

Traduit de **The cello tailpiece: how it affects the sound and response of the instrument.**

Eric FOUILHE, Giacomo GOLI, Anne HOUSSAY, George STOPPANI.

1. Laboratory of Mechanics and Civil Engineering, University Montpellier 2, CNRS .
 2. Researcher at DEISTAF, University of Florence
 3. Musée de la Musique, cité de la musique, Paris
 4. Violin maker, acoustician researcher, Manchester
- ericf26@gmail.com
-

RÉSUMÉ

L'application de méthodes scientifiques modernes et de techniques de mesure permet d'étendre les connaissances empiriques utilisées depuis des siècles par les luthiers pour la fabrication et l'ajustement du son des violons, altos et violoncelles. Des accessoires tels que les cordes et les cordiers ont récemment fait l'objet d'études portant sur leur style et leur cohérence historique, après avoir été quelque peu négligés par les chercheurs par le passé. Ces éléments ont pourtant joué un rôle important dans l'histoire de ces instruments, mais ont largement disparu au fur et à mesure de leur modernisation.

Cependant, la mécanique de ces accessoires contribue de manière significative à la production sonore, selon des modalités qui ont évolué au fil du temps en fonction des esthétiques musicales et des contextes techniques. Il est donc nécessaire d'approfondir la compréhension de la fonction et de la contribution musicale des cordes et des cordiers.

Avec cette recherche, nous cherchons à comprendre les modifications du son du violoncelle résultant des caractéristiques du cordier (forme du cordier et types de fixation). Une analyse modale a été utilisée pour étudier d'abord les modes de vibration du cordier monté sur un banc d'essai non réactif, puis lorsqu'il est monté sur un violoncelle réel, où il peut interagir avec les modes du corps de l'instrument.

Dans cet article, une étude préliminaire de l'effet de la longueur du cordon de cordier sera présentée.

1. Introduction

Ce modèle peut être trouvé sur le site de la conférence : <http://viennatalk.mdw.ac.at>. Ce modèle peut être trouvé sur le site de la conférence. {doublon}

1.1. Histoire

Depuis le Moyen Âge, les cordes des instruments à archet pouvaient être attachées à une cheville située au bas de la caisse de résonance (violons, altos, kits, saranghis), ou fixées à une pièce de cuir, de tissu ou à une corde en boyau. L'iconographie montre qu'à la Renaissance, pour les violons et les violes, une pièce de bois d'abord découpée en une forme complexe, puis simplifiée en une forme plate en queue d'aronde, était utilisée.

Des cordiers des XVII^e, XVIII^e, XIX^e et XX^e siècles, tant pour la famille des violes que pour celle du violon, sont conservés au Musée de la musique à Paris, et ils témoignent des évolutions

survenues au fil des siècles.

La surface supérieure du cordier devient plus arrondie à la fin du XVIII^e siècle, ce qui augmente l'angle des cordes latérales sur le chevalet, et donc la force verticale exercée sur la caisse de résonance par ces cordes. Cela révèle une recherche d'un son plus puissant et d'un meilleur équilibre entre les cordes médium, aiguës et graves.

Une petite frette fut également ajoutée afin d'obtenir un « accord » défini de la longueur après chevalet, alors qu'auparavant les cordes n'avaient pas de point d'arrêt précis du côté du cordier.

Le violoncelle adopte sa taille actuelle vers 1700, après l'invention des cordes filées lourdes, remplaçant ainsi l'ancien violon basse, plus grand et équipé de cordes en boyau beaucoup plus épaisses.

Aujourd'hui, dans sa configuration moderne, le violoncelle possède un cordier pouvant être en bois dur, en métal ou en plastique, et comporte le plus souvent quatre tendeurs permettant de maintenir et d'accorder finement quatre cordes métalliques fines et fortement filées. Les modifications de matériaux, de formes et de poids des cordiers ont généralement suivi l'évolution des cordes.

la corde d'attache d'attache était autrefois en boyau ; il a également été essayé en métal rigide, et au XX^e siècle on a utilisé des cordes de piano, ainsi que du nylon ou du Kevlar.

1.2. État de l'art

En 1993, alors qu'elle travaillait sur les modes du violon, Hutchins [1] mentionne la possibilité d'accorder le cordier sur la fréquence de certains modes propres du violon lui-même. Une étude des modes vibratoires des cordiers de violon fut ensuite réalisée et publiée par Bruce Stough en 1996 [2], dans laquelle il explore toutes les résonances inférieures à 1500 Hz, domaine où le cordier se comporte comme un corps rigide.

Il définit six degrés de liberté :

1. torsion autour d'un axe longitudinal ;
2. basculement autour d'une ligne transversale ;
3. rotation autour d'un axe vertical ;
4. mouvement vertical ;
5. mouvement latéral ;
6. mouvement avant–arrière.

Pour le cordier de violon, Stough identifie cinq modes de corps rigide sous 1500 Hz : – oscillation côté grave ; – oscillation côté aigu ; – oscillation vers le bas ; – rotation autour de l'axe vertical ; – rotation autour d'un axe horizontal.

En 2002, Woodhouse mentionne ce travail [3] et note en particulier qu'il retrouve trois modes typiques sous la fondamentale du violon : le sol (196 Hz) et deux autres dans la plage 300–800 Hz. Les fréquences de ces modes dépendent de la masse et de la longueur du cordon de cordier.

2. Matériel et méthodes

Nous avons commencé à travailler avec l'appareillage et les logiciels de George Stoppani à Manchester, financés par une action COST « *Woodculther* » (le bois dans le patrimoine culturel) soutenue par la CEE. Le logiciel de G. Stoppani est très léger et peut être utilisé sur des ordinateurs ordinaires, ce qui le rend plus accessible et moins coûteux pour les ateliers de luthiers, contrairement aux modélisations 3D de laboratoire qui nécessitent des équipements beaucoup plus puissants et onéreux.

Le programme « *Outline definition* » permet de définir les points de percussion choisis sur l'objet. « Acquisition » calcule le rapport entre la réponse de l'accéléromètre et la force du marteau en chaque

point (c'est-à-dire la FRF). « *FRF overlay* » permet de superposer et comparer les résultats. « *Modefit* » attribue les déplacements et accélérations mesurés à leurs points correspondants sur le contour dessiné de l'objet, afin de reproduire virtuellement le mouvement.

La représentation en deux dimensions des trois plans permet d'analyser les mouvements.

Une analyse modale d'un cordier de violoncelle monté sur un violoncelle Stoppani en conditions de jeu a été réalisée [4]. Cette étude a ensuite été poursuivie en France par la construction, dans l'atelier d'Éric Fouilhé, d'un banc d'essai rigide (« dead-rig ») aux dimensions de la longueur vibrante, de la caisse et du chevalet du violoncelle, afin d'isoler le comportement du cordier des vibrations de l'instrument et de réduire autant que possible le couplage entre l'ensemble cordes/cordier et le violoncelle.

Notre étude a consisté à établir les différents modes sur un cordier témoin, puis à évaluer les effets de modifications : poids (par ajout d'aimants), longueur du cordon de cordier. Les mêmes modifications ont ensuite été réalisées sur un violoncelle joué par un musicien ; un enregistrement a été effectué et ses commentaires notés pour analyse ultérieure.

Nous présentons ici la première partie de notre travail, portant sur la détermination des formes modales du cordier de violoncelle.

3. Acquisitions

3.1. Mise en place de l'expérience

Le « dead-rig » est un montage rigide de violoncelle, fixé sur une poutre en I, sur laquelle un chevalet vierge et une pique sont installés. Le cordier est fixé de manière habituelle avec un cordon. Pour le test standard, la longueur vibrante est de 69,5 cm. L'angle des cordes et l'accord Do Sol Ré La restent identiques pour chaque expérience.

Il n'y a ni caisse vibrante ni touche. Le chevalet est renforcé pour rester immobile. Le même cordier est mesuré et les cordes sont étouffées par une bande de feutre.

Ce montage reproduit la chaîne : [longueur vibrante + chevalet + longueur après chevalet + cordier + corde d'attache + sillet + pique] identique à celle d'un violoncelle réel.

Une attention particulière a été portée à la fixation stable du chevalet et du sillet, qui constituent les points de contact avec le banc d'essai.

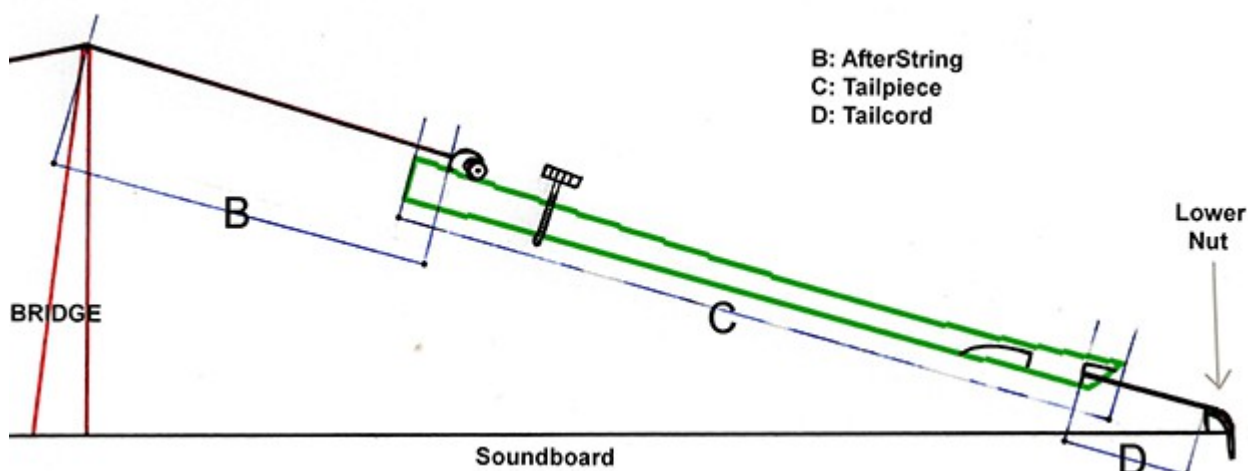


Figure 1: La Chaîne: [chevalet+ after length + cordier + corde d'attache + sillet+pique]

Le système a été testé pour évaluer sa mobilité, en particulier celle du sillet inférieur (sur lequel repose la corde d'attache) et du chevalet, dans la plage de fréquences correspondant aux trois modes 1, 2 et 4, qui sont les plus significatifs en amplitude. La mobilité du chevalet s'est révélée inférieure à 5 % de celle du cordier dans les trois plans.

Le sillet inférieur, sur lequel repose la corde d'attache, peut atteindre 2 % de mobilité dans le plan vertical, perpendiculaire à la table du violoncelle, et 7 % de mobilité latérale, de gauche à droite de l'instrument. Nous considérons donc que le *dead rig* est suffisamment stable pour étudier la vibration du cordier sans influence significative du couplage avec le dispositif de maintien.

Les points de mesure ont été soigneusement choisis en fonction des dimensions du cordier et des longueurs d'onde des fréquences considérées.

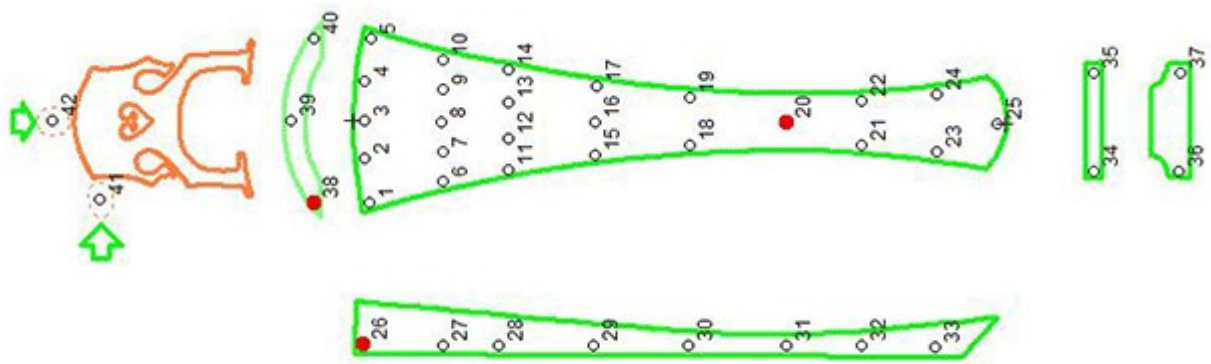


Figure 2 : Points sélectionnés pour les impacts du marteau et positions de l'accéléromètre (en rouge).

3.2. Mesures

Les points repérés sur le cordier ont été marqués, et l'accéléromètre a été fixé au point 20 (pour le mouvement vertical). Chaque point est frappé dix fois, et les coups présentant un double rebond sont automatiquement détectés et éliminés.

Deux autres séries de mesures, comprenant chacune 42 points, ont été réalisées après avoir déplacé l'accéléromètre vers les deux autres positions : – 38 points pour le mouvement longitudinal, – 26 points pour le mouvement latéral, afin de mettre en évidence les directions de vibration dans les trois plans.

La fréquence d'acquisition a été fixée à 44,1 kHz, en 24 bits, pour 65536 échantillons. Les impacts ont été produits à l'aide d'un marteau PCB de 4,8 g, modèle 086E80, et les vibrations enregistrées par un accéléromètre piézoélectrique uniaxial PCB de 0,6 g, modèle 352A21.

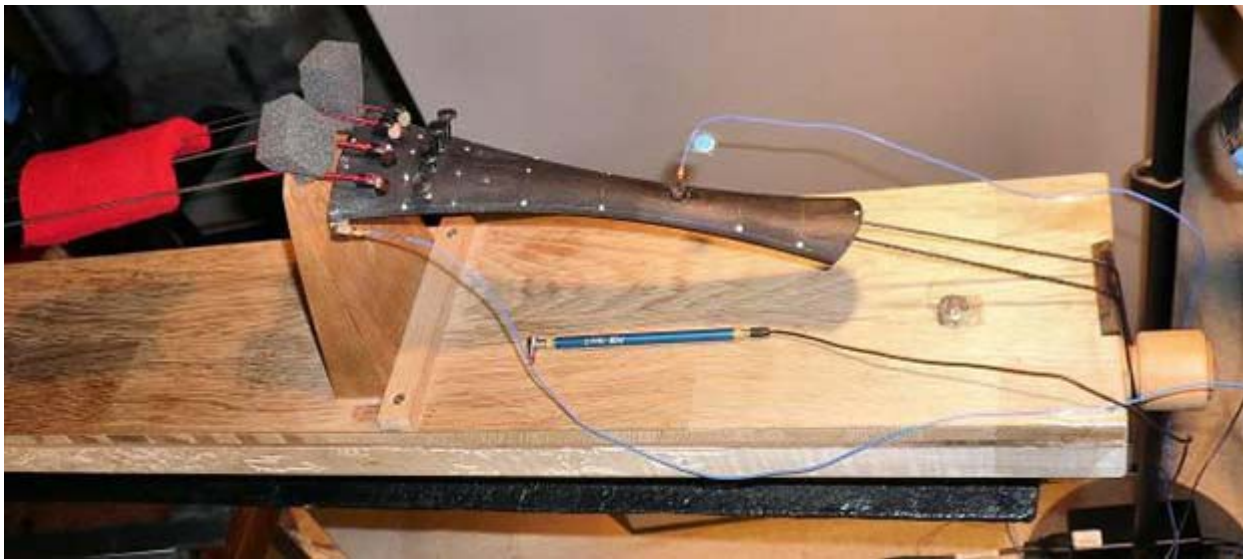


Figure 3 : Dead rig, corder de référence marqué, accéléromètre en place et marteau.

Plusieurs autres séries de mesures ont été réalisées.

Ensuite, différents cordiers, fabriqués dans divers matériaux, ont été mesurés afin d'introduire une certaine variabilité dans les fréquences observées.

Enfin, des tests ont été effectués en ajoutant de la masse au corder de référence et en modifiant la longueur du cordon de corder, afin d'étudier la variation de fréquence des modes. À chaque modification, une nouvelle série de mesures a été effectuée.

3.3. Analyse

Une fois l'acquisition terminée, les données ont été examinées à l'aide de l'utilitaire *FRF Overlay*, permettant de mettre en évidence les principaux modes.

Nous avons réalisé différentes moyennes des groupes de mesures (selon les positions de l'accéléromètre). Il s'agissait d'une première analyse destinée à identifier les principales FRF.

Pour les modes sélectionnés, nous avons utilisé l'utilitaire *ModeFit* du logiciel GS afin d'ajuster mathématiquement les courbes FRF et d'identifier les modes à l'aide de calculs polynomiaux en fractions rationnelles.

Il est judicieux de choisir une résolution fréquentielle suffisamment fine pour séparer clairement les pics.

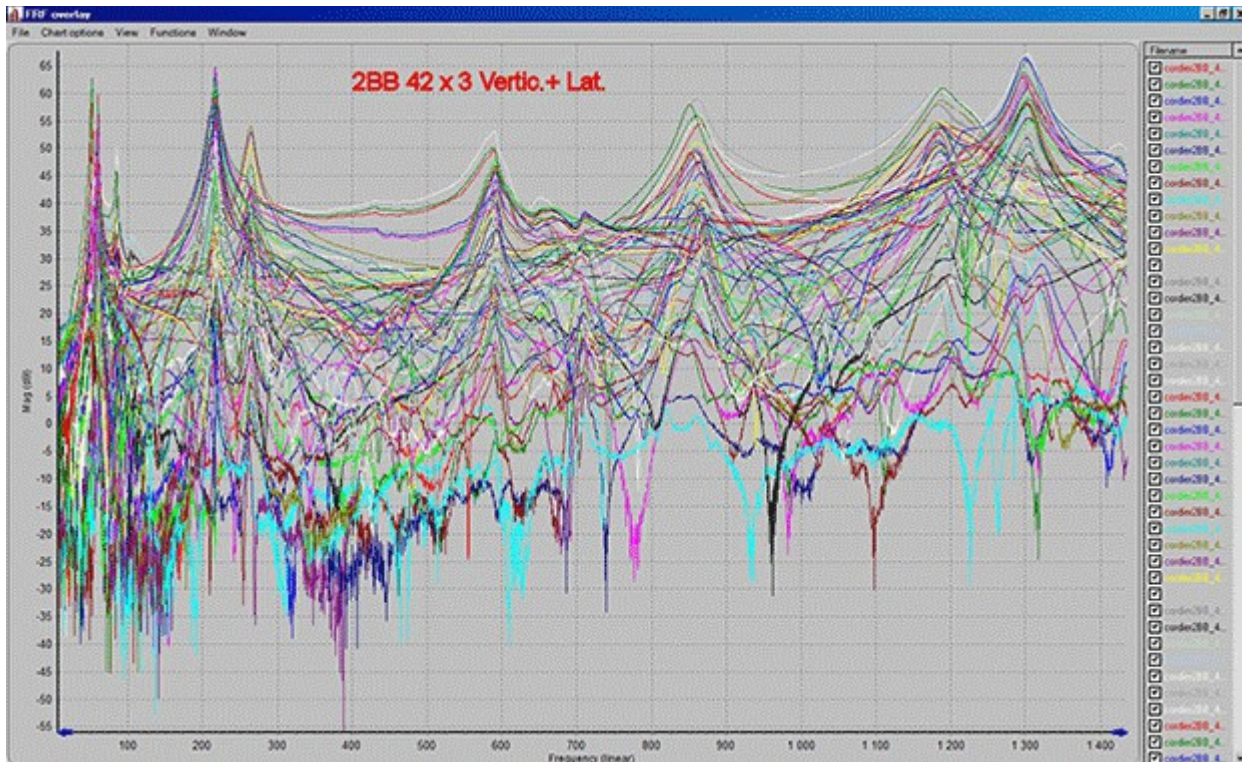


Figure 4 : Données observées avec l'utilitaire FRF Overlay du logiciel GS.

Nous devons choisir une fenêtre temporelle suffisamment longue pour contenir la décroissance du signal, ainsi qu'une fréquence d'échantillonnage suffisamment élevée pour éviter l'aliasing des fréquences supérieures à la fréquence de Nyquist.

Avec une fenêtre de 65536 échantillons et une fréquence d'acquisition de 44,1 kHz, nous obtenons une résolution fréquentielle de 0,67 Hz.

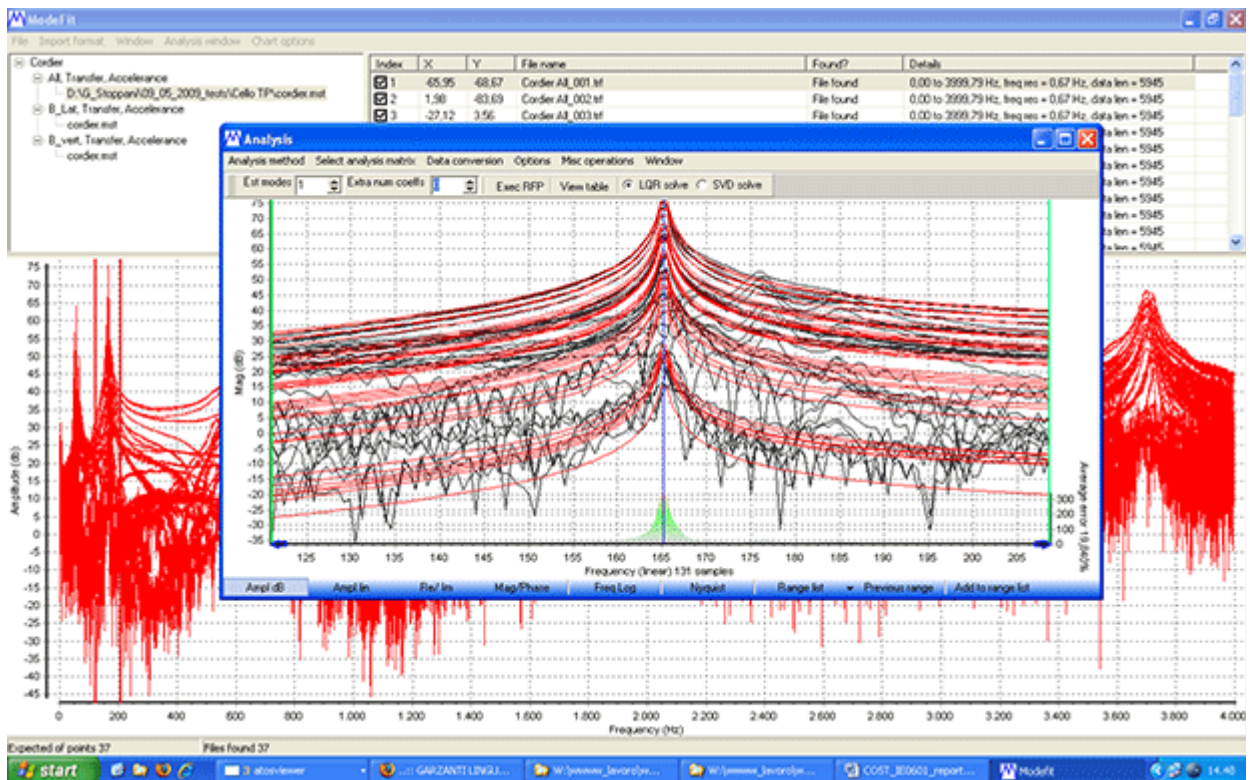


Figure 5 : Utilisation de l'outil Mode Fit du logiciel GS.

Les données ajustées pour chacun des modes ont ensuite été utilisées dans l'application GS *Mode Shape* afin d'attribuer les mesures aux trois plans de notre schéma, de manière à simuler le comportement du cordier pour chaque mode pris individuellement.

4. Résultats

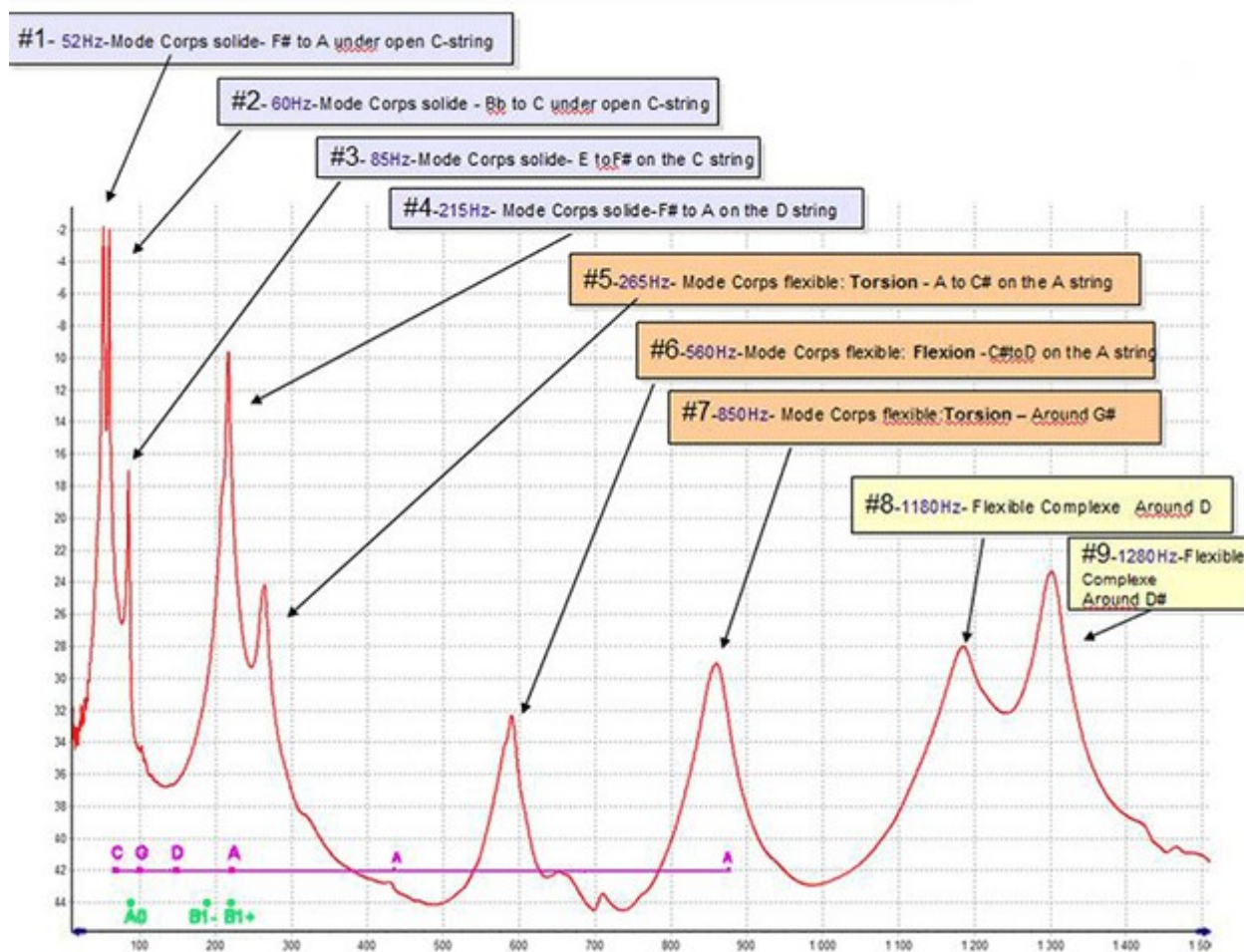


Figure 6 : Modes du cordier de violoncelle, cordes et plage de fréquences du violoncelle, modes du violoncelle.

Les quatre premiers modes du cordier de violoncelle correspondent à des mouvements de corps rigide ; les deux plus graves se situent en dessous de la corde de do la plus basse, tandis que le mode 3 se trouve une tierce ou une quarte au-dessus, à proximité du mode de Helmholtz A0 du violoncelle.

Les modes 5, 6 et 7 sont ensuite des modes flexibles, ce qui implique que l'épaisseur et le matériau du cordier interviennent dans leur comportement. Leurs fréquences se situent dans la plage de jeu de l'instrument, le dernier atteignant le sol dièse aigu, proche de la note la plus haute jouable sur la corde de la.

Les modes 8 et 9 sont plus complexes, combinant flexion et mouvement ; ils sont consignés ici à titre de référence.

4.1. Mode 1

(F#-A sous la corde à vide C2 à 65,4 Hz)

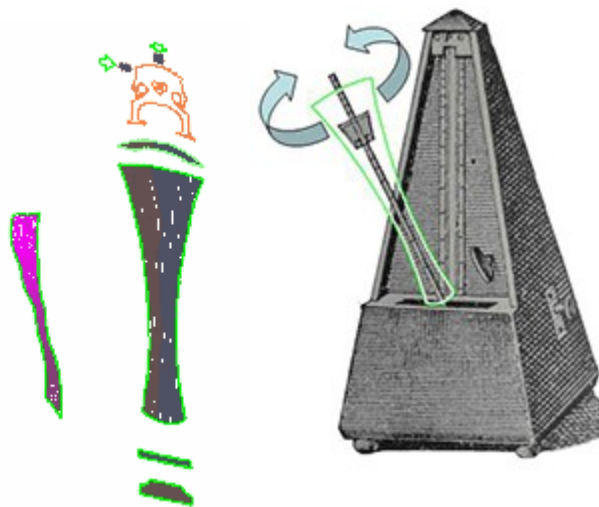


Figure 7 : Mode 1

Il s'agit d'un mouvement de corps rigide avec une oscillation latérale prédominante, et il n'apparaît pas — ou très peu — lors des frappes verticales.

Le mouvement ressemble à celui d'un essuie-glace : il se déroule presque dans un seul plan. L'amplitude est importante, la seconde plus grande après celle du mode 2.

Lorsque la corde d'attache est croisée sur le sillet, la rotation du cordier peut être plus importante et la fréquence de ce mode diminue de 9 Hz (20 %), ce qui est significatif puisque la résolution fréquentielle est de 0,67 Hz (voir ci-dessus).

En raccourcissant la corde d'attache, la fréquence du mode 1 commence par diminuer, puis elle remonte ensuite.

4.2. Mode 2

(Si $\flat$ à Do2 à 65,4 Hz)

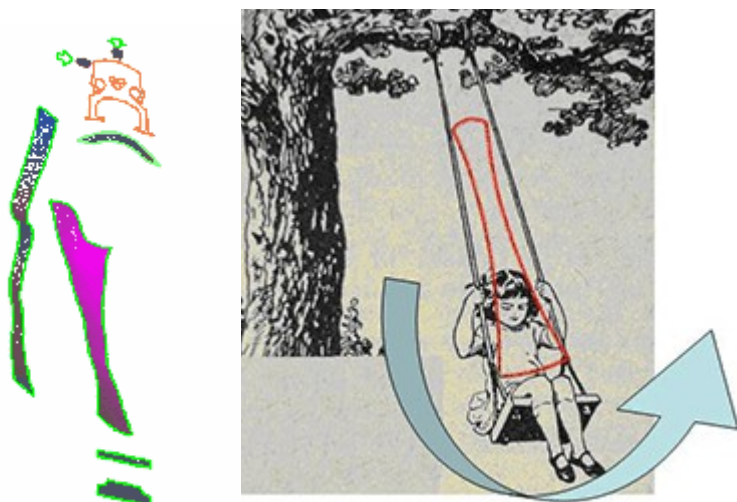


Figure 8: mode 2

Il s'agit également d'un mode de corps rigide, avec un mouvement vertical prédominant ; il évoque un large battement d'aile, comme si le cordier déplaçait de l'air. Peut-il influencer la corde de do ? Ce mode présente l'amplitude la plus élevée ; les pics sont étroits, ce qui suggère un amortissement plus faible que pour le mode 1.

Le fait de croiser la corde d'attache sur le sillet n'affecte pas la fréquence. L'ajout d'une masse de 30 g abaisse la fréquence de 7 à 11 Hz. {Où cette masse a-t-elle été ajoutée ?} Le raccourcissement du cordon de cordier diminue la fréquence et augmente l'amplitude. Lorsque le cordier se trouve à 4 cm du chevalet, le mouvement est maximal. Lorsque le cordier est plus proche du sillet, à une distance couramment utilisée aujourd'hui, la fréquence du mode reste plus basse.

4.3. Mode 3 ou 1 bis

(Mi à Fa $\sharp$, sur la corde de do)

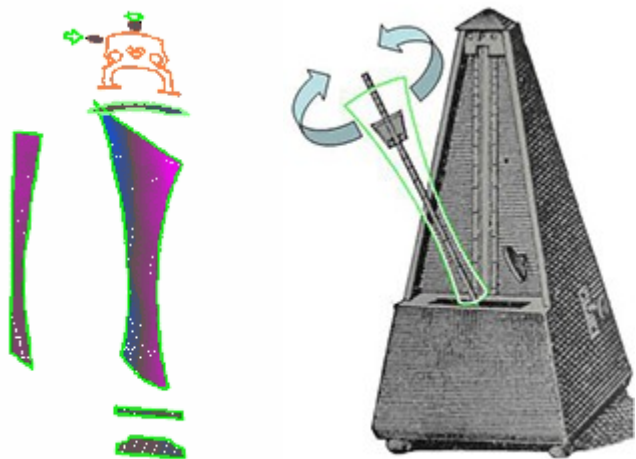


Figure 9 : mode 3

Ce mode n'est pas très homogène. Latéralement, le fort bras de levier situé près du sillet rappelle le mouvement latéral du mode 1. Comme le mode 1, il s'agit d'un mode de corps rigide, avec une prédominance latérale, peu ou pas visible lors des frappes verticales. Le mouvement évoque celui d'un essuie-glace, mais avec une tendance diagonale plus marquée, l'angle aigu supérieur

plongeant.

L'amplitude est environ moitié moindre que celle du mode 1. Les modes 1 et 3 semblent liés : leurs fréquences montent et descendent ensemble lorsque la longueur du cordon de cordier est modifiée ou lorsque celui-ci est croisé. Le mode 3 se situe à proximité du mode A0 de Helmholtz.

4.4. Mode 4

(F# à La sur la corde de ré)

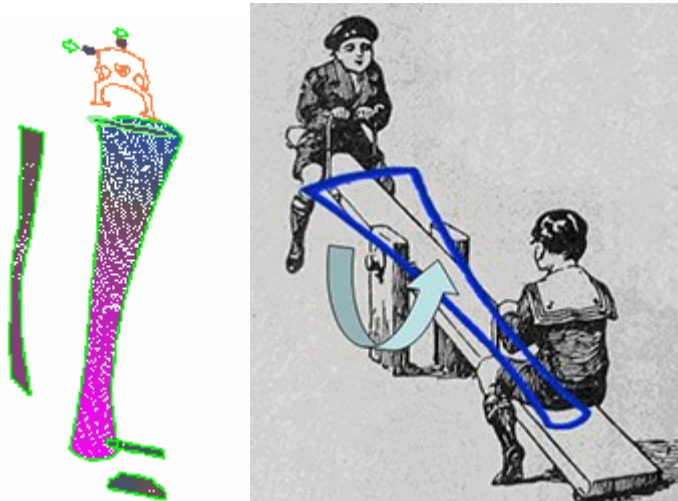


Figure 10: mode 4

Il s'agit d'un mode vertical de corps rigide, présentant un fort mouvement de bascule (seesaw) autour d'un axe situé au tiers ou au quart supérieur de la longueur du cordier, combiné à une légère torsion de sa partie inférieure. Latéralement, on observe une petite flexion accompagnée d'un mouvement de bascule ou de torsion. Le mouvement est puissant, avec une amplitude maximale proche de celle des modes 1 et 2. Ce mode est toujours associé au mode 5, qui est un mode latéral (voir ci-dessous). Le mode 4 est très proche du mode B1+ du violoncelle.

4.5. Mode 5

(La à Do# sur la corde de la)

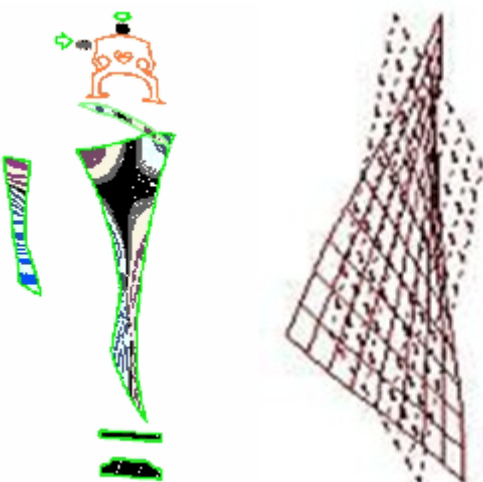


Figure 11: Mode 5

Il s'agit du premier mode de torsion (analogue au premier mode d'une plaque rectangulaire libre), avec des lignes nodales croisées et les quatre coins qui montent et descendent par paires diagonales. Verticalement, on observe une torsion autour d'un axe vertical perpendiculaire au plan du cordier, situé aux points 12–13. Latéralement, le mode présente un fort axe de bascule au même endroit, mais il s'agit d'un mode excité à la fois latéralement et longitudinalement.

Bien qu'aucune valeur RMS ne soit visible dans le mouvement vertical, *GSMoDefit* a détecté un mode vertical. L'amplitude de ce mode est plus faible que celle du mode 4.

Il est lié au mode 4 (lorsque la corde d'attache est raccourci) et est fortement influencé par la tension des cordes. En configuration libre-libre, sa fréquence augmente de 265 Hz à 937 Hz (+250 %).

4.6. Mode 6

(Do# – Ré)

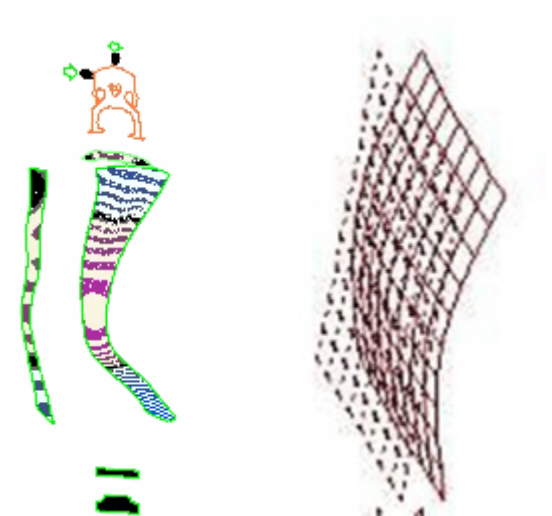


Figure 12: mode 6

Verticalement, le mode 6 est très sensible ; il s'agit également d'un mode de flexion, avec une forte courbure et un seul antinœud : il ressemble au premier mode d'une poutre.

Latéralement, la flexion est négligeable à faible, également avec un seul antinœud.

L'amplitude est faible comparée à celle des autres modes.

Le pic est souvent peu net : plusieurs pics seraient-ils superposés ?

Lorsque le corde d'attache de cordier est croisé sur le sillet, la rotation devient plus souple, le pic gagne en amplitude et en netteté, et la fréquence diminue de 70 Hz.

En ajoutant une masse de 30 g aux deux tiers vers l'extrémité inférieure du cordier, le mode 6 semble se scinder en deux :

- un pic baisse de 155 Hz,
- l'autre augmente de 60 Hz,

tous deux avec une amplitude accrue.

En ajoutant la masse au quart supérieur du cordier, seul le pic supérieur apparaît.

Ces variations importantes sont surprenantes, car les masses ont été ajoutées relativement près des lignes nodales.

En raccourcissant la corde d'attache de 5,5 cm à 1,1 cm, la fréquence du mode 6 augmente de 73 Hz, à deux exceptions près.

L'amplitude est divisée par deux, et la forme du pic reste inchangée.

Ces modifications rappellent celles observées pour les modes 4 et 5.

Lorsque les cordes sont détendues, la fréquence descend à 100 Hz (−17 %), ce qui place ce mode à la position du premier mode de torsion.

4.7. Mode 7

De 827,24 Hz à 857,15 Hz (autour de sol#)

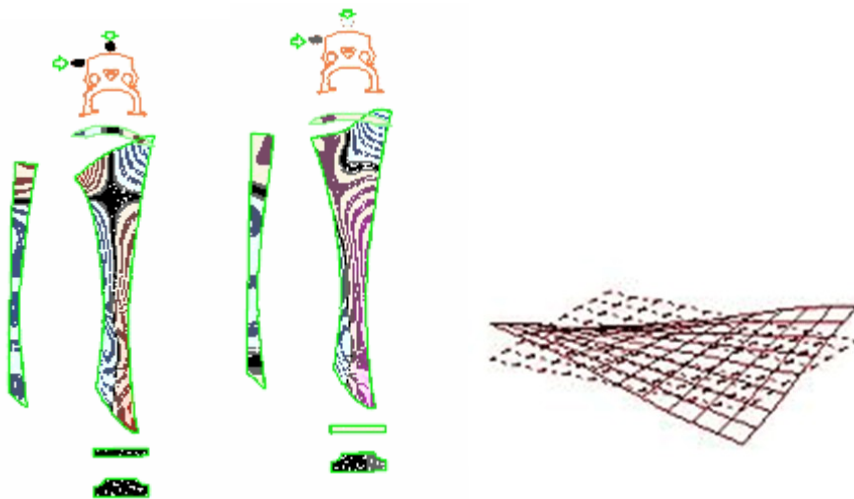


Figure 13: mode 7

Verticalement, on observe une torsion moyenne à forte.

Latéralement, le mouvement de bascule est marqué, centré sur les points 12–13.

Il s'agit d'un mode de torsion de type 2 pour une plaque, avec une forte bascule latérale : l'axe se situe aux deux tiers depuis le haut, un côté se relevant tandis que l'autre s'abaisse, les coins opposés se déplaçant en sens inverse.

L'amplitude est plus grande que celle du mode 6.

Le pic est très pointu et net.

Un pic marqué apparaît lors d'une excitation latérale, mais il n'existe pas en excitation verticale.

Lorsque la corde d'attache est croisée sur le sillet, le pic est atténué, mais la fréquence ne varie pas.

En ajoutant une masse de 30 g : aucun résultat, car seules des frappes verticales ont été effectuées.

En raccourcissant la corde d'attache, la fréquence augmente de 29 Hz, avec une légère augmentation d'amplitude.

4.8. Mode 8

Fréquence de 1150 Hz à 1189,65 Hz (ré)

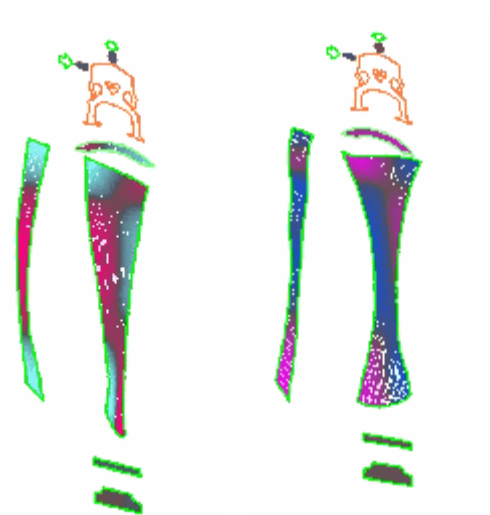


Figure 14: Mode 8

Ce mode présente un comportement complexe, combinant flexion et torsion.

Comportement vertical : Oscillation gauche-droite rappelant le mode 1, mais avec une torsion à deux nœuds superposée.

La partie supérieure du cordier se déplace en opposition de phase avec la partie inférieure.

Comportement latéral : Forte flexion avec un antinœud marqué.

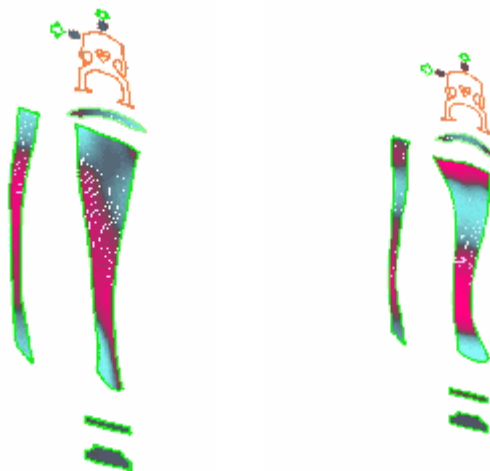
Le mouvement latéral est plus important que dans les modes précédents, indiquant une participation accrue de la géométrie propre du cordier.

Amplitude moyenne, mais pic bien défini.

Ce mode est sensible à la géométrie du cordier, notamment à l'épaisseur et à la largeur dans sa partie médiane.

4.9 Mode 9

Fréquence de 1263Hz à 1332.62Hz (autour de ré#)



Fi

Figure 15 : Mode 9

Mode de flexion-torsion complexe, situé dans une zone où plusieurs modes peuvent se superposer.

Comportement vertical : Forte torsion ou flexion, avec plusieurs zones d'antinœuds.

Le mouvement vertical domine.

Comportement latéral : Flexion marquée avec un antinœud, combinée à une flexion secondaire plus

complexe.

Le mouvement latéral est moins homogène que dans les modes précédents.

L'amplitude est modérée.

Excitation verticale : pic net.

Excitation latérale : aucune réponse significative.

5. CONCLUSIONS

Nous avons réussi à identifier neuf modes d'un cordier de violoncelle de référence sous tension sur un dead-rig : quatre modes de mouvement du corps rigide, deux modes de torsion et deux modes complexes situés au-dessus de la tessiture du violoncelle.

Les deux premiers modes se trouvent en dessous de la note la plus grave de l'instrument.

Le troisième mode est proche du mode A0 de Helmholtz du violoncelle, tandis que le mode 4 reste sous la corde de la, mais très proche du mode B1+ de l'instrument.

La modification de la tension des cordes influence les trois premiers modes, en les abaissant d'environ 6 %.

L'ajout d'une masse supplémentaire (30 g) sur le cordier abaisse également ces modes, de 9 à 29 % selon l'endroit où la masse est placée.

Les modes 1 et 3 semblent liés : leurs fréquences montent et descendent ensemble lorsque la longueur du cordon de cordier est modifiée ou lorsque celui-ci est croisé.

La définition détaillée des modes sera poursuivie afin d'étudier leurs variations et de comprendre l'influence de la géométrie, du matériau et du système de fixation une fois le cordier monté sur l'instrument. Ce n'est qu'ensuite que la perception du musicien sera étudiée, afin de rechercher des corrélations avec les résultats obtenus.

6. Références

- [1] Hutchins, C. M., The effect of relating the tailpiece frequency to that of other violin modes, Catgut Acoustical Society Journal, Vol.2 N°3, (Series II), 5-8, 1993.
- [2] Stough, Bruce, The Lower Violin Tailpiece Resonances, Catgut Acoustical Society Journal, Vol. 3 (Series II) May 1996, p. 17-24.
- [3] Woodhouse, J., Body vibration of the violin- What can a maker expect to control ?, CAS 10. J Catgut acoustical society journal, vol 4 N°5 serie I, 2002.
- [4] Fouilhe Eric, Goli Giacomo, Houssay Anne, Stoppani George, Preliminary study on the vibrational behaviour of tailpieces in stringed instruments – COST IE0601, STSM results, Hambourg, 2009.

7. Remerciements

Nous remercions chaleureusement :

- **George Stoppani**, pour la mise à disposition de ses outils d'analyse modale et pour ses conseils méthodologiques.
- **Éric Fouilhé**, pour la construction du *dead-rig* et son expertise dans la reproduction fidèle de la géométrie du violoncelle.
- **Les musiciens participants**, pour leurs retours sensibles et précis lors des essais sur instrument réel.
- **Les membres du réseau COST Woodculther**, pour leur soutien scientifique et logistique.

- **Les luthiers et acousticiens** ayant contribué par leurs échanges, leurs observations et leur expérience de terrain.