rigide, aucune information de position ne sera donnée par le logiciel. Or, lorsqu'il appartient à un corps rigide et qu'il n'est plus visible, la position de ce marqueur dans la salle sera toujours disponible tant que le corps rigide auquel il appartient est constitué d'au moins trois marqueurs.

### 3.2.2 Capteurs piézoélectrique

Un dispositifs de capteur piezoélectrique a déjà été mis en place lors de la thèse de Timothy [19] pour remonter aux mouvements de chacune des cordes du violoncelle à voir sur la figure 3.10. Dans notre cas nous nous intéressons uniquement au capteur piézoélectrique placé sur la corde de sol du violoncelle. La lecture des données issues de ce capteur piézoélectrique se fait de nouveau grâce au script matlab "daqplot" avec une fréquence d'échantillonnage de  $30000Hz$  et pourra permettre de quantifier l'importance du loup ne disposant pas de micro lors des sessions de mesure.



FIGURE 3.10 – Capteurs piézoélectrique placés sur chacune des cordes du violoncelle qui passe à travers un amplificateur avant d'être enregistré sur un ordinateur

## 3.3 Protocole expérimental

Nous organisons une session de mesure avec Adam, un violoncelliste professionnel. L'objectif étant de remonter aux paramètres de contrôle (définis sur les équations 3.9 à 3.15) qu'il utilise pour contrôler le loup et de voir l'influence des anti-rouleurs sur la jouabilité du violoncelle. La caractérisation des trois anti-rouleurs a été réalisée en section 2.2.3. Cependant les mesures de mobilité dont nous nous sommes servis pour écrire le protocole expérimental ont été mesurées avant celles présentées en section 2.2.3 et comportent des erreurs liées au mauvais amortissement des cordes. En effet ces mesures de mobilité étaient composées de certaines résonances de corde qui malheureusement apparaissait autour du loup. Nous avons donc penser que l'anti-rouleur 1 était le plus efficace à  $d = 15mm$  du chevalet et le 2 à  $d = 10mm$  du chevalet alors qu'ils le sont à  $d = 10mm$  et  $d = 5mm$  respectivement d'après le section 2.2.3. Cependant le fait que l'anti-rouleur 1 modifie le plus la jouabilité et la signature du violoncelle par rapport au 2 et encore plus par rapport au 3 (qui ne les modifie pratiquement pas), reste valable lors de ces "fausses" mesures de mobilité. Une comparaison des mobilités de ces supprimeurs à de telle positions est à voir en figure 3.11.

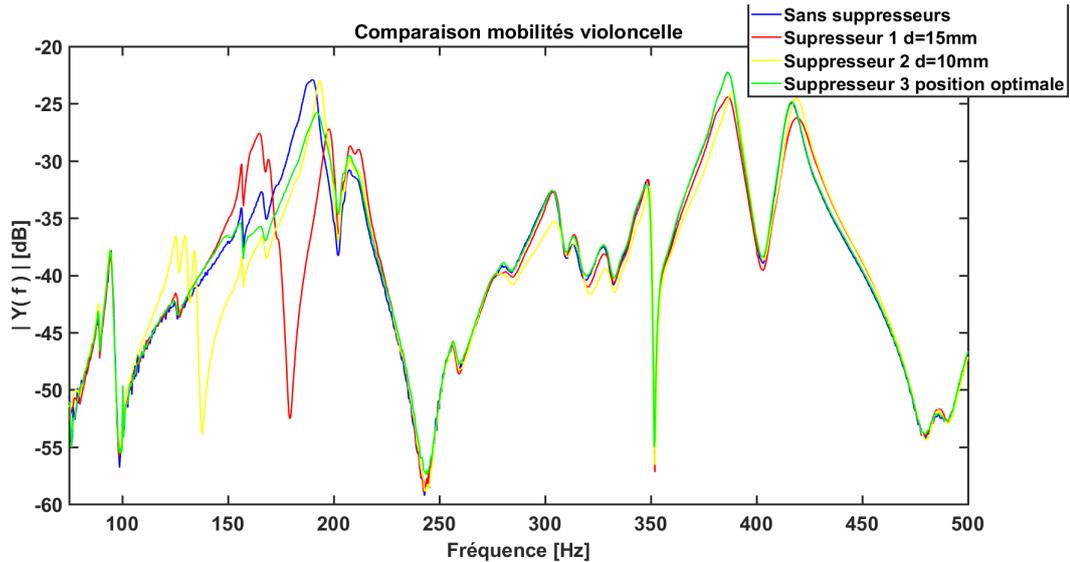


FIGURE 3.11 – Comparaison mesures de mobilité du violoncelle avec les trois supresseurs. En bleu, mobilité sans supresseur, en rouge avec supresseur 1 placé à  $d = 15mm$ , en jaune avec supresseur 2 placé à  $d = 10mm$  et en vert avec supresseur 3 placé sur la position optimale

Le protocole expérimental est divisé en quatre parties définissant les cas où le violoncelle ne présente pas d'anti-rouleur, présente l'anti-rouleur 1, l'anti-rouleur 2 et enfin l'anti-rouleur 3. Chacun de ces cas est composé de quatre étapes :

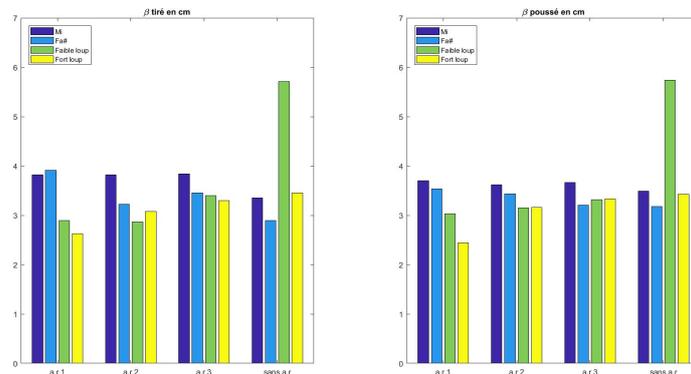
- 1<sup>ère</sup> étape, jouer spontanément un  $E_2 mf$  (fréquence  $164.81Hz$ ).
- 2<sup>ème</sup> étape, jouer spontanément un  $F_2\# mf$  (fréquence  $185Hz$ ), qui est la note du loup.
- 3<sup>ème</sup> étape, lui laisser tout le temps pour essayer de contrôler le loup et faire une mesure lorsqu'il se sent prêt.
- 4<sup>ème</sup> étape, lui laisser tout le temps pour essayer de faire ressortir le plus le loup et faire une mesure lorsqu'il se sent prêt.

La première étape permet de faire jouer à Adam une note "étalon" qui devra être la même tout au long de la session de mesure en terme de paramètre de contrôle d'archet. De plus, le choix de la note  $E_2$  vient du fait qu'à cette fréquence l'anti-rouleur 1 à  $d = 15mm$  crée "un autre loup" à voir en rouge sur la figure 3.11. Il serait donc intéressant de voir sur les signaux piézoélectriques si effectivement un roulement de la note apparaît ou pas. On a choisi la note  $F_2\#$  lors de la deuxième étape tout simplement car c'est le mode  $CBR + B_{1-}$  ( $f_s \approx 189Hz$ ) qui est responsable de l'apparition du loup dans le cas sans supresseur à voir en bleu sur la figure 3.11. Il doit jouer cette note de la même manière tout au long de l'expérience afin qu'elle puisse être une note référence par rapport aux deux étapes qui suivent. Les deux dernière étapes permettent de voir l'adaptation des paramètres de contrôle d'archet pour abaisser ou au contraire faire ressortir le loup. Toutes les notes seront d'abord jouées en tiré puis en poussé. A chaque fin de mouvement, la corde sera stoppée de manière à pouvoir différencier le tiré et le poussé sur le signal issu du capteur piézoélectrique.

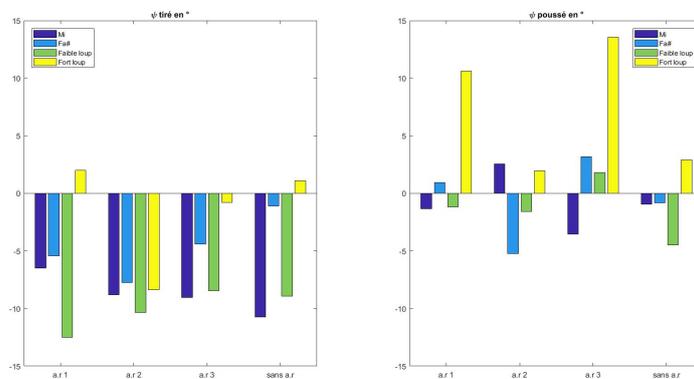
### 3.4 Résultats

Sur la la figure 3.12 sont présentés les différents paramètres de contrôle d'archet qu'utilise Adam lors des quatre étapes dans le cas sans anti-rouleur, avec l'anti-rouleur 1, 2 et 3 (abrégié a.r pour anti-rouleur). A gauche, dans le cas d'un tiré et à droite dans le cas d'un poussé. Seul la distance de l'archet au chevalet,  $\beta$ , l'angle de roulis,  $\psi$  et la vitesse de l'archet  $v_{archet}$  est étudiée dans cette partie, car ce sont les paramètres de contrôle qui varient le plus entre chacune des étapes. Ces paramètres de contrôle ont été moyennés sur le milieu d'un coup d'archet. En effet, en observant les signaux piézoélectriques on s'est rendu compte que le loup émerge souvent au milieu d'un coup d'archet, il

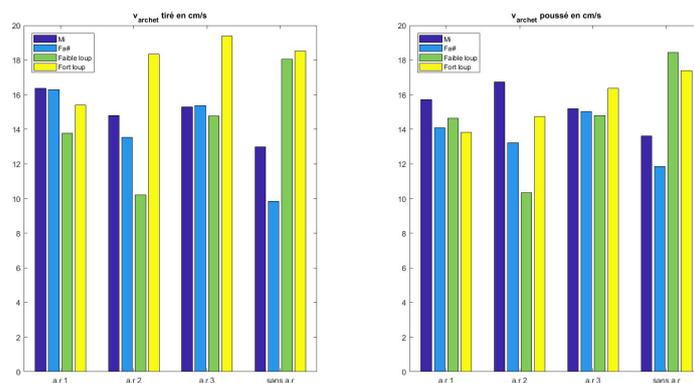
est donc préférable de moyenniser les paramètres de contrôle sur cette zone si on s'intéresse à l'abaissement ou non du loup.



(a) Distance archet par rapport au chevalet en *cm*



(b) Angle de roulis en  $^{\circ}$



(c) Vitesse d'archet en *cm/s*

FIGURE 3.12 – Paramètres de contrôle  $\beta$ ,  $\psi$  et  $v_{archet}$  pour les quatre différentes étapes avec et sans anti-rouleur dans le cas d'un tiré (à gauche) et d'un poussé (à droite). Les paramètres de contrôle ont été moyennés sur le milieu d'un coup d'archet.

### 3.4.1 Répétabilité étapes 1 et 2

Pour rappel, l'étape 1 (en bleu foncé sur la figure 3.12) qui consiste à jouer un  $Mi_2$ , et l'étape 2 (en bleu clair sur la figure 3.12) qui consiste à jouer un  $Fa\#_2$  (la note du loup sur notre violoncelle) permettent de voir si Adam joue ces notes de la même manière tout au long de l'expérience.

**Variation de  $\beta$**  Sur la figure 3.12a, on s'aperçoit que la distance au chevalet de l'étape 1 reste la même dans le cas avec et sans supprimeur. De même l'étape 2 est assez stable en terme de distance au chevalet avec ou sans supprimeur avec des écarts inférieurs à  $5mm$  dans le pire des cas.

**Variation de  $\psi$**  L'angle de roulis, à voir en figure 3.12b est assez stable avec ou sans anti-rouleurs avec des écarts maximum de  $5^\circ$  lorsque Adam joue un  $Mi_2$ . Il en est de même lorsqu'il joue spontanément le  $Fa\#_2$ .

**Variation de  $v_{archet}$**  La vitesse d'archet à voir sur la figure 3.12c est assez stable lorsqu'Adam joue un  $Mi_2$  sauf dans le cas sans anti-rouleur (noté sans a.r) avec des écarts de vitesse supérieurs à  $3cm/s$ . Des écarts supérieurs à  $5cm/s$  apparaissent dans le cas de l'étape 2.

La première étape permet aussi de voir l'influence des anti-rouleurs sur des notes autres que celle du loup sur notre violoncelle. On s'aperçoit sur la figure 3.13, que l'anti-rouleur 1 crée un "autre loup" par rapport au cas sans anti-rouleur. Ce résultat expérimental est en lien direct avec la mesure de mobilité du violoncelle avec cet anti-rouleur, à voir en rouge sur la figure 3.11. En effet on s'aperçoit que le supprimeur 1 est le seul à créer une nouvelle résonance sur le  $Mi_2$  du violoncelle et donc un "nouveau loup".

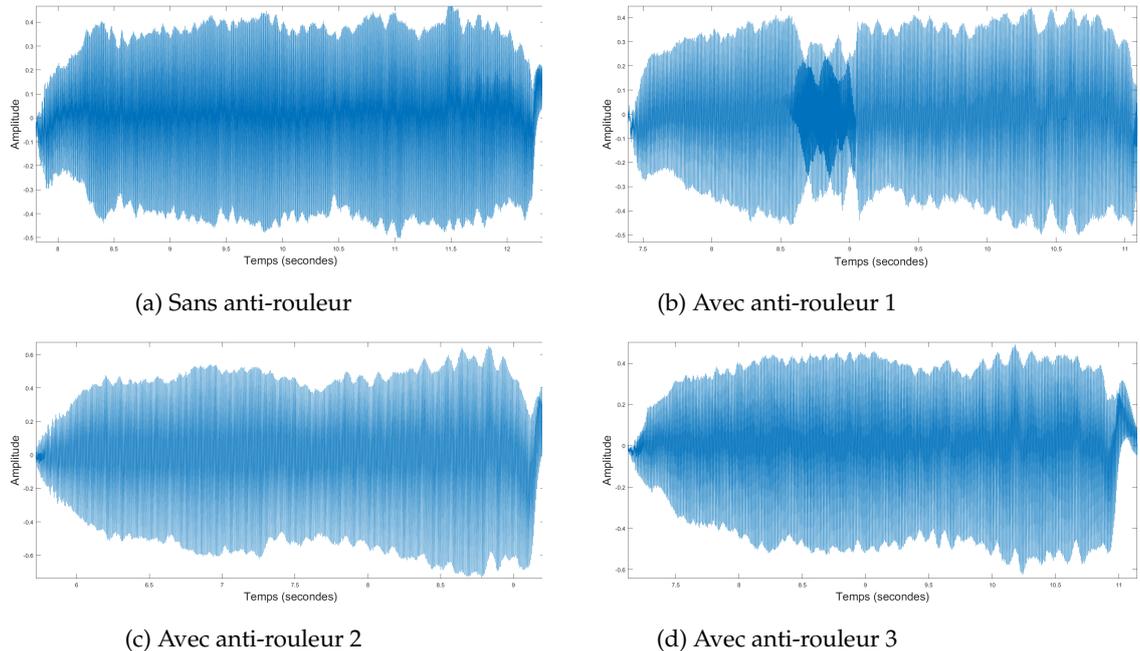


FIGURE 3.13 – Signal piézoélectrique de la corde sol du violoncelle avec et sans supprimeur lorsqu'Adam joue un  $Mi_2$  en poussé

### 3.4.2 Différences entre l'étape et l'étape 4

Pour rappel, l'étape 3 (en vert sur la figure 3.12) et l'étape 4 (en jaune sur la figure 3.12) permettent de voir l'adaptation des paramètres de contrôle d'archet pour abaisser (étape 3) ou au contraire faire ressortir le loup (étape 4).

### 3.4.2.1 Deux différentes techniques de contrôles

On s'aperçoit sur la figure 3.12, que loup apparaît (étape 4 en jaune) lorsqu'Adam met son archet plus proche du chevalet avec un angle de roulis plus grand que son jeu habituel (étapes 1 et 2). En ce qui concerne le paramètre de contrôle de vitesse d'archet, elle est soit plus grande, soit du même ordre de grandeur que quand il joue normalement (étape 1 et 2). Cependant, dans cinq cas sur huit, la vitesse d'archet est plus grande que lors des étapes 1 et 2 quand il veut faire ressortir le loup fortement, avec des différences allant jusqu'à  $8\text{cm/s}$ . Adam nous a aussi mentionné qu'en "ne rentrant pas dans la corde" le loup a beaucoup plus de chance d'émerger.

Il s'est rendu compte durant l'expérience qu'il avait deux possibilités pour contrôler le loup :

- En restant proche du chevalet, au quel cas il doit légèrement diminuer sa vitesse d'archet par rapport à l'étape 1 et 2, et "plus rentrer dans la corde". On nommera désormais cette technique : le *contrôle n° 1*.
- Ou bien en s'éloignant du chevalet avec une vitesse d'archet beaucoup plus grande que lors de l'étape 1 et 2, au quel cas les autres paramètres de contrôle sont beaucoup plus libres. On nommera désormais cette technique : le *contrôle n° 2*.

En effet sur la figure 3.12a et 3.12c, on voit clairement ces deux techniques :

- Pour correctement abaisser le loup (en vert) dans le cas sans anti-rouleur, il utilise le *contrôle n° 2*, à savoir une grande distance de l'archet par rapport au chevalet et une grande vitesse d'archet.
- Il utilise le *contrôle n° 1* dans le cas des trois anti-rouleurs, à savoir une distance d'archet faible par rapport au chevalet et en utilisant une vitesse d'archet globalement plus faible par rapport à l'étape 4 (en jaune).

En ce qui concerne l'angle de roulis (à voir sur la figure 3.12b), dans tout les cas, lorsqu'il souhaite abaisser le loup, il utilise un angle de roulis plus faible que dans le cas où il souhaite le faire ressortir fortement, avec des différences allant jusqu'à  $10^\circ$  dans certains cas (plus notable sur les poussés).

Adam s'est rendu compte de ces deux techniques de contrôle en fin d'expérience, et donc elles apparaissent uniquement dans le cas de l'anti-rouleur 2 et 3 qui ont été testées en fin de séance. Un comparatif de ces deux techniques de contrôle avec l'anti-rouleur 2 et 3 est à voir sur la figure 3.14.

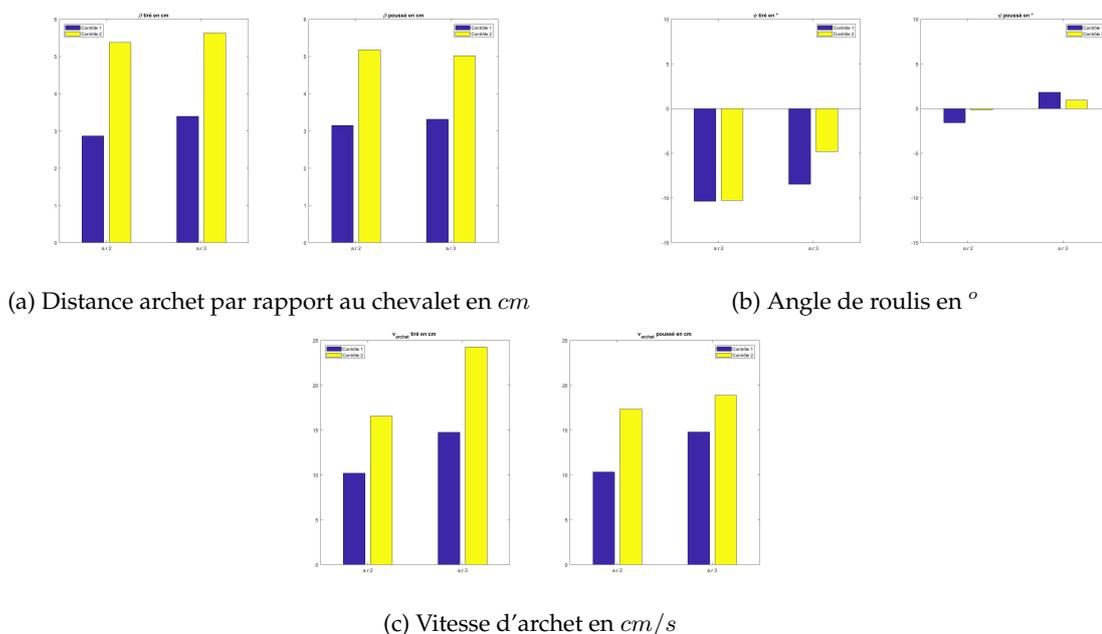


FIGURE 3.14 – Paramètres de contrôle  $\beta$ ,  $\psi$  et  $v_{\text{archet}}$  dans le cadre du "contrôle n° 1 (en bleu) et n° 2 (en jaune) pour un tiré (à gauche) et un poussé (à droite). Les paramètres de contrôle ont été moyennés sur le milieu d'un coup d'archet.

Comme dis précédemment, on s’aperçoit bien sur cette figure, que la technique de *contrôle n° 2* en jaune, utilise une distance de l’archet par rapport au chevalet et une vitesse d’archet plus grande par rapport à la technique de *contrôle n° 1* en bleu foncé. Les angles de roulis, quant à eux, sont assez proches dans les deux cas et restent bien inférieurs à l’étape 4 (fort loup).

### 3.4.2.2 Quel anti-rouleur est le plus efficace ?

Pour observer l’efficacité des anti-rouleur sur l’apparition ou non du loup on se sert des signaux piézoélectriques de l’étape 4. En effet en calculant le rapport entre le temps d’apparition du loup et le temps total du coup d’archet (à voir sur le figure 3.15 par exemple), on peut quantifier quel supprimeur est le plus efficace pour abaisser le loup.

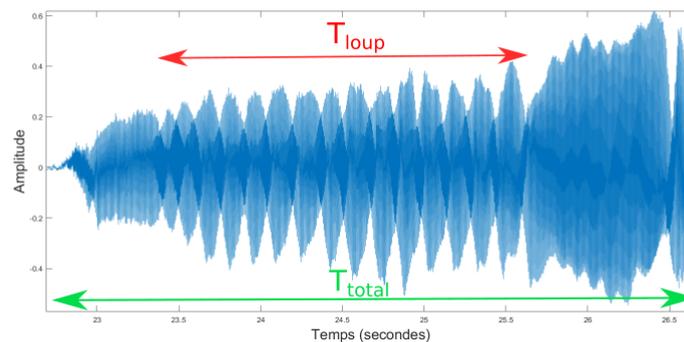


FIGURE 3.15 – Calcul de l’émergence du loup sur un signal piézoélectrique

Ce calcul "d’émergence du loup" pour les différents tirés et poussés de l’étape 4 est donné dans le tableau 3.1.

Configuration	Émergence loup tiré (en %)	Émergence loup poussé (en %)
Sans anti-rouleur	74	93
Anti-rouleur 1	16	25
Anti-rouleur 2	56	60
Anti-rouleur 3	50	56

TABLE 3.1 – Émergence du loup avec et sans supprimeur calculé à partir des signaux piézoélectriques de l’étape 4.

On s’aperçoit sur cette table, que les anti-rouleurs ont tous diminué l’apparition du loup, que l’on soit en tiré ou en poussé, car l’émergence du loup est bien plus faible que dans le cas sans anti-rouleur. Par ailleurs, quelle que soit la configuration, l’émergence du loup est plus forte dans le cas d’un poussé que d’un tiré. Le supprimeur le plus efficace est l’anti-rouleur 1 qui diminue de 58% l’apparition du loup par rapport au cas sans anti-rouleur dans le cas d’un tiré et de 68% dans le cas d’un poussé. Les deux autres supprimeurs sont beaucoup moins efficaces que celui-ci, et sont à peu près équivalents, avec un léger avantage pour l’anti-rouleur 3. Ces résultats sont en accord avec les mesures de mobilités de la partie 2.2.3 qui montre que le supprimeur le plus efficace sur le loup est le 1.

### 3.4.3 Adaptation des paramètres de contrôle

Dans cette partie on souhaite voir comment les paramètres de contrôle d'archet d'Adam varient d'un fort à un faible loup. On se place dans le cas où le violoncelle ne présente pas d'anti-rouleur, uniquement pour des poussés (présence du loup plus importante que dans le cas de tirés) et en utilisant les deux techniques de contrôle précédemment étudiées. Adam dispose de cinq poussés consécutifs pour passer d'un fort loup à un loup quasi inexistant.

#### 3.4.3.1 Contrôle $n^{\circ} 1$

Sur la figure 3.16 sont affichés les différents paramètres de contrôle pour passer d'un fort loup (poussé 1) jusqu'à un faible loup (poussé 5) avec la technique de contrôle  $n^{\circ} 1$ .

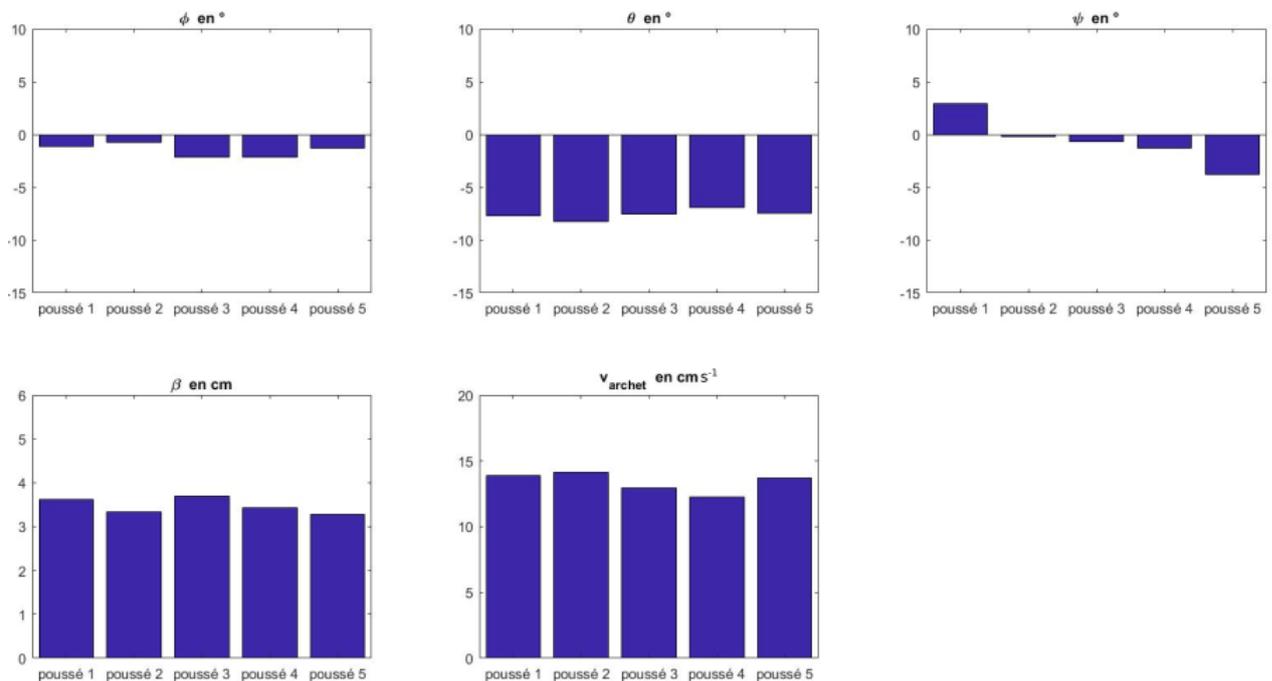


FIGURE 3.16 – Paramètres de contrôles  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $\beta$  et  $v_{\text{archet}}$  dans le cadre du contrôle  $n^{\circ} 1$  sur 5 poussés moyennés sur le milieu d'un coup d'archet

En ce qui concerne les angles de lacet, noté  $\varphi$ , et de tangage, noté  $\theta$ , il existe peu de variation entre les poussés 1 à 5. La distance au chevalet  $\beta$  et la vitesse d'archet  $v_{\text{archet}}$  sont à peu près les mêmes sur les cinq poussés. Seul l'angle de roulis, noté  $\psi$ , varie plus fortement. Ces deux derniers résultats sont en accord avec les résultats de la partie 3.4.2.1 qui montre que seul l'angle de roulis, et donc le contact entre la mèche et la corde, a une influence sur la réduction du loup avec cette technique de contrôle. À noter qu'un autre paramètre, non mesuré ici, est la force d'archet, qui peut jouer un rôle très important quand à l'abaissement du loup.

#### 3.4.3.2 Contrôle $n^{\circ} 2$

Sur la figure 3.17 sont affichés les différents paramètres de contrôle pour passer d'un fort loup (poussé 1) jusqu'à un faible loup (poussé 5) avec la technique de contrôle  $n^{\circ} 2$ .

De même que précédemment, on s'aperçoit que les angles de lacet, noté  $\varphi$ , et de tangage, noté  $\theta$ , varient peu entre les poussés 1 à 5. On voit clairement sur cette figure, qu'il y a une augmentation

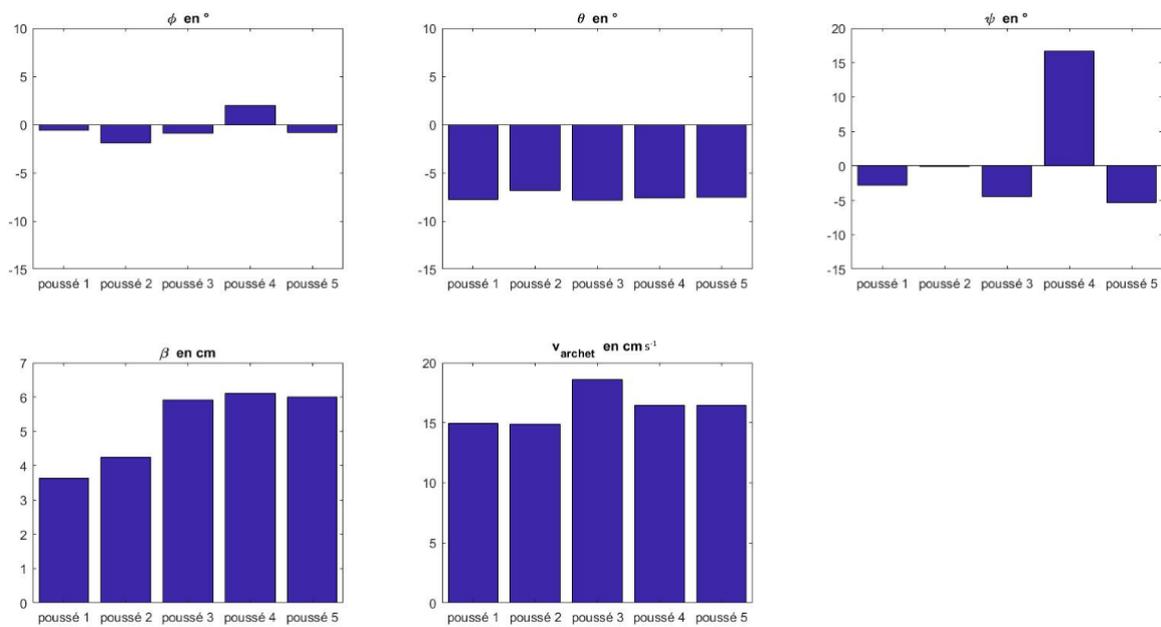


FIGURE 3.17 – Paramètres de contrôles  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $\psi$ ,  $\beta$  et  $v_{\text{archet}}$  dans le cadre du contrôle n° 2 sur 5 poussés moyennés sur le milieu d'un coup d'archet.

de  $\beta$  et de  $v_{\text{archet}}$  au fur et à mesure qu'Adam veut abaisser le loup (avec un léger saut de vitesse pour le poussé n° 3), ce qui est en accord avec les résultats de la partie 3.4.2.1. En ce qui concerne l'angle de roulis, noté  $\psi$ , il semble être indépendant de la présence d'un fort loup ou non. Adam semble donc être plus libre de ses mouvements avec la technique de contrôle n° 2, il tente plus de choses.

## Chapitre 4

# Conclusion et Discussion

Tout d'abord, durant ce stage, nous avons étudié l'influence des anti-rouleurs sur la jouabilité et la signature spectrale du violoncelle. Les mesures de mobilités nous montrent que le supprimeur 1 est le plus efficace sur le loup (forte réduction de la force minimum d'archet autour de la fréquence du loup) mais en contre partie il modifie fortement la signature du violoncelle. Ceci a pu être vérifié lors des mesures avec Adam, puisqu'en effet, même si l'émergence du loup a fortement diminuée avec la mise en place de cet anti-rouleur il a créé un roulement sur la note  $Mi_2$  qui n'existait pas auparavant. Le supprimeur 2 quant à lui est beaucoup moins efficace que le 1. Cela se voit aussi bien sur les mesures de mobilité que lors de la session de mesures avec Adam. Il agit de la même manière que le supprimeur 3 sur le loup mais modifie fortement la signature spectrale du violoncelle par rapport à celui-ci. C'est pourquoi, cette étude montre que l'éliminateur le plus apte à abaisser le loup sans pour autant trop modifier le timbre de l'instrument est le 3. D'autres mesures de mobilité aurait été intéressantes à faire notamment dans le cas des supprimeurs 1 et 2 en les accordant correctement (méthode issue de [16]) pour qu'il soit le plus efficace possible. Une tentative de modélisation de l'anti-rouleur 3 a été faite à travers le modèle de Özgüven et n'a pas été concluante en raison de la simplicité du modèle par rapport à la pratique (liaison ponctuelle entre l'amortisseur et la table d'harmonie, prise en compte d'un seul mode du supprimeur, fonctions de transferts pas mesurées exactement en un point, fonctions de transferts pas mesurées au point de jonction entre l'amortisseur et la table...). La plus grosse erreur peut venir du fait qu'on ait considéré que la liaison entre le supprimeur et la table d'harmonie se fait en un point alors qu'en réalité elle se fait en deux points, ce qui change la formulation de la matrice  $D(\omega)$  et la taille des matrices des fonctions de transferts utilisées dans le modèle. Une étude intéressante, dans le prolongement de ce travail, serait d'utiliser ce modèle dans le cas des anti-rouleurs 1 et 2 en utilisant les bonnes hypothèses (liaison entre les supprimeurs et la corde en deux points? plusieurs points?).

Dans un second temps, ce stage vise à déterminer les différents paramètres de contrôle qu'un violoncelliste professionnel utilise pour maîtriser le loup. Lors de notre session de mesure, on s'est rendu compte que le loup apparaît pour de faibles distances d'archet par rapport au chevalet, des vitesses et angles de roulis assez élevés, et qu'Adam utilise deux techniques bien différentes pour le contrôler. La première, qui consiste à venir placer l'archet proche du chevalet avec des vitesses d'archet normale pour le jeu d'Adam et des angles de roulis assez faibles, et la seconde, qui consiste à venir écarter l'archet du chevalet avec des vitesses d'archet bien plus grandes et beaucoup plus de liberté sur l'angle de roulis. Des mesures avec d'autres musiciens sont nécessaires pour voir si tous, utilisent ces deux techniques de contrôle ou bien si chacun d'eux a sa propre technique de contrôle. Par ailleurs, par manque de temps, de pratique et de connaissance (Timothy Wofford n'était pas sur Paris lors de mon stage) nous n'avons pas pu utiliser le capteur de force disponible au LAM qui nécessite une longue étape de calibration. Il est évident que la force d'archet a une forte influence sur le loup puisqu'elle apparaît dans tous les diagrammes de jouabilité des instruments à cordes frottées et qu'Adam nous a souvent utilisé le terme "rentrer dans la corde" qui doit être synonyme de force pour lui. Cependant, même si nous avons accès à une pseudo force, avec le calcul de l'enfoncement (équation 3.11), nous n'avons pas pu en tirer des conclusions puisqu'il dépend de la distance de l'archet par rapport au chevalet (enfoncement plus faible proche du chevalet) et de la position de l'archet par rapport à la corde (enfoncement plus fort au milieu d'un coup d'archet). Ainsi pour

comparer deux enfoncements, il aurait fallu être à un même  $\beta$  et un même  $\alpha$  (ce qui est très rare lors des mesures que l'on a faites). Dans le prolongement de ce travail il serait donc nécessaire d'utiliser un capteur de force, primordiale à l'étude du loup. Une autre étude intéressante, serait de pouvoir quantifier automatiquement la forte présence ou non d'un loup dans les signaux piézoélectriques. En effet, dans notre cas le calcul de l'émergence du loup se fait manuellement en calculant le temps d'apparition du loup sur la longueur du signal total. Or, ce travail peut vite devenir fastidieux si on fait beaucoup de session de mesures avec plusieurs musiciens. Ainsi, il serait utile de créer un algorithme de traitement de données détectant les temps d'apparition du loup sur un signal.

# Bibliographie

- [1] Anders Askenfelt. Eigenmodes and tone quality of the double bass. *J. Catgut Acoust. Soc. Newslett*, 38 :34–39, 1982.
- [2] CV Raman. On the “wolf-note” of the violin and’cello. *Nature*, 97(2435) :362, 1916.
- [3] John C Schelleng. The violin as a circuit. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(3) :326–338, 1963.
- [4] ME McIntyre and James Woodhouse. The acoustics of stringed musical instruments. *Interdisciplinary Science Reviews*, 3(2) :157–173, 1978.
- [5] Chandrasekhara Venkata Raman. Experiments with mechanically-played violins. 1920.
- [6] John C Schelleng. The bowed string and the player. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 53(1) :26–41, 1973.
- [7] PM Galluzzo and J Woodhouse. High-performance bowing machine tests of bowed-string transients. *Acta Acustica united with Acustica*, 100(1) :139–153, 2014.
- [8] Erwin Schoonderwaldt, Knut Guettler, and Anders Askenfelt. An empirical investigation of bow-force limits in the schelleng diagram. *Acta Acustica united with Acustica*, 94(4) :604–622, 2008.
- [9] James Woodhouse. On the playability of violins. part ii : Minimum bow force and transients. *Acta Acustica united with Acustica*, 78(3) :137–153, 1993.
- [10] Ailin Zhang. *Playability of bowed string instruments*. PhD thesis, University of Cambridge, 2015.
- [11] CE Gough. The resonant response of a violin g-string and the excitation of the wolf-note. *Acta Acustica united with Acustica*, 44(2) :113–123, 1980.
- [12] Hossein Mansour, Jim Woodhouse, and Gary P Scavone. On minimum bow force for bowed strings. *Acta Acustica united with Acustica*, 103(2) :317–330, 2017.
- [13] G Gideon. Evasive manoeuvres of bowed-string instruments : The effect of wolf suppressors on wolf tones. In *Proceedings of the International Conference on Noise and Vibration Energy 2014*, pages 337–341, 2014.
- [14] Vincent Debut, Octavio Inacio, Thibaut Dumas, and Jose Antunes. Modelling and experiments on string/body coupling and the effectiveness of a cello wolf-killing device. In *Proceedings of 20th International Symposium on Music Acoustics, Sydney and Katoomba, Australia*, 2010.
- [15] V Debut, J Antunes, and O Inácio. Linear modal stability analysis of bowed-strings. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(3) :2107–2120, 2017.
- [16] JC Schelleng. Adjusting the wolftone suppressor. *American String Teacher*, 17(1) :9–11, 1967.
- [17] Erwin Schoonderwaldt and Matthias Demoucron. Extraction of bowing parameters from violin performance combining motion capture and sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(5) :2695–2708, 2009.
- [18] Erwin Schoonderwaldt. The player and the bowed string : Coordination of bowing parameters in violin and viola performance. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(5) :2709–2720, 2009.
- [19] Timothy Wofford. *Study of the interaction between the musician and the instrument. Application to the playability of the cello*. PhD thesis, Sorbonne université, 2018. non publiée.

- [20] H Nevzat Özgüven. Structural modifications using frequency response functions. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 4(1) :53–63, 1990.
- [21] Eric Bynum. Modal analysis of the violoncello. 1997.
- [22] Sarah Mnatzaganian Robin Aitchison. Taming wolf notes. *News for Cellists Spring 2005*, 2005.