

Contribution du Cordier de Violoncelle à la Sonorité Globale

Le Matériau

Eric Fouilhé

31/05/2021

<https://univ-montp2.academia.edu/EricFouilh%C3%A9>

et

[Bois d' Harmonie](#)

B♣H
BOIS D'HARMONIE

Résumé :

Le choix du montage d'un cordier sur un violoncelle, donne des résultats sonores bien différents. Il peut affecter l'égalité ou la richesse du timbre, tout autant que la facilité d'émission sonore. Comprendre la contribution du cordier à la sonorité globale est le premier objectif de cette étude, et en conséquence, il permet d'offrir au luthier une aide pour le choix du montage, et optimiser l'instrument.

Nous avons comparé plusieurs montages, en ne changeant que la nature du bois du cordier. Après une étude qualitative de la perception sonore de l'instrument, nous avons cherché un lien avec des mesures acoustiques.

L'enregistrement d'une gamme pour chaque montage-cordier a permis l'étude de l'enveloppe temporelle, du spectre sonore de l'instrument, et du spectre des vibrations du cordier.

Enfin l'analyse modale de chaque cordier a permis de préciser le comportement mécanique de leurs résonances propres, ainsi que les valeurs des marqueurs dynamiques que sont le Module d'élasticité et le facteur de Qualité lié à l'Amortissement sonore.

Des corrélations sont apparues entre le classement perceptif sonore de ces montages, et les qualités mécaniques des essences de bois employées.

Le choix du cordier, fait par le luthier, peut être ainsi guidé en utilisant l'étude préalable de ses propriétés.

Introduction

L'étude perceptive de 8 montages-cordier successifs, sur un Cello de Mittenwald, permet de découvrir des différences sonores, dues uniquement au changement de matière du cordier. La mise en action de la corde par l'archet, est d'abord communiquée au chevalet, dont les pieds transmettent les vibrations au corps de l'instrument. Le corps et la table vont alors émettre un son audible.

La vibration des cordes est également communiquée au corps de l'instrument par le sillet du bas, en traversant le cordier. La taille de ce dernier est insuffisante pour émettre un son, mais il va filtrer les vibrations transmises, et ainsi contribuer à la sonorité globale de l'instrument.

Dans **l'étude acoustique** présentée ici, chaque montage a été enregistré sur deux canaux :

- une prise de son par microphone, témoignant du son perçu par nos oreilles,
- une seconde voie, par un accéléromètre placé sur le cordier, qui a enregistré les vibrations qui l'ont traversé.

L'enveloppe temporelle, est la courbe d'amplitude des notes d'une gamme jouée. Elle montre une inégalité des amplitudes sonores d'une note à la suivante dans un même montage, mais aussi d'autres inégalités, pour la même note, d'un montage-cordier à l'autre.

A l'écoute, ces différences ne sont pas perçues comme des variations de puissance, mais comme des changements de timbre.

L'analyse spectrographique permet de décomposer chaque note dans ses composants harmoniques,

avec le sonagramme, puis le spectrogramme.

L'étude de la prise de son aérienne, par microphone, ne montre pas beaucoup de différences entre les différents montages. Nous nous sommes intéressés particulièrement à l'autre voie enregistrée avec l'accéléromètre, celle des vibrations du cordier.

En effet, sur tout le spectre joué, les courbes mettent en évidence des bandes de fréquences presque muettes, et d'autres bandes à l'amplitude renforcée.

Certains montages présentent des bandes très inégales, d'autres cordiers sont beaucoup plus réguliers.

L'ampleur et le nombre de ces bandes, est corrélé à la qualité sonore perçue de l'instrument : plus il y a de bandes « muettes », et moins le montage de ce cordier est apprécié à l'audition .

Les fréquences « renforcées », sont souvent les mêmes pour tout l'ambitus d'un montage donné, et suggèrent leur couplage (une résonance par sympathie) avec des modes de résonance propre du corps de violoncelle, mais aussi du cordier. Nous avons donc étudié l'influence possible de ces modes sur la sonorité.

L'analyse modale

Tout objet, ... ici le cordier, réagit à des fréquences de résonance préférentielles, il a une « signature modale » propre.

Il peut entrer en résonance par sympathie lorsque une note correspondante est jouée, et interagir avec elle.

Ainsi, la transmission vibratoire entre deux objets, comme ici entre le cordier et la caisse de résonance, peut être filtrée, altérée ou amplifiée par ce couplage.

Pour chaque montage étudié, nous avons déterminé les modes de résonance de chaque cordier dans trois situations : comme un objet individuel (Libre-Libre), puis comme un objet connecté, en tension comme sur un Cello muet, sur un « corps mort », dépourvu de caisse de résonance, et

enfin, monté sur le violoncelle étudié.

On constate que les premiers pics de résonance d'un cordier correspondent aux mêmes bandes de fréquences renforcées sur le sonagramme et sur le spectrogramme. A l'inverse, les creux d'amplitude entre ces pics de résonance, correspondent à des bandes de vibration diminuées du spectrogramme.

Il existe donc une corrélation entre les fréquences propres du cordier, et le résultat sonore. Plus les pics de résonance du cordier sont puissants et bien séparés, et plus le spectre d'émission sonore sera inégal (exemple fréquent, le cordier en buis).

Plus les pics du cordier sont nombreux, dédoublés, inégaux, peu puissants, et plus le spectre d'émission sonore sera régulier, et apprécié.

Cette étude peut être un socle de départ vers d'autres projets .

-Quel matériau pour un cordier ? quelles sont les qualités idéales requises pour ce filtre acoustique.

-Quelle est l'influence du montage : longueur, type et géométrie des matériaux d'attache, qui eux aussi, modifient les qualités vibratoires transmises par le cordier.

-Pouvons-nous mieux comprendre l'évolution historique de cet accessoire, au cours des modifications organologiques, technologiques, et d'évolution des goûts musicaux ?

Plan :

Introduction.p.3

Etude Perceptivep.6

Etude Acoustiquep.7

- Enveloppe Temporellep.7

- Sonagrammep.8

- Spectrogrammep.10

Analyse Modalep.11

Conclusions/ Projets.p.13

Note sur les marqueurs qualitatifs du bois (physiques et dynamiques)p.13

ÉTUDE PERCEPTIVE

Nous étudions ici la qualité sonore perçue, sur 8 montages identiques, exceptée l'essence.

Chaque montage a été joué devant un auditoire professionnel qui a donné un jugement perceptif.

Tous les cordiers sont du même modèle, mêmes réglages de cordes d'attache : D'abord un cordier en Buis, puis le suivant en Padouk d'Asie, un autre de la même essence débitée différemment, Deux cordiers en Épicéa Densifié, un en Padouk d'Afrique, puis à nouveau le cordier en buis essayé en première position, et enfin un dernier dans une essence très proche du Pernambouc originaire du Mexique que nous appellerons Pernambouc du Mexique.

La perception sonore de 8 montages :

	C300 Buis Initial	C70 Padouk Asie demi-Dosse	C71 Padouk Asie Dosse	C66 Epicea Densifié Autre Fabri-cant	C68 Epicea Densifié BH	C231 Padouk Ca-meroun	C300 Buis Fi-nal (rejoué en fin d'expé-rience)	C230 Per-nambouc Mexique
Rang de classement perceptif	+	+++++	+++++	++	+++	+++++	++	++++
Sonorité	Relative-ment Equili-bré, Beaux graves & aigus ,Me-dium na-sillard	Equilibré, Egal , riche	Encore mieux équilibré, beau sur graves, aigus plus maigres	Basses moins intéressantes, aigu clair et puissant, lu-mineux.	Coloration et puissance in-égale, plus ou-vert.	Bien défini, équilibré , Beaux graves, aigu décevant	Est bien mieux qu'au début , s'est un peu ou-vert , gain d'équilibre	Homogène , timbre agréable, équilibré, propre , Des « trous » sur le Ré
Prise de Note	Moyen	Facile	Facile	Facile	Difficile	Facile	Facile	Facile
Puissance	Moyen	Moyen Plus , Petite baisse en aigu	Moyen Plus	Moins puis-sant	Moyen Plus	Moins puissant	Moyen	Plus puis-sant que le buis
* notes Améliorer les critères d'étude perceptive	Un index général des qualificatifs serait à préciser, incluant des « familles » de qualificatifs et leurs antonymes Brillant/Centré, précis résonant/sec..... Un critère de « propreté/précision » de la note serait-il à ajouter ?							

A l'écoute de ces 8 montages, nous avons noté **beaucoup de différences** sonores.

Elles concernent **essentiellement** des **différences de timbre**, d'**homogénéité** de timbre et de **puissance**, ainsi que des différences dans la facilité de prise de note.

La perception humaine n'est pas un outil objectif, et nous nous contentons ici d'un classement qualitatif que nous rapprocherons des mesures physiques qui suivent.

Cette étude perceptive est certainement à améliorer. Il existe maintenant une bibliographie intéressante sur les études perceptives. Le montage buis C300, joué en début puis en fin de manip, y a donné des résultats différents....

ETUDE ACOUSTIQUE :

- Nous avons enregistré des gammes avec un microphone, des sons émis dans l'air, ceux qui ont atteint nos oreilles, pour l'analyse de l'enveloppe temporelle.

- Dans le même temps, nous avons enregistré les vibrations qui traversent le cordier, avec un accéléromètre, que nous utiliserons pour l'analyse spectrale.

Le cordier est trop petit pour émettre un son dans l'air, il se contente de transmettre la vibration de la corde à la caisse amplificatrice de l'instrument.

L'enveloppe temporelle : Montre l'amplitude vibratoire au cours du temps

- Inégalités d'un montage-cordier, à un autre :

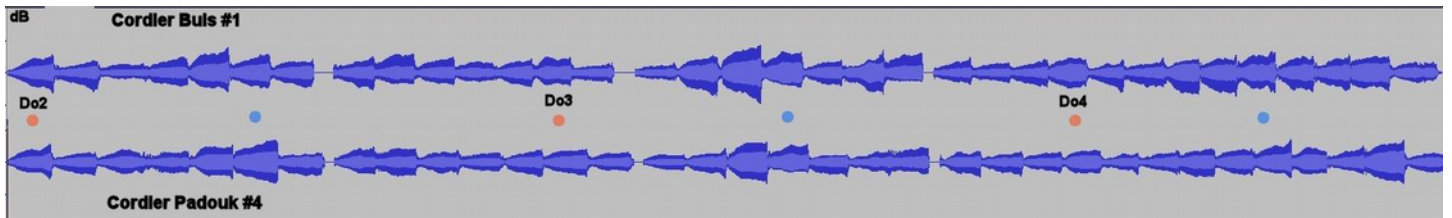


Fig1 : Gamme chromatique de 34 notes, pour le montage Buis #1 et pour le montage Padouk #4. Les DO sont soulignés d'un point rouge, les Fa d'un point bleu.

La comparaison de l'enveloppe du son enregistré pour deux montages (fig1), montre une inégalité d'amplitude entre les deux. Le montage Buis #1 est plus irrégulier que le montage Padouk #4.

On peut constater des différences d'amplitude de la même note, par exemple, un Ré, la troisième note à gauche ci-dessus, plus « puissant » sur le montage du bas. Cette différence d'amplitude n'est pas perçue à l'écoute. Lors de la perception sonore, certains montages ont été qualifiés de plus puissants que d'autres, mais nous n'avons pas pu mettre en évidence une différence significative de niveau d'amplitude globale sur ces courbes d'enveloppe.

-Inégalités sur le même montage : Dans un même montage, on trouve aussi une forte irrégularité d'une note à la suivante.

Dans une gamme, la courbe d'enveloppe montre des inégalités d'amplitude, que nous n'avons pas perçues à l'écoute. Nous avons par contre entendu des changements de timbre.

Prenons en exemple la différence des deux notes consécutives de la figure2: L'augmentation d'amplitude du Do, après le Si (l'épaisseur de l'enveloppe), pourtant visible sur la figure de gauche, n'est pas perçue à l'oreille. Elle est due à l'augmentation d'amplitude d'un seul harmonique, de 14 décibels, entre l'harmonique 3 du Si à 370Hz et l'harmonique 3 du Do à 390Hz.

La variation d'amplitude n'est pas perçue comme une variation de puissance sonore, mais comme un changement de timbre.

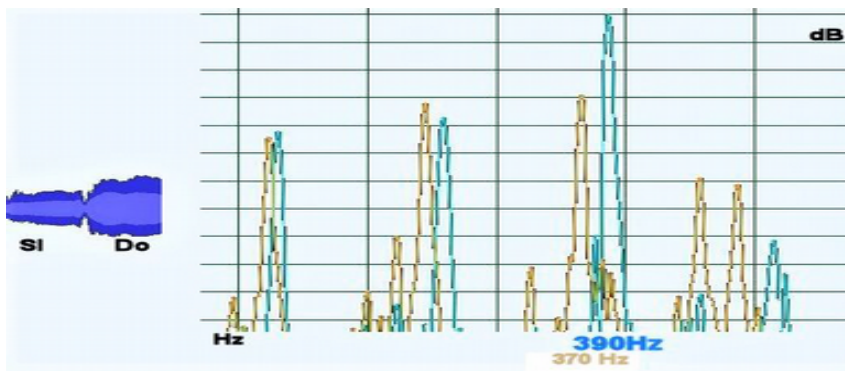


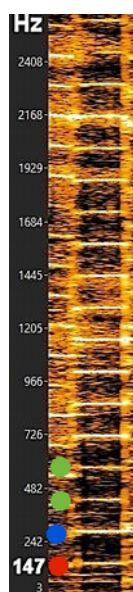
Fig2 : montage C230, à gauche, enveloppe temporelle de Si2 et Do3, et à droite, leur spectre harmonique. Si en Jaune , Do en Bleu

Les différences de régularité d'amplitude d'un montage à l'autre s'expliquent par les qualités mécaniques différentes des essences employées.

Les différences d'amplitude d'une note à l'autre dans un même montage, s'expliquent par une différence de leur composition harmonique. L'hypothèse des couplages harmoniques est envisagée plus loin.

On notera enfin que l'oreille humaine ne perçoit pas nécessairement les mêmes amplitudes que les mesures acoustiques.

Le sonagramme : Montre la fréquence des harmoniques, et leur intensité, au cours du temps.



Le **sonagramme** décompose un son dans ses composantes harmoniques.

Ici, la note Ré se décompose en une note **fondamentale à 147 Hertz**, représentée par le premier « barreau » en bas de l'échelle. **L'harmonique 2**, est le « barreau » suivant, et ainsi de suite.

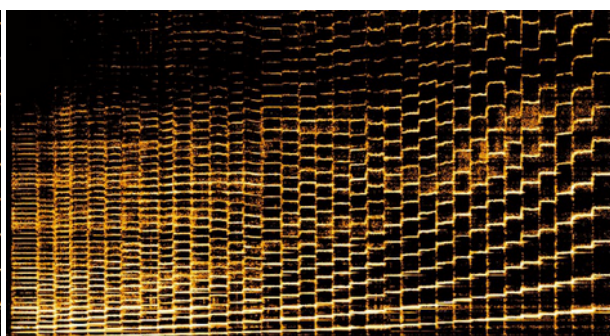
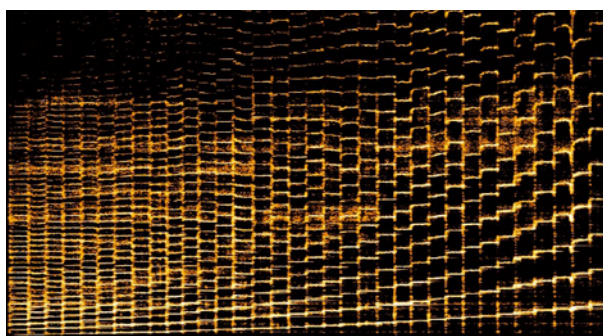
L'intensité du trait du barreau représente l'intensité de l'Harmonique.

Ainsi, **l'harmonique 2** est puissant, contrairement **au N°3 et 4**, dont l'intensité est plus faible.

La composition harmonique d'un son est déterminante de son timbre.

Nous **comparons les sonagrammes** du montage-cordier C300 (Buis), notre pire choix perceptif(+), avec le meilleur choix, montage cordier C71, Padouk), meilleur montage cordier(++++++)

1) **Sonagramme du son audible** :



Sonagramme du son rayonné : montage Buis C300,

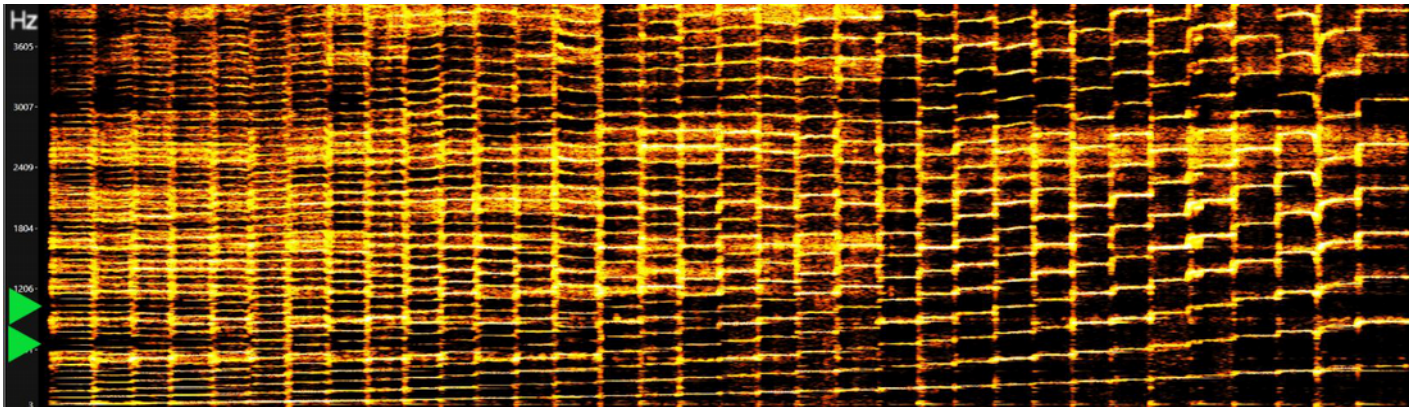
montage Padouk C71, gamme chromatique

La prise de son de la **gamme au micro**, montre assez **peu de différences** entre le montage Buis, et le montage Padouk, **malgré un classement** perceptif du **pire** (Buis +) au **meilleur** (Padouk++++++). Cependant, le second, à droite, paraît plus régulier en intensité des « barreaux » d'harmoniques.

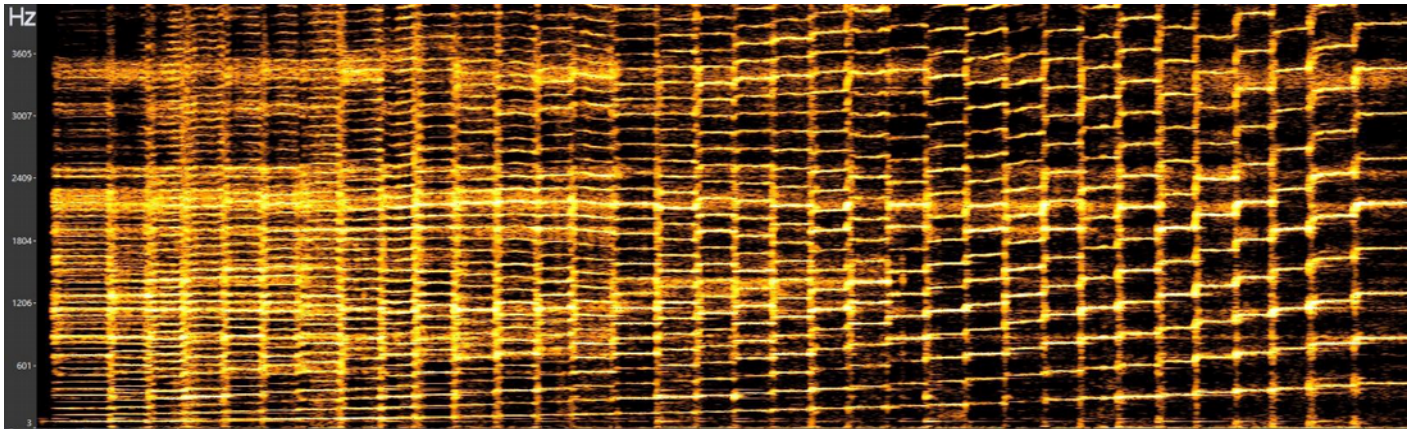
Il n'en est **pas de même** avec la prise de son à **l'accéléromètre**, des vibrations qui traversent le cordier, dont l'aspect est moins régulier.

2) Sonagramme des vibrations de cordiers prise accéléromètre, des mêmes cordiers C300 et C71. :

Sonagramme du C300 Buis Init, + de 0 à 4000Herz , Gamme 34 notes de Do2 à La4



Sonagramme de C71 Padouk ++++++, de 0 à 4000Herz , Gamme 34 notes de Do2 à La4



L'affichage du sonagramme du cordier met en évidence, sur tout ou partie de l'instrument, des bandes de fréquences (horizontales),

- **Plus sombres** : Là où les amplitudes des harmoniques sont diminuées (Les flèches vertes du premier montage C300 : Ces deux bandes, selon les cordiers, de 600à900Hz, et de 1100 à 1300Hz semblent jouer un rôle majeur).

- **Plus claires** : Là où les amplitudes sont renforcées.

Le montage Padouk est globalement plus homogène que le Buis, dans son émission harmonique.

Les montages-cordiers qui ont été les plus appréciés comportent moins d'alternances de bandes sombres et claires : Les harmoniques ont une répartition d'amplitude plus homogène.

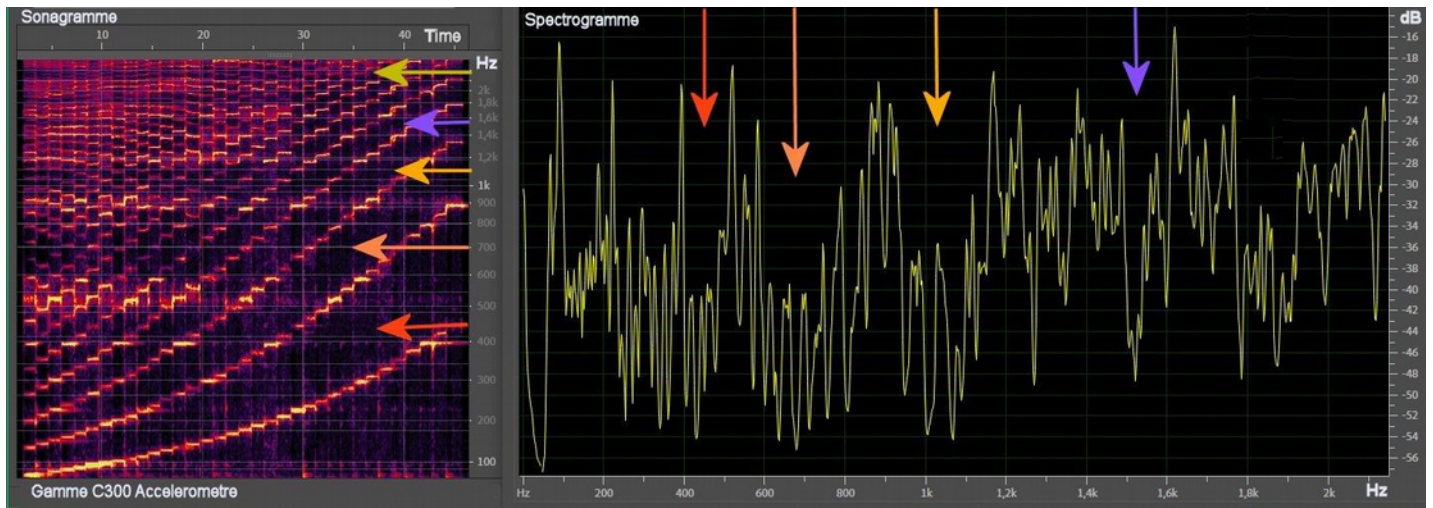
Cette méthode permet de sélectionner des critères de qualité tels que le timbre et l'équilibre sonore, mais ne donne pas d'informations sur la puissance, la précision de l'attaque, et de la note.

Le spectrogramme : Montre l'amplitude des fréquences, pour une sélection de temps donné, la gamme.

Il est possible de d'affiner cette première étude d'équilibre des timbres au Sonagramme, à l'aide du Spectrogramme.

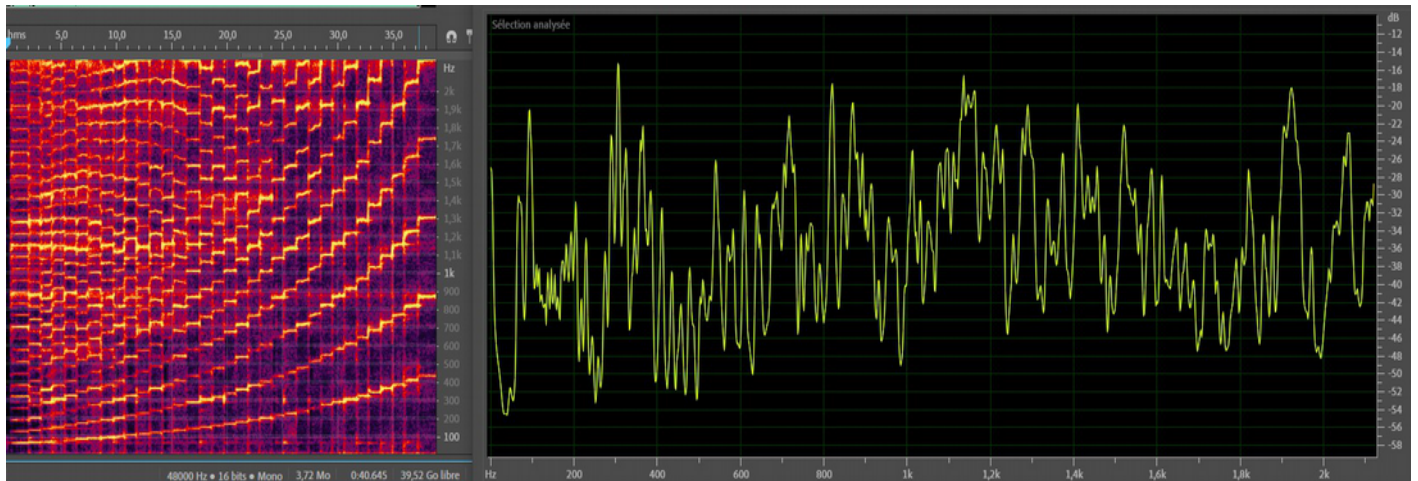
Il va permettre de préciser, pour un montage, les fréquences concernées par une diminution ou augmentation de l'amplitude.

Les bandes sombres horizontales de fréquences harmoniques « muettes » du Sonagramme, apparaissent cette fois verticalement, à droite sur le spectrogramme. Les fréquences sont mesurables en Hertz sur le Sonagramme, tout comme les intensités en Décibels, sur le Spectrogramme.



Sonagramme/Spectrogramme du montage cordier C300 . Plage 0 à 2kHz de la gamme enregistrée à l'accéléromètre.

Le même graphique avec le cordier C71, montre des variations d'amplitude bien plus faibles, sur ce montage perçectivement mieux apprécié



Sonagramme/Spectrogramme du montage cordier C71. Plage 0 à 2kHz de la gamme enregistrée à l'accéléromètre

Le spectrogramme des vibrations traversant le cordier, pour chacun des montages, montre ainsi ses zones d'amplitude faibles ou de fortes.

Ces plages correspondent elles à des fréquences de résonance propre des cordiers ?

L'analyse modale : Montre la fréquence et l'amplitude de pics de résonance propre d'un objet.

Elle permet aussi le calcul du Module d'élasticité et du coefficient d'Amortissement, qui sont des descripteurs sonores importants.

La signature modale d'un corps vibrant est une véritable carte d'identité sonore.

Luthiers et acousticiens étudient depuis des années les modes d'instruments historiques, espérant y trouver des recettes de réussite utiles pour leur propre facture .

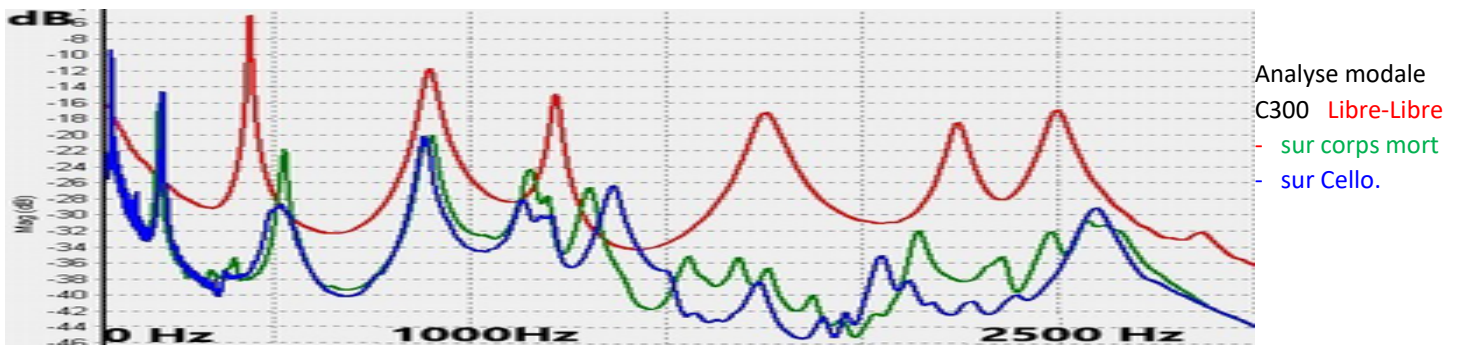
Malheureusement, ces facteurs de réussite organologique sont tellement complexes qu'il ne suffit pas de maîtriser et d'ajuster les modes d'un violon pour en faire un succès.

L'analyse modale des instruments en est encore à ses balbutiements, pour l'interprétation de ses Modes, lorsqu'on veut comprendre leur contribution à la sonorité finale.

L'intérêt de cette analyse sur le cordier est clair, puisqu'il permet de comparer des montages, à un niveau perceptif musical, accompagné de ses mesures acoustiques, en ne modifiant qu'un seul facteur, ici, l'essence du bois utilisé.

L'analyse modale des cordiers :

Chaque cordier a été étudié en mode « Libre-Libre »(posé sur un filet souple , sans aucune contrainte ni tension) (**courbe rouge**), puis en tension sur corps mort (Dead Rig) qui reproduit les contraintes et les tensions d'un cordier monté sans interférence d'une caisse de résonance (**en vert**), et enfin sur le Violoncelle (**en bleu**). En effet, le cordier seul, sur un filet souple, n'a pas le même comportement vibratoire lorsqu'il est mis en tension par les cordes. Il est encore modifié lors du montage sur le violoncelle.



Nous n'étudions pas les premiers modes jusqu'à 200Hz qui ont déjà été analysés dans nos études précédentes. Ceux-ci sont liés aux Modes Rigides du cordier, ainsi qu'aux modes A0 (Vibrations de l'air dans le corps de l'instrument) et B1+ (vibration du corps) du violoncelle.

Nous n'étudierons pas non plus les modes après 3000Hz : Au-delà, l'analyse est difficile, car elle manque de répétabilité, et le logiciel GStoppani software que nous utilisons atteint sa limite de significativité, en raison du chevauchement des modes.

Analyse globale Spectrogramme et Modes de résonance :

Nous cherchions à trouver des correspondances, entre les fréquences de modes de résonance du cordier, et celles des Sonagrammes/Spectrogrammes.

Nous les trouvons sur la Fiche individuelle du montage C300 qui suit.

Il est normal de ne pas trouver une correspondance exacte pour plusieurs raisons. **En particulier** les chevauchements de modes, et les différences entre les types de montage sur Corps mort/ sur violoncelle.

Une corrélation est trouvée, (sinon une concordance fréquentielle exacte) **entre les zones d'amplitude faibles ou fortes du Sonagramme** (premier tableau), que l'on retrouve sur le **Spectrogramme**, (second tableau) ainsi que les fréquences de plusieurs **modes du cordier monté sur Corps Mort**.(troisième tableau).

Cette concordance partielle montre comment le cordier est un filtre acoustique, qui favorise la transmission de ses propres modes, et contribue ainsi à la qualité sonore globale de l'instrument.

Fiche du : **C300 Buis Initial**

test Perceptif : +

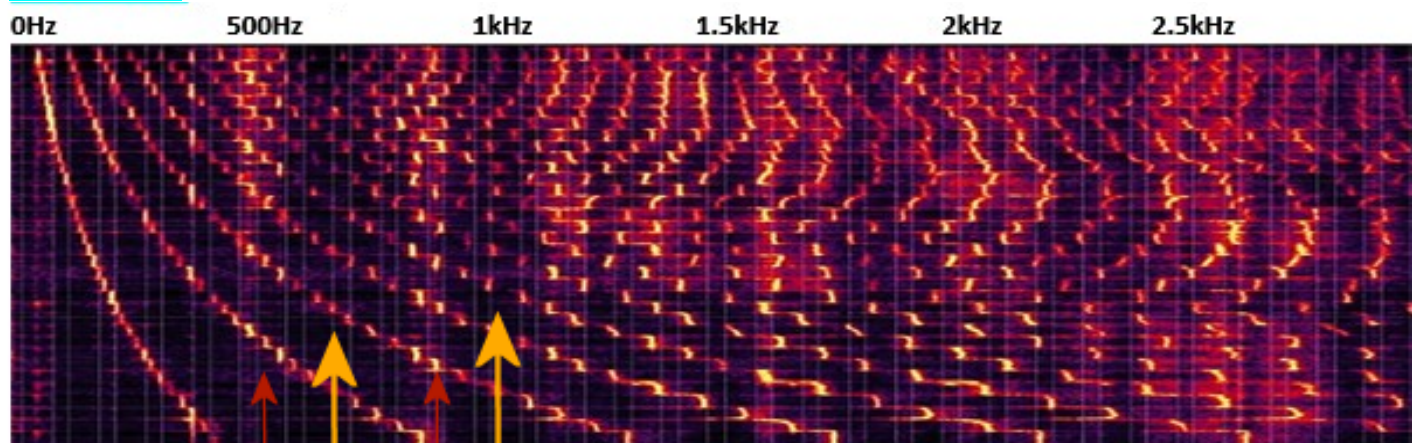
Cordier Free-Free: Densité : 0.95

Module Elasticité : 10.5 gPa

facteur Q (Amortissement Inverse) : 61

Correspondance des pics de spectrogramme avec la **courbe verte** des modes de cordier sur Corps Mort

SONAGRAMME (0 à 3kHz)



SPECTROGRAMME



Les Déformations modales du cordier									Type Déformation modale
Mode Corps Solide «Bascule»	Flexion1	Torsion1	Flexion2 Complex	Torsion2 Complex	Complex	Torsion2 Complex	Complex	Complex	
Néant	440Hz	899Hz	1223Hz			1759Hz			En Libre-Libre
208Hz	397 et 532	876	1145	1292	1670		2106	2563	Sur Corps Mort

Conclusions :

Nous avons mis en évidence une contribution sonore du cordier à la sonorité globale de l'instrument. La vibration des cordes est transmise à la caisse par les pieds du chevalet, mais l'est également par les vibrations du cordier, transmises au sillet du bas.

Une corrélation apparaît entre la qualité sonore de l'instrument, et les vibrations du cordier.

Les pics de vibration du Spectrogramme correspondent aussi plusieurs Modes de résonance propre du cordier, évalués par une Analyse Modale sur Corps Mort.

Lorsque les pics de Modes de résonance sont plus resserrés en fréquence, le spectrogramme est plus régulier, et la qualité sonore de l'instrument mieux appréciée.

La densité, le module d'élasticité, et le coefficient d'amortissement du bois utilisé semblent être des marqueurs intéressants, et demandent un complément d'expérimentation.

Nos Objectifs :

- Compléter cette analyse avec d'autres montages.
- Mieux comprendre les pics de spectrogramme qui ne correspondent pas aux pics modaux des cordiers. Il peut s'agir de pics de modes du Violoncelle lui-même, ou d'autres accessoires, comme le chevalet ou la touche.
- Comprendre l'interaction des marqueurs du bois, par l'essai d'autres essences.
- Une partie des essences intéressantes contient des Extractibles (Substances chimiques produites et présentes dans certaines espèces : Padouk, Grenadil, Pernambouc, Palissandres). Des essais seraient possibles avec le lessivage ou au contraire l'injection d'extractibles dans le bois, pour en étudier les modifications.
- Cherchons à comprendre pourquoi des cordiers « mous », comme l'Akustikus, les cordiers recoupés très court, peuvent bien fonctionner, pourquoi certains renforts-carbone sur des cordiers ont des effets favorables.
- Cherchons à comprendre et compléter notre étude sur l'évolution de la conception des cordiers chez Stradivari.
- Compléter cette étude matériaux avec une étude « montage » (les longueurs de corde d'attache), que nous n'avons pas complètement aboutie.

Notes sur les Marqueurs Qualitatifs du bois:

	Buis Initial C300	Padouk C70	Padouk C71	Epicea Densifié C66	Grenadil C40	Pernambouc C25
<i>Classement au test Perceptif</i>	+	+++++	+++++	++	+++++	++++
<i>Densité</i>	0.95	0.99	0.9	1.37	1.31	1.04
<i>Module gPa</i>	10.5	19	18.6	28	17	26
<i>Amortissement (facteur Q)</i>	61	134	105	72	102	132

Cet indice des marqueurs demande des confirmations avec plus de mesures.

La densité du bois n'est pas un facteur essentiel s'il est dans la fourchette de 0.9 et 1.4. Les bois trop légers sont rarement de bons contributeurs. Les bois très lourds ne sont pas un handicap.

Un bon Module d'élasticité est nécessaire, supérieur à 18 gPa. Il est possible qu'un Module très fort (>25), rende l'attaque de la note difficile.

Un bon facteur de qualité Q (bois peu amortissant), supérieur à 90, paraît nécessaire pour faire un bon cordier.