



**HAL**  
open science

# Sciences des cordes frottées : de la mécanique et la lutherie à la perception et au jeu instrumental

Claudia Fritz

► **To cite this version:**

Claudia Fritz. Sciences des cordes frottées : de la mécanique et la lutherie à la perception et au jeu instrumental. Acoustique [physics.class-ph]. Sorbonne Université, 2022. tel-03575594

**HAL Id: tel-03575594**

**<https://hal.science/tel-03575594v1>**

Submitted on 15 Feb 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SORBONNE UNIVERSITÉ  
INSTITUT D'ALEMBERT

Mémoire présenté pour l'obtention de  
l'Habilitation à Diriger des Recherches

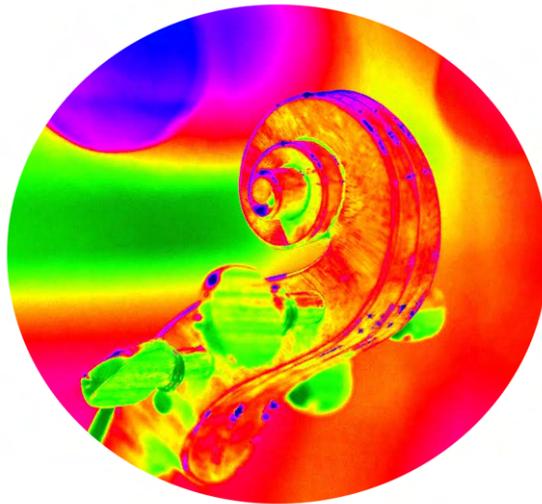
par

CLAUDIA FRITZ  
Chargée de Recherche

---

SCIENCES DES INSTRUMENTS À CORDES FROTTÉES :  
DE LA MÉCANIQUE ET LA LUTHERIE  
À LA PERCEPTION ET AU JEU INSTRUMENTAL

---



Habilitation soutenue le 9 Février 2022 devant le jury composé de :

BRIGITTE D'ANDREA NOVEL

XAVIER BOUTILLON

NATHALIE HENRICH-BERNARDONI

CATHERINE LAVANDIER

SABINE MEUNIER

PAUL NOULET

DANIEL PRESSNITZER

CAROLINE TRAUBE

Examinatrice

Rapporteur

Examinatrice

Examinatrice

Examinatrice

Luthier

Rapporteur

Rapporteuse



# Préface

Ce mémoire ne se veut pas un bilan exhaustif des travaux menés durant ma carrière mais vise plutôt à offrir un panorama varié en termes de sujets explorés, de collaborations, de méthodologies et/ou de résultats. Le niveau de détail avec lequel je présente chaque projet a été ajusté délibérément en fonction de ce que j'ai voulu mettre en valeur, de mon implication dans le projet ou tout simplement de la manière dont ce projet me tient à coeur.

Les travaux présentés concernent principalement les instruments à cordes frottées (d'où le choix du titre de ce mémoire) mais j'y ai aussi glissé un peu de guitare. J'ai par contre laissé de côté aussi bien ma thèse sur le conduit vocal du musicien dans le jeu de la clarinette [1] que d'autres travaux plus récents sur la guitare [2, 3] et la flûte baroque [4] (pour n'en citer que quelques uns), ainsi que mes études sur la perception du bang supersonique [5, 6] \*, afin de ne pas nuire à la cohérence et la concision de ce mémoire.

Enfin, un travail de recherche est par essence collaboratif, et j'aimerais donc remercier tous ceux qui y ont participé, qu'ils soient chercheurs, ingénieurs, luthiers, musiciens ou étudiants. Merci également à Pierrick et notre famille en Si majeur (Sidoine, Lucile et Siméon).

*Claudia Fritz*

---

\*. J'invite cependant les lectrices et lecteurs à regarder ce documentaire scientifique pour plus d'informations sur le projet : <https://youtu.be/543siie0Pvs?list=PLuRDibz-vRGmPIGL73zCTDYwouk0neDBh>



# Table des matières

Préface	iii
Table des matières	v
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Présentation générale de mes activités de recherche	1
1.2 Présentation de mes activités avec les luthiers	2
<b>2 Perception des instrumentistes et des auditeurs</b>	<b>7</b>
2.1 Vocabulaire utilisé par les instrumentistes et les auditeurs experts	8
2.1.1 Contexte	8
2.1.2 Les descripteurs anglais du timbre du violon	9
2.1.3 Différences entre instrumentistes et auditeurs	11
2.1.4 Conceptualisation des qualités par les instrumentistes	12
2.1.5 Projection	13
2.2 Perception des instrumentistes	15
2.2.1 Préférences et cohérence des jugements	15
2.2.2 Influence de la modalité tactile	16
2.2.3 Influence de la modalité visuelle	19
2.3 Perception des auditeurs	21
2.3.1 Cohérence des jugements	21
2.3.2 Sonie et projection	21
2.4 Conclusion	22
<b>3 Explorer et comprendre les qualités perçues par les instrumentistes</b>	<b>25</b>
3.1 Stradivarius : la part du mythe	25
3.1.1 Introduction et contexte	25
3.1.2 Méthodologie	26
3.1.3 Résultats	27
3.1.4 Discussion	27
3.2 Influence du modèle de violon : Stradivarius versus Guarnerius	28
3.3 Projet Bilbao : influence de l'épaisseur des tables	30
3.3.1 Contexte	30
3.3.2 Fabrication des violons	30
3.3.3 Mesures vibro-acoustiques	32
3.3.4 Tests perceptifs	35
3.4 Comparaison de violons d'étude et de violons de concert	37
3.5 Influence des cordes	38
3.6 Influence de la longueur de l'âme	38
3.7 Influence du bois du fond d'une guitare	39
3.8 Conclusion	41
<b>4 Explorer et comprendre les qualités perçues par les auditeurs</b>	<b>43</b>
4.1 Violons virtuels	44
4.1.1 Seuils de détection de modifications acoustiques	45
4.1.2 Vibrato et amortissement des modes de résonance	47
4.1.3 Influence de l'amplitude des modes de résonance	47
4.1.4 Discussion	48

4.2	Suprématie des Stradivarius à l'écoute: préférence et projection . . . . .	48
4.2.1	Méthodologie . . . . .	48
4.2.2	Résultats . . . . .	49
4.3	Le projet ObiAlto . . . . .	50
4.4	Qualités sonores des instruments du projet Bilbao . . . . .	51
4.4.1	Evaluation des triades . . . . .	51
4.4.2	Evaluation de chaque violon séparément . . . . .	52
4.5	Evaluation de violons en matériaux composites . . . . .	54
4.6	Influence de la longueur de l'âme . . . . .	55
4.7	Conclusion . . . . .	56
	<b>Bibliographie</b>	<b>57</b>

## 1.1 Présentation générale de mes activités de recherche

1.1 Présentation générale de mes activités de recherche . . . . .	1
1.2 Présentation de mes activités avec les luthiers . . . . .	2

Une des quêtes de l'acoustique musicale est de pouvoir faire le lien entre les paramètres de construction des instruments de musique et les qualités telles que perçues et évaluées par les musiciens et les auditeurs, éventuellement via des mesures acoustiques qui pourraient ainsi servir aux luthiers dans le suivi et le contrôle de leur production. Pour ce faire, il est nécessaire d'étudier toute la chaîne, de la fabrication de l'instrument à la production du son. Les divers maillons de cette chaîne sont représentés à la figure 1.1.

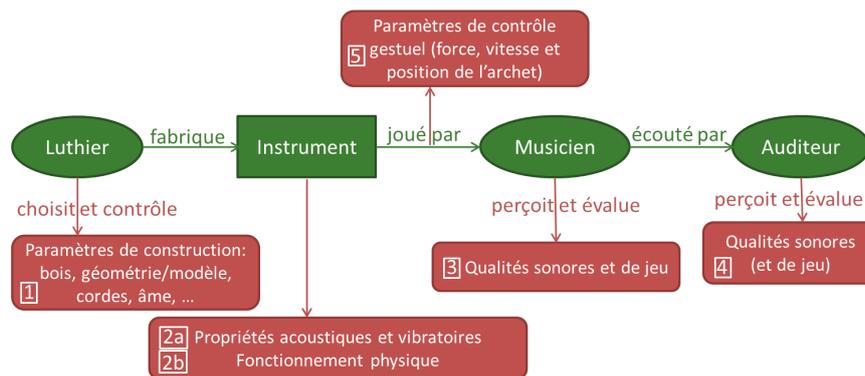


FIGURE 1.1 – Du luthier à l'auditeur en passant par l'instrument et le musicien : schéma des maillons étudiés (isolément et en interaction) dans mes travaux de recherche.

En reprenant les notations de la figure 1.1, l'objectif est de pouvoir faire le lien entre [1] d'une part et [3] et [4] d'autre part, via [2a]. Pour cela, il s'avère nécessaire d'étudier certains maillons aussi bien de manière indépendante qu'avec leurs diverses interactions.

La littérature est abondante sur [2a] et [2b] ainsi que sur le lien avec [1] [7, 8]. Certaines de ces études ont essayé de faire le lien avec les qualités des instruments [3] [9-13] mais évaluées par un seul musicien ou bien reposant sur des supposés liés à l'âge du violon, en d'autres termes « ancien = excellent » et « neuf = mauvais ». Ma principale contribution sur ce point est d'avoir commencé par étudier [3] et [4] grâce à des tests perceptifs impliquant de nombreux participants, souvent longs à mettre en place, à conduire et ensuite à analyser.

Durant mon post-doctorat à l'université de Cambridge, je me suis d'abord intéressée au lien entre [2a] et [4] (cf chapitre 4) à l'aide de la synthèse sonore de violons virtuels. Cependant, la nature un peu artificielle des sons synthétisés ainsi qu'une étude sur la différence d'évaluation entre les auditeurs et les musiciens [14] que j'ai réalisée à mon arrivée à d'Alembert,

[7] HUTCHINS et al. (1997), *Research Papers in Violin Acoustics 1975-1993 with an introduction essay 350 years of violin research - Volume 1*

[8] WOODHOUSE (2014), « The acoustics of the violin : a review »

[9] JANSSON (1978), « Tone characteristics of the violin »

[10] GABRIELSSON et al. (1979), « Long-time-average-spectra and rated qualities of twenty-two violins »

[11] HUTCHINS (1989), « A measurable controlling factor in the tone and playing qualities of violins »

[12] DÜNNWALD (1991), « Deduction of objective quality parameters on old and new violins »

[13] BISSINGER (2008), « Structural acoustics of good and bad violins »

[14] FRITZ et al. (2010), « A situated and cognitive approach of violin quality »

m'a conduite à m'intéresser d'avantage à [3] afin d'explorer, entre autres, quels sont les critères d'évaluation des musiciens, dans quelle mesure ils s'accordent sur l'évaluation de ces critères et comment ces évaluations peuvent être influencées par les modalités tactile et visuelle (cf chapitre 2). Ces travaux ont été principalement réalisés à partir de tests de jeu comparatif d'instruments choisis pour offrir une grande variété de facture, de période et de prix. Cependant, pour rechercher des liens entre [3] et [1] (cf chapitre 3), il a fallu au contraire limiter les variations entre instruments soit en contrôlant certains paramètres de construction (comme le modèle utilisé ou l'épaisseur des tables), soit en étudiant une modification de réglage (comme un changement des cordes ou de la longueur de l'âme). Dans tous les cas, suite à ma rencontre avec la psycholinguiste Danièle Dubois, une attention particulière a été donnée i) à la validité écologique [15, 16] des protocoles expérimentaux, à savoir placer autant que possible les participants dans des conditions naturelles pour que les résultats obtenus soient pertinents et informatifs par rapport à ce qui se passerait dans la vie réelle, et ii) à la rédaction des instructions et des questions posées pour récupérer, sans biais ou *a priori* induits par l'expérimentateur, les évaluations et réponses des experts que sont les participants aux tests (interprètes et luthiers principalement).

[15] GIBSON (1979), *The ecological approach to visual perception*

[16] GUASTAVINO et al. (2005), « Ecological validity of soundscape reproduction »

Pour les luthiers, la perception des interprètes prime puisque ce sont eux qui, *in fine*, achètent les instruments. Mais ces interprètes jouent généralement devant un public, et donc mieux comprendre l'évaluation par les auditeurs peut aussi s'avérer intéressante pour étudier des qualités comme la projection (qui se juge loin de l'instrumentiste). De plus, il peut aussi être intéressant de faire appel à des auditeurs afin d'étudier, sans influence du confort de jeu, des différences de timbre, en particulier dans le cas où on cherche à les relier à [2a], généralement mesurées sans instrumentiste (cf chapitre 4).

Malgré tous ces travaux, nous verrons que les liens entre les propriétés perceptives [3] et [4] avec [1] et [2] restent difficiles à obtenir. Parmi les raisons nous pouvons citer le faible accord entre les musiciens et le fait qu'un instrument ne produit pas de son tout seul. Pour compléter la chaîne, il faut donc aussi nous intéresser à la mesure des paramètres de contrôle gestuel [5] du musicien qui fait l'évaluation des qualités, afin de caractériser l'influence du musicien sur la réponse de l'instrument et mettre cela en regard avec sa perception. Ceci sera discuté au chapitre ?? ainsi que d'autres perspectives.

## 1.2 Présentation de mes activités avec les luthiers

Le but principal de mes travaux étant de faire le lien entre les qualités des instruments et leurs paramètres de construction, j'ai évidemment mené ces travaux en collaboration étroite avec des luthiers, en sus de mes collaborations académiques internationales. Ces collaborations sont absolument essentielles pour moi, car elle assurent aussi bien la pertinence des questions posées que celle des protocoles expérimentaux utilisés.

Ces collaborations ont pour la plupart débuté grâce à ma participation, sous l'invitation de Fan Tao (ingénieur chez le fabricant de cordes D'Ad-

dario et très impliqué dans la Violin Society of America) et de Joseph Curtin (luthier américain parmi les plus réputés au monde, lauréat de la prestigieuse MacArthur fellowship) à l'Oberlin Acoustics workshop, un atelier annuel rassemblant, pendant une semaine, luthiers et chercheurs du monde entier (même si principalement des Etats-Unis). Je suis dans l'équipe pédagogique chaque année depuis 2010 (sauf en 2020 et 2021, pandémie oblige). C'est sous mon impulsion que l'atelier a pris une tournure différente, mettant dorénavant le son de l'instrument (produit par un musicien!) au coeur des activités. Ceci s'est fait en invitant des musiciens au workshop et en organisant quotidiennement i) des tests en aveugle pour tester l'influence de modifications et de paramètres de construction sur le son en s'affranchissant des présupposés et des biais visuels et ii) des discussions centrées sur le son plutôt que sur des détails stylistiques ou bien des propriétés acoustiques toutes mesurées sans musicien. En retour, cela a nourri ma recherche et donné lieu à des projets absolument passionnants.

L'influence de mes travaux sur le travail des luthiers s'est avérée bien plus importante que je ne l'aurais imaginé, et m'a d'ailleurs valu un « Acoustics and Science Award » de la Violin Society of America en novembre 2020 (figure 1.2). Cette influence a pu opérer en particulier grâce à l'Oberlin Acoustics Workshop qui me permet, chaque année, de diffuser et discuter mes travaux, voire les mettre en application. Les luthiers qui y participent prêtent dorénavant beaucoup plus attention au son et réclament que je leur organise des tests de jeu et d'écoute en aveugle dans un but pédagogique. J'ai décidé de lancer une dynamique similaire en Europe, sachant que la demande de la part des luthiers européens était forte puisque beaucoup ne peuvent payer le déplacement (en plus des frais d'inscriptions) aux Etats-Unis, sans parler du coût écologique d'un vol transatlantique... J'ai ainsi créé deux événements annuels :

1. un atelier de recherche, que je co-organise depuis 2015 avec le luthier limousin Paul Noulet. Cet atelier rassemble quelques scientifiques et une quinzaine de luthiers européens (France, Espagne, Roumanie, Slovénie, Allemagne, Autriche, Angleterre, Italie, Belgique, Pays-Bas) qui ont déjà des connaissances en acoustique. Il n'y a pas de frais d'inscription : tout le monde paye sa part, mu par le même désir de faire avancer nos connaissances et notre compréhension du fonctionnement des instruments à cordes frottées. Cet atelier a lieu dans le magnifique lieu de résidence artistique qu'est la Ferme de Villefavard (Limousin) qui dispose d'une excellente salle de concert et de petites salles très adaptées pour des cours théoriques, des sessions pratiques et du travail de lutherie (pour fabriquer ou modifier les instruments ou leur composantes qui seront ensuite étudiés). Paul et moi gérons la logistique et je m'occupe en sus du

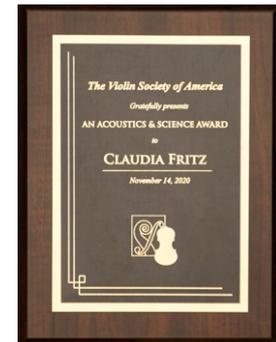


FIGURE 1.2 – Distinction décernée par la VSA.



FIGURE 1.3 – Différentes activités lors de l'atelier dans la très belle ferme de Villefavard : mesures vibro-acoustiques, travail de lutherie, séance d'écoute critique.

programme scientifique. Par ailleurs, nous avons en résidence un quatuor (le quatuor Confluence), qui permet de faire des tests de jeu et d'écoute en aveugle quotidiennement et inscrit cet atelier dans une dynamique collaborative entre chercheurs, luthiers et musiciens. Cet atelier permet aussi bien d'avancer sur des projets en cours que d'incuber de nouveaux projets.

[17] FRITZ et al. (2020), « ASIM - Acoustics for string instrument makers : a yearly European training school »

2. une formation (*training school*) en acoustique à destination des facteurs d'instruments à cordes, intitulée ASIM – Acoustics for String Instrument Makers [17]. Dans ce cas, les stagiaires payent des frais d'inscription afin que certains instructeurs (luthiers) puissent être rémunérés. Il est essentiel pour moi que cette formation soit accessible au plus grand nombre en étant peu chère mais surtout en voyageant à travers l'Europe, même si cela augmente considérablement la charge de travail d'organisation. Je cherche donc chaque année une école de lutherie qui accepterait d'accueillir la formation, gratuitement en échange de la participation gratuite de cinq étudiants. Après une première édition à l'Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique (ITEMM) au Mans en février 2017 (financé par le COST WoodMusick), une seconde a eu lieu en avril 2018 à Gand (Belgique) et une troisième en avril 2019 dans la célèbre école de lutherie de Mittenwald (Allemagne). L'ITEMM a accepté d'être partenaire de l'événement ce qui permet aux luthiers français de suivre cette formation gratuitement, grâce à un financement de l'organisme de formation continue des artisans, la FAFCEA. Le comité d'organisation est donc constitué d'une personne de l'école qui accueille la formation, d'un ingénieur de l'ITEMM et de moi. Le programme alterne des tests d'écoute critique en aveugle avec des musiciens, des séances de travaux-pratiques (mesures vibro-acoustiques, analyse modale, ...) et des cours théoriques sur l'acoustique et le fonctionnement du violon (donnés par les chercheurs qui travaillent dans ce domaine en Europe). Elle attire une vingtaine de participants (principalement des luthiers établis) plus quelques apprentis de l'école d'accueil. Pour des raisons évidentes, la quatrième édition qui aurait dû se tenir en Italie n'a pu avoir lieu en 2020, ni même en 2021.

Par contre, pour que 2020 ne soit pas une année blanche, avec l'annulation des trois événements cités ci-dessus, j'ai organisé une conférence internationale en ligne, à laquelle plus de 400 participants du monde entier se sont inscrits (chercheurs et luthiers). Jusqu'à 180 participants étaient connectés simultanément, pour certains dès 3h du matin en raison du décalage horaire ! Intitulée *Sharpening the scientific tools for violin making*, cette conférence a offert un panorama des recherches récentes sur les instruments à cordes frottées, dans différents domaines – mécanique, acoustique, chimie, sciences du bois, intelligence artificielle, pédagogie, interprétation – avec une vingtaine de présentations, ponctuées de quelques interludes musicaux. La figure 1.4 fournit un aperçu du programme. J'ai enregistré toutes les présentations et les ai mises en ligne sur la chaîne youtube de *∂'Alembert*<sup>1</sup>. Certaines ont déjà été regardées près d'un millier de fois.

1: <https://www.youtube.com/playlist?list=PLuRDIBz-vRGnJSGfYsvsfFKLBQrYkL0an>



## Sharpening the scientific tools for violin making

Free online conference organised  
by Claudia Fritz  
Institut d'Alembert, Sorbonne Université - CNRS, Paris

**5 - 9 October 2020**  
CET time zone

### Monday 5 October 2020

10:00-10:45	Colin Gough: The transition from free plates to the finished instrument - What is important for the violin maker
11:00-12:00	Jim Woodhouse: The acoustics of the banjo
13:30-14:50	Lei Fu: Exploring the perception of violin qualities: student- vs. performance-level instruments, strings and soundpost height
15:00-16:00	Augusto Sarti and Fabio Antonacci: Musical Acoustics Lab in Cremona
16:00	Musical interlude by Cristian Fatu: Bach – Sarabande, on the 1714 "Jackson" Stradivari
16:30-18:30	Claudia Fritz: Basic violin acoustics

### Tuesday 6 October 2020

9:00-10:00	Claudia Fritz: Modal analysis and sound radiation measurement in a nutshell
10:00-12:00	Romain Viala: Numerical and experimental approaches for instrument making
14:00-16:00	Iris Brémaud: Tonewoods – at the crossroads between wood physics and craftsmanship knowledge
16:00	Musical interlude by Cristian Fatu: Kreisler – Recitativo & Scherzo Caprice, on the 1742 "Sloan" Del Gesu.
18:00-19:30	Sarah Lämmlein: Violin varnish induced changes in the vibro-mechanical properties of spruce and maple wood

### Wednesday 7 October 2020

10:30-12:00	Colin Gough: Acoustic characterisation in the workshop
14:00-15:00	Sebastian Gonzalez: violin shape optimisation with finite elements modelling and artificial intelligence

15:00-15:30	Mirco Pezzoli: directivity analysis of the historical Cremonese makers
15:30-16:00	Raffaele Malvermi: machine intelligence in the support of the Cremonese makers
16:00	Cédric Lebonnois: artistic and sound evolution of a trio through close interaction with the makers of their instruments and bows Musical interlude by Trio Joseph Hel: Goldberg Variations on instruments made by Bruno Dreux and Benjamin Paule, and bows made by Léo Pastureau (Orléans, France).

### Thursday 8 October 2020

11:00-12:00	Tim Duerinck: Music instruments with extra fiber? Composite materials for soundboards from theory to practice
14:00-15:00	George Stoppani: Chemistry for violin makers
15:00-16:30	Jean-Philippe Echard: History of varnishes
16:30-17:00	Jacob von Lippe: Deconstructed violins as an educational tool for kids
17:00-17:30	Jacob von Lippe: The KLANG:FOKUS festival – Exploring the sound of 20 years of making
17:30	Musical interlude by Nathan Giem: Bach – Partita

### Friday October 2020

10:00-11:00	Francesco Piasentini: Industrial X-ray CT for violin makers: a path to teleportation
11:00-12:00	George Stoppani: Gut strings – and all it entails
14:00-16:00	Claudia Fritz: Some results from the Bilbao project
16:00	Musical interlude by Cristian Fatu: Paganini – Caprice 24 on the 1714 "Jackson" Stradivari



Detailed programme  
and free registration



FIGURE 1.4 – Programme de la e-conférence internationale *Sharpening the scientific tools for violin making* que j'ai organisée en octobre 2020.

Ce fut un véritable succès car cela a ouvert les portes de l'acoustique à de nombreux luthiers qui n'auraient jamais pu participer s'il leur avait fallu payer des frais d'inscription, de transport et de logement. Cela a également montré une envie de nombreux luthiers de se retrouver et discuter d'acoustique plus régulièrement, et ainsi donné naissance à un séminaire mensuel de 2 à 3h (plus digeste qu'une semaine de conférences!) organisé par Fan Tao.

En sus des événements que j'organise, je suis régulièrement impliquée dans des événements ponctuels, en Europe et aux Etats-Unis. Ainsi, je participe très souvent aux Journées Factice Instrumentale et Science organisées par l'ITEMM, depuis 2009. J'ai également été invitée à intervenir trois fois à la convention annuelle de l'Association des Luthiers et Archetiers pour le Développement de la Factice Instrumentale du quatuor et deux fois à la convention annuelle de la Violin Society of America. J'ai été invitée début mars 2020 à Oslo, pour présenter mes travaux et organiser un test d'écoute en aveugle pour les luthiers norvégiens, à l'occasion du congrès annuel de leur guild, la Norsk Instrumentmakerforening et j'ai été invitée en octobre 2021 à la première conférence internationale *Women in Lutherie* (en virtuel). Je viens également d'être invitée à organiser la formation ASIM en Chine en 2022... reste à savoir si la situation sanitaire le permettra.



# Perception des instrumentistes et des auditeurs

# 2

En dépit d'investigations régulières, l'identification des qualités particulières qui font que certains violons (en particulier les plus célèbres, à savoir ceux de Stradivarius) sont si appréciés des musiciens, s'est révélée particulièrement difficile. Les scientifiques (parfois en collaboration avec des luthiers) ont cherché depuis longtemps des paramètres acoustiques mesurables qui pourraient corrélérer avec la qualité musicale d'un instrument mais sans grand succès. Une des raisons à cet échec est que la qualité d'un violon a souvent été considérée dans le passé comme évidente, quelque chose qui pourrait être déterminé par n'importe quel instrumentiste compétent ou auditeur expérimenté. Par exemple, Dünwald écrivait en 1991 dans un article qui a beaucoup été cité en acoustique du violon [12] : " Experienced listeners are able to judge the sound quality of an instrument after having heard only a few notes being played ". Quand à Weinreich [18], il écrivait en 1993 : "... if we hand any experienced player a violin and ask that it be classified into one of three categories : (1) 'student instrument;' (2) 'decent professional instrument;' or (3) 'fine solo instrument,' the judgement would not take more than about 30 s, and the opinions of different violinists would coincide absolutely. (Perhaps 'absolutely' is an overstatement, since borderline cases are always possible; but there would at least not be a question about which border such an instrument is on.)". Weinreich reconnaissait cependant que des tests en aveugle étaient nécessaires pour confirmer sa supposition. Ce n'est cependant qu'à partir de mon recrutement au CNRS que de tels tests ont vraiment commencé à être initiés, afin d'explorer ce que musiciens et auditeurs pouvaient percevoir.

Les travaux décrits dans ce chapitre s'inscrivent donc dans cette thématique générale visant à mieux comprendre l'évaluation perceptives des instruments à cordes frottées par des instrumentistes et des auditeurs afin de pouvoir, ensuite, faire le lien entre les propriétés perceptives et les propriétés vibratoires et acoustiques d'une part et les paramètres de lutherie d'autre part. Ce sont parmi les tout premiers travaux qui, au-delà des caractéristiques des instruments joués, s'intéressent aux critères d'évaluation des participants, à la cohérence de leurs jugements, à l'accord entre les participants, à l'influence de divers paramètres sur l'évaluation, ... Deux types principaux de méthodologie s'offrent à nous pour avoir accès à la perception des instrumentistes et des auditeurs : leur demander d'en parler ou bien leur demander d'évaluer en pratique des instruments (notations sur des échelles, classement par préférence, catégorisation, ...), les deux méthodologies pouvant être utilisées simultanément. Ainsi, nous nous sommes d'une part intéressés aux termes utilisés par les instrumentistes et les auditeurs (musiciens et luthiers principalement) pour décrire les qualités d'un violon, puis comment ces qualités sont conceptualisées par ces experts. Ces travaux ont été réalisés à l'aide d'analyses linguistiques de questionnaires et d'entretiens et sont décrits dans 2.1. D'autre part, nous avons réalisé des tests perceptifs, qui se décomposent en deux catégories :

2.1 Vocabulaire utilisé par les instrumentistes et les auditeurs experts . . . . .	8
2.1.1 Contexte . . . . .	8
2.1.2 Les descripteurs anglais du timbre du violon . . . . .	9
2.1.3 Différences entre instrumentistes et auditeurs . . . . .	11
2.1.4 Conceptualisation des qualités par les instrumentistes . . . . .	12
2.1.5 Projection . . . . .	13
2.2 Perception des instrumentistes . . . . .	15
2.2.1 Préférences et cohérence des jugements . . . . .	15
2.2.2 Influence de la modalité tactile . . . . .	16
2.2.3 Influence de la modalité visuelle . . . . .	19
2.3 Perception des auditeurs . . . . .	21
2.3.1 Cohérence des jugements . . . . .	21
2.3.2 Sonie et projection . . . . .	21
2.4 Conclusion . . . . .	22

[12] DÜNNWALD (1991), « Deduction of objective quality parameters on old and new violins »

[18] WEINREICH (1993), « What science knows about violins – and what it does not know »

- des tests de jeu pour explorer la perception des instrumentistes (partie 2.2), impliquant entre une dizaine et une vingtaine de participants de haut niveau.
- des tests d'écoute pour explorer la perception des auditeurs (partie 2.3). Ces tests ont majoritairement été conduits en *live* avec une cinquantaine de participants en moyenne mais aussi, dans certains cas, sur la base d'enregistrements.

Comme le but est de corrélérer qualités perçues et propriétés acoustiques et vibratoires, nous voulions nous assurer que les qualités perçues soient uniquement basées sur ces propriétés et de ce fait, tous les tests ont été réalisés en aveugle<sup>1</sup> pour supprimer tout biais visuel.

1: Les musiciens portent des lunettes de soudeur très foncées dans des conditions de lumière tamisée dans les test de jeu, et les musiciens et l'audience sont séparés par un rideau acoustiquement transparent dans les tests d'écoute *live*.

## 2.1 Vocabulaire utilisé par les instrumentistes et les auditeurs experts

### 2.1.1 Contexte

Alors que la littérature sur la perception du timbre musical, sur les processus qui la sous-tendent – tels que la structure de sa représentation perceptive, la catégorisation et la reconnaissance des sons, la mémoire du timbre, la capacité à susciter des associations sémantiques, ainsi que les mécanismes neuronaux sous-jacents – mais aussi sur les descripteurs audio qui pourraient expliquer les différentes « dimensions » du timbre est foisonnante depuis les années 1960-70 (cf par exemple [19] pour une revue du domaine et [20] pour une compilation des études les plus récentes), un nombre beaucoup plus restreint d'études s'est intéressé à explorer scientifiquement les nuances de timbre d'un instrument donné et le vocabulaire utilisé ([21-25]) jusqu'à la thèse de Caroline Traube sur le timbre de la guitare [26], un an avant que je ne commence mes travaux sur le violon. Elle y décompose le contrôle du timbre en « paramètres statiques » liés aux composantes structurelles de la guitare, et les « paramètres dynamiques », liés au geste instrumental exécuté par le guitariste sur son instrument, à savoir la position du point de pincement sur la corde (plus ou moins proche du chevalet) et le type de pincement (avec le bout de l'ongle, la dernière phalange rigide, ...). Ici, nous nous intéressons aux paramètres dits « statiques » à savoir liés à l'instrument, même si évidemment, un instrument ne produit pas de son tout seul, et par conséquent, la manière de jouer de l'instrumentiste influence ces paramètres. Autrement dit, nous ne nous intéressons pas aux différents timbres qui peuvent être produits sur un violon donné en fonction de combinaisons particulières de force, position et vitesse d'archet mais au timbre de divers violons tel qu'il peut être évalué globalement par les instrumentistes et les auditeurs (et qui dépend, là est la complication, de la façon dont les violons sont joués).

Par ailleurs, le timbre n'est qu'un aspect de la qualité d'un instrument de musique, du moins pour les instrumentistes. Plusieurs études se sont intéressées à la qualité des violons mais quasiment exclusivement d'un point de vue purement physique en comparant des mesures acoustiques d'une série d'instruments (incluant souvent des violons italiens anciens et des violons neufs<sup>2</sup>). La qualité était alors soit tout simplement supposée

[19] McADAMS (2013), « Musical timbre perception »

[20] SIEDENBURG et al. (2019), *Timbre : Acoustics, Perception, and Cognition*

[21] A. MELKA et al. (1996), « Czech and german verbal description of violin sound properties : Multidimensional analyses of survey data »

[22] MARTENS et al. (2000), « Topic-dependent adjective use in japanese and sinhala : Selection of adjectives differentiating guitar sounds »

[23] RIOUX et al. (2001), « Analyses of verbal descriptions of the sound quality of a flue organ pipe »

[24] FITZGERALD (2003), « Performer-dependent dimensions of timbre : identifying acoustic cues for oboe tone discrimination »

[25] DISLEY et al. (2003), « Timbral semantics and the pipe organ »

[26] TRAUBE (2004), « An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar »

2: « A comparison of old italian violins with present-day ones is an obvious way to start research on tone quality » [27]

à partir de l'âge des violons [12, 27], soit décrite sommairement par les propriétaires des violons [11]. L'influence de certains paramètres physiques (principalement la fréquence et l'amplitude des modes de résonance, déduites de la mesure de l'admittance au chevalet) sur la qualité sont parfois formulés à l'aide de descripteurs mais sans aucune étude perceptive. Ainsi Meinel [27] et Dünwald [12] ont chacun suggéré des divisions de la réponse d'un violon en quatre régions critiques pour la qualité : des résonance de grande amplitude à basse fréquence (en-dessous de 800 Hz) créeraient un son qui porte ; plus la réponse acoustique est faible aux alentours de 1.5 kHz, moins le son serait nasal ; un pic important autour de 2–3 kHz (dénommé actuellement « bridge hill ») serait associé à un son brillant et un rayonnement efficace ; et des résonances de faible amplitude à haute fréquence (au-dessus de 3 kHz) permettraient un son doux et clair. Plus récemment, Schleske énonçait que des violons dont la fréquence du mode B1+ était inférieure à 510 Hz (resp. supérieure à 550 Hz) seraient doux (resp. durs), moins résistants (resp. plus résistants) et plus sombres (resp. plus brillants) [28].

Seules deux études mentionnent des descripteurs dans le but de faire des évaluations perceptives « standardisées » : Bissinger et Gearhart [29] ont proposé quelques termes sur la base d'une liste de 80 termes (et leur fréquence) fournie par Jim Woodhouse, mais sans aucune précision sur comment cette liste a été collectée ni comment les auteurs l'ont réduite et ont choisi les synonymes et les antonymes proposés. Dans [30] ont été réalisés des tests de jeu et d'écoute pour comparer deux violons « jumeaux » juste après leur construction, puis deux ans après que l'un était resté dans un musée tandis que l'autre avait été joué quotidiennement. A cet effet, quelques jours avant la première expérience, les membres du jury ont dû remplir un questionnaire dans lequel ils ont listé les catégories et les qualités qu'ils utiliseraient pour évaluer un violon lors d'un potentiel achat. Les six mots les plus communs ont été ensuite retenus pour les questions posées aux musiciens et aux auditeurs durant les expériences.

A la lumière des études précédentes, il nous est apparu important d'explorer scientifiquement, en anglais et en français, le vocabulaire utilisé par les musiciens pour décrire les qualités (et pas uniquement le timbre) d'un violon, pris dans son ensemble (et pas uniquement des notes isolées [31]). Le passage, dans la formulation, de « qualité » à « qualités » n'est pas anodin. Alors que la majorité des études citées précédemment parlent de la qualité en général (violin quality), la réduisant trop souvent à bonne ou mauvaise, je préfère utiliser « qualités » au pluriel car il y en a évidemment plusieurs (timbre, jouabilité, ...) comme nous le verrons ci-dessous.

## 2.1.2 Les descripteurs anglais du timbre du violon

Il s'agit de la première étude lexicale que j'ai réalisée, lors de mon post-doctorat à l'Université de Cambridge. L'objectif principal était de déterminer un lexique de descripteurs du timbre qui étaient pertinents pour les experts, à savoir les violonistes et les luthiers. Ce lexique devait avoir une structure qui permette de représenter l'espace des descriptions sans redondance via l'inclusion de synonymes ou quasi synonymes.

[27] MEINL (1957), « Regarding the sound quality of violins and a scientific basis for violin construction »

[12] DÜNNWALD (1991), « Deduction of objective quality parameters on old and new violins »

[11] HUTCHINS (1989), « A measurable controlling factor in the tone and playing qualities of violins »

[28] SCHLESKE (2002), « Empirical tools in contemporary violin making : Part I. Analysis of design, materials, varnish, and normal modes »

[29] BISSINGER et al. (1998), « A standardized qualitative violin evaluation procedure »

[30] INTA et al. (2005), « Measurement of the effect on violins of ageing and playing »

[31] ŠTĚPÁNEK et al. (1999), « Rustle as an attribute of timbre of stationary violin tones »

alive	balanced	brash
bright	brilliant	clean
clear	closed	cold
complex	dark	dead
deep	dull	even
free	full	hard
harsh	heavy	interesting
light	lively	loud
mellow	metallic	muffled
muted	nasal	not penetrating
open	penetrating	piercing
powerful	pure	quiet
raspy	resonant	responsive
rich	ringing	rough
round	sharp	shrill
singing	smooth	soft
sonorous	steely	strident
strong	sweet	thin
tinny	tiny	unbalanced
uneven	unresponsive	warm
	weak	

Tableau 2.1 – Les 61 descripteurs qui ont été utilisés pour la catégorisation sémantique.

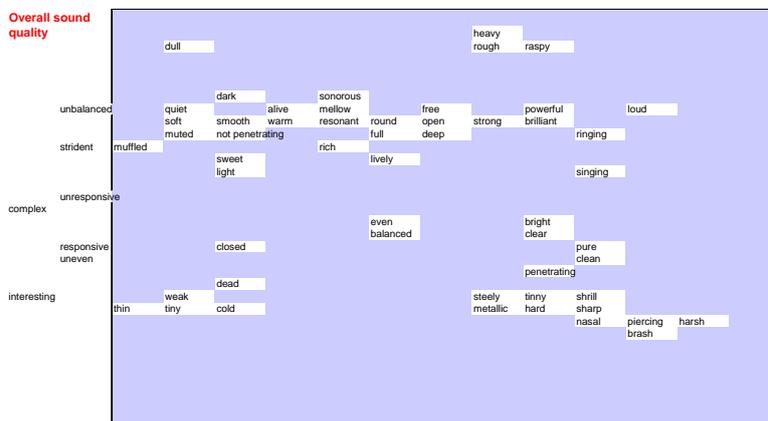
[32] RUGG et al. (2005), « The sorting techniques : a tutorial paper on card sorts, picture sorts and item sorts »

[33] CHARLES (2000), « Contextual correlates of meaning »

J’ai conduit des entretiens avec 19 violonistes (de langue maternelle anglaise), durant lesquels je leur ai demandé de fournir entre 5 et 10 termes qu’ils utilisent pour décrire le timbre d’un violon, ainsi que, si possible, de donner pour chacun d’eux des synonymes et des antonymes. Des termes ont aussi été collectés dans les descriptions de la sonorité de violons publiées dans les dix volumes du magazine *The Strad* (Vols. 107–117) publiés entre 1996 et 2007. Bien que *The Strad* ait été publié depuis 1890, nous nous sommes concentrés sur les dix volumes les plus récents pour éviter des effets possibles de variations de langage au cours du temps. Nous nous sommes intéressés aux articles qui présentaient des descriptions de violons célèbres ou décrivaient des interprétations sur des violons particuliers ou des techniques de construction de violons. Comme nous voulions développer un lexique qui avait du sens pour une large communauté d’experts violonistes et luthiers, nous avons enlevé les termes qui apparaissaient moins de trois fois (comme par exemple *silvery, golden et woody*). La liste finale inclut 61 descripteurs, donnés dans le tableau 2.1 par ordre alphabétique.

Quinze violonistes expérimentés (de langue maternelle anglaise) ont dû arranger ces 61 termes par similarité. L’approche expérimentale utilisée est une variante de la technique de classement de cartes pour éliciter et structurer la connaissance d’experts qui est couramment utilisée dans le domaine de l’ingénierie (par exemple [32]) mais n’est pas très sensible. Une alternative plus sensible est l’utilisation de jugements de similarité sémantique par paire : les participants évaluent le degré de similarité sémantique entre deux termes sur une échelle continue ou de Likert (par exemple [33]). Nous avons développé une technique qui est plus sensible que le classement de cartes mais qui est applicable en pratique à un grand nombre de termes. Elle permet aux participants de faire des groupes

FIGURE 2.1 – Illustration du tableur excel utilisé pour grouper les termes par similarité sémantique, dans le cas d’une catégorisation pour le contexte "qualité sonore globale". Les mots à gauche sont ceux qui n’ont pas été utilisés par le participant.



de termes, comme illustré à la figure 2.1. Nous avons utilisé un tableur Excel, dans lequel les participants pouvaient arranger les termes en les coupant-collant d’une liste initiale (ordre aléatoire) sur le côté de l’écran. Les participants pouvaient construire des groupes en plaçant les termes dans une même colonne ou ligne du tableur et exprimer des distances relatives en les plaçant loin voire dans des coins opposés. Les participants ont été invités à faire la tâche pour quatre contextes différents : qualités sonores globales, qualités sonores du registre grave, qualités sonores du registre aigu et facilité de jeu. Ils étaient libres de laisser de côté les termes qu’ils ne considéraient pas pertinents pour chaque contexte.

Grâce à une analyse multidimensionnelle, des espaces sémantiques ont été obtenus pour chaque contexte. L'espace tridimensionnel obtenu pour les qualités sonores globales et l'espace bidimensionnel pour la facilité de jeu sont présentés respectivement à la figure 2.2.

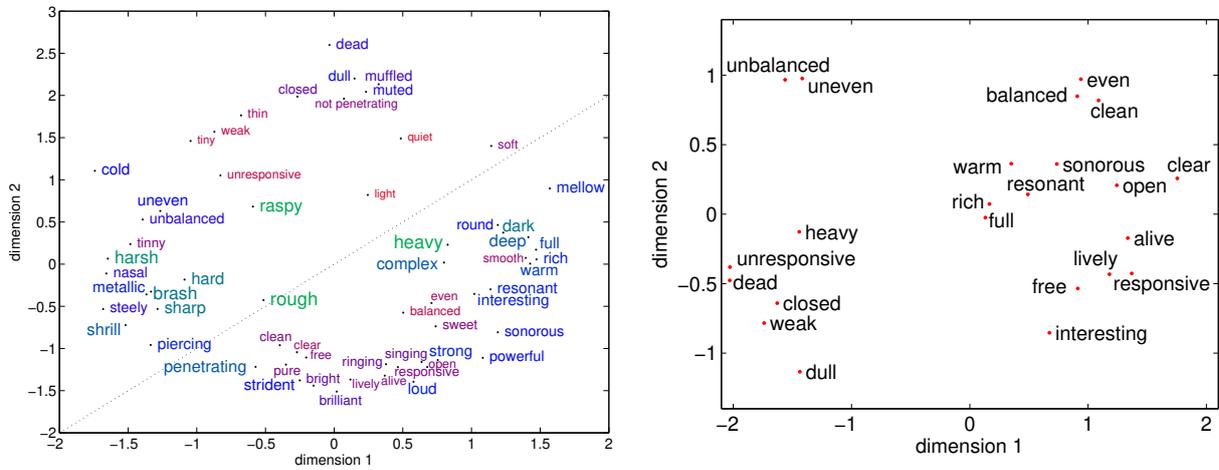


FIGURE 2.2 – Espaces sémantiques obtenus par analyse multidimensionnelle pour le contexte « qualités sonores globales » à gauche (la troisième dimension est représentée par la taille et la couleur du texte de petit/rouge à grand/vert) et « facilité de jeu » à droite.

Ces espaces permettent d’identifier des dimensions sémantiques qui offrent des pistes d’investigation de corrélation avec des dimensions acoustiques. Ainsi, pour les qualités sonores globales, les dimensions ainsi que des interprétations possibles sont proposées dans le tableau 2.2. Pour la facilité de jeu, l’espace se divise en deux verticalement, avec facile à jouer à droite et difficile à jouer à gauche. L’autre dimension correspond aux raisons de cette facilité ou difficulté à jouer : raisons liées à l’équilibre en haut, à la qualité du son au milieu, et à la réponse en bas.

Tableau 2.2 – Dimensions obtenues pour le contexte « qualités sonores globales ».

Dimension	Propriété négative	Propriété positive	Interprétation
1	cold	mellow	équilibre spectral, propriétés indésirables associées avec un excès de hautes fréquences ou un manque de basses fréquences
	metallic, harsh	rich, warm	
	unbalanced	balanced	
2	dull	bright	énergie spectrale, en particulier dans les registres médium et aigu volume sonore produit par l’instrument response of the instrument in the time domain
	muted	powerful	
	dead, unresponsive	lively, responsive	
3	clean	raspy	aspect bruité du son son profondeur, largeur de la distribution de l’énergie spectrale
	thin	heavy	

Les deux espaces mettent bien en évidence que certains termes qui sont antonymiques dans le sens commun ne le sont pas dans le cas du violon (par exemple *bright* et *dark*, ce qui est en accord avec le fait que les musiciens disent souvent qu’un bon violon est à la fois *dark* (sur les cordes graves) et *bright* (sur les cordes aiguës)).

Les résultats des autres contextes sont disponibles dans [34].

[34] FRITZ et al. (2012), « Exploring violin sound quality : Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties »

### 2.1.3 Différences entre instrumentistes et auditeurs

Dans l’étude précédente, les entretiens avec les musiciens avaient été conduits en-dehors d’une expérience d’évaluation de violons. Comme

le but *in fine* est de pouvoir associer les qualités perçues avec des propriétés acoustiques, il est important de mieux appréhender les processus psychologiques qui sont en jeu lors des évaluations à savoir comprendre comment les violonistes et les auditeurs experts (principalement violonistes, luthiers, autres instrumentistes à cordes frottées) évaluent les qualités d'un violon, comment ils conceptualisent la qualité d'un violon, quels aspects du son et de l'expérience de jeu sont essentiels, etc. et ceci en situation. Par conséquent, des tests perceptifs ont été réalisés avec un certain nombre de questions ouvertes permettant une étude psycho-linguistique des réponses.

[14] FRITZ et al. (2010), « A situated and cognitive approach of violin quality »

Dans une première expérience, nous avons enregistré les réactions orales de quatre violonistes lors de leur évaluation de trois instruments en les jouant mais aussi en les écoutant joués par un autre violoniste. Les 8h d'enregistrements ont été transcrites et analysées linguistiquement [14]. Ceci nous a permis dans un premier temps d'identifier les ressources linguistiques qui sont disponibles en français pour les violonistes pour rendre compte de leurs expériences, en particulier pour décrire ce qui apparaît comme deux entités : le violon et son son. Dans un deuxième temps, une analyse sémantique des discours a montré que ces ressources étaient partagées par les participants mais utilisées différemment pour qualifier les violons dans les deux conditions. En particulier, l'analyse a révélé que certains aspects, comme la *facilité de jeu* ou la *projection*, étaient utilisés fréquemment en situation de jeu mais très peu en situation d'écoute, ce qui paraît intuitif pour la facilité de jeu, mais beaucoup moins pour la projection. Ceci peut cependant être expliqué par le fait que, dans la condition d'écoute, l'évaluation est basée sur le son seul, et par conséquent sans possibilités de comparaison ou de contrôle sur la nature du son et la manière dont il a été produit. Or ces possibilités s'avèrent indispensables pour l'évaluation complète des qualités d'un instrument ainsi que le montre le statut de sujet attribué au violon dans les évaluations faites en situation de jeu ou dans les réponses aux questions générales (posées en préalable des tests) de ce qu'est un « bon » ou « mauvais » violon pour eux (« le violon parle », « le violon me renvoie de l'énergie », ...).

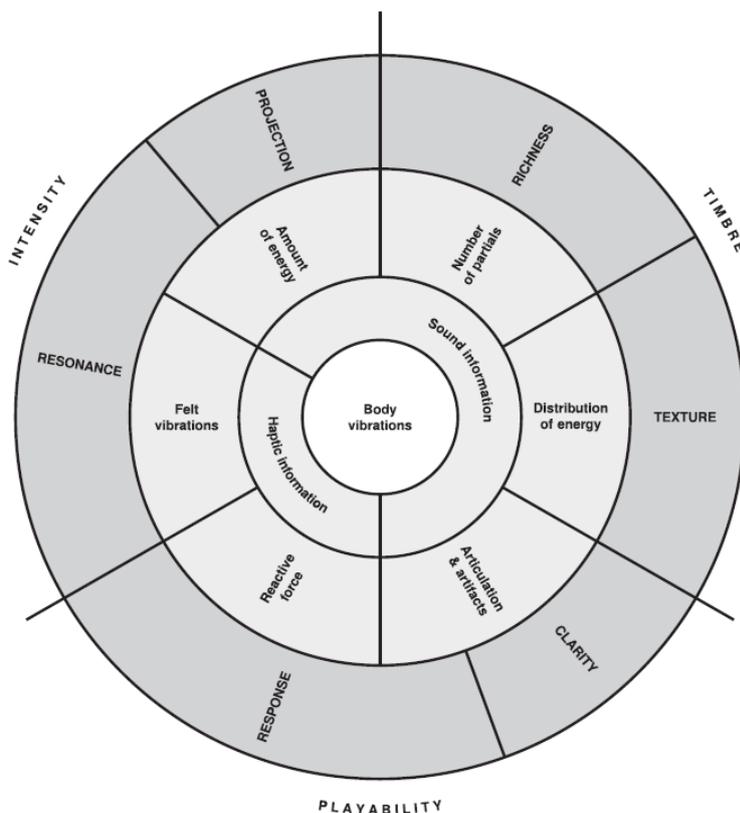
#### 2.1.4 Conceptualisation des qualités par les instrumentistes

[35] SAITIS (2014), « Evaluating violin quality : player reliability and verbalization »

Ce travail sur les données verbales obtenues lors de tests en situation de jeu a été poursuivi dans la thèse de Charalampos Saitis [35], que j'ai co-encadrée avec Gary Scavone (McGill, Montréal). Cette fois, il s'agit de données écrites, issues de questionnaires écrits, moins riches mais plus faciles à analyser que des questionnaires oraux, puisque cela évite la lourde tâche de transcription. Nous nous sommes d'abord intéressés à regarder si la forte cohérence intra-individuelle et le faible accord inter-individuel obtenus dans des évaluations consistant en des classements de préférence (de 8 violons par 20 musiciens, cf partie 2.2.1) se retrouvent au niveau des réponses verbales. Quatre questions avaient été posées dans le but d'obtenir un éclairage sur les préférences des participants, à savoir « Avec quels critères avez-vous effectué votre classement et de quelle façon les avez-vous utilisés ? », « A propos du violon que vous avez classé comme votre préféré : pourriez-vous nous dire pourquoi ? », « A propos

du violon que vous avez classé en dernier : pourriez-vous nous dire pourquoi? » ou « En général, comment définissez-vous personnellement un très bon violon? ». Une analyse quantitative des occurrences des divers critères utilisés montre qu'on retrouve la même forte cohérence intra-individuelle et le même faible accord inter-individuel dans les verbalisations, sans pour autant que la forte variabilité individuelle obtenue dans les données verbales puisse expliquer la forte variabilité individuelle obtenue dans les classements [36].

Par ailleurs, une analyse psycho-linguistique des concepts exprimés dans les réponses à ces quatre questions a également été effectuée [37]. 80% des formulations analysées se répartissent de manière quasi équitable dans trois catégories principales : le timbre, le volume sonore et la jouabilité. Par ailleurs, grâce à cette analyse, le modèle de la figure 2.3 a pu être proposé : il met en lumière ce qui est important pour les instrumentistes et suggère des pistes d'investigation pour corrélérer les propriétés perceptives avec des propriétés mécaniques.



[36] SARRIS et al. (2012), « Investigating consistency in verbal descriptions of violin preference by experienced players »

[37] SARRIS et al. (2017), « Perceptual evaluation of violins : A psycholinguistic analysis of preference verbal descriptions by experienced musicians »

FIGURE 2.3 – Modèle proposant des liens entre le comportement dynamique d'un violon et les qualités perçues par un violoniste, extrait de [37].

### 2.1.5 Projection

Dans ce modèle, *projection* apparaît comme l'une des cinq principales qualités [37]. L'importance de cette qualité avait déjà été mise en évidence lors d'entretiens conduits en italien par d'autres chercheurs [38], et appelée « propagation ». Sans analyse linguistique poussée, nous avons défini « projection » comme « intensity of the radiated sound in terms of spatial attributes, i.e., transmission from the instrument to the performance space, » alors que l'autre équipe avait défini « propagation » en termes

[38] ZANONI et al. (2014), « The violin ontology »

de « radiation of the sound in the space, including information about volume and directionality ». Comme il n'est pas clair comment cette qualité est évaluée par les musiciens et par les auditeurs, ni comment elle peut être associée à d'autres propriétés perceptives du violon, ni encore quels en sont les corrélats acoustiques, nous avons voulu faire une étude linguistique plus approfondie de ce qu'est la *projection*, grâce à des questionnaires où les participants à un test d'écoute sur la projection relative entre des violons neufs et des vieux violons italiens (partie 4.2) ont répondu à la question : « Quelle est votre définition de projection, c'est-à-dire celle que vous avez utilisée pour évaluer les différents violons ? (En d'autres termes, sur quels critères avez-vous fait votre évaluation de la projection des différents violons ?) ».

Le corpus recueilli consiste en l'ensemble des réponses des 38 personnes (11 luthiers, 15 violonistes et 1 violoncelliste, 11 autres dont 5 acousticiens) qui ont répondu à la question. Les réponses varient de quelques mots à une phrase, voire à un commentaire de l'ordre du paragraphe. On observe une grande diversité de formulations (qui rend déjà compte d'une difficulté à donner une définition concise et standard) ainsi que des marques d'incertitude (*je crois, pourrait être*) par rapport à une définition générale consensuelle. On ne note aucune occurrence du mot *action* dans le corpus, alors que c'est le premier mot des définitions données par plusieurs dictionnaires .

Voici quelques définitions de projection :

- Trésor de la langue française : « Action de jeter en avant, de lancer. »
- Larousse : « Action de projeter une matière; fait d'être projeté. projeter : Lancer quelque chose, quelque'un en avant ou en haut, le pousser avec force vers un lieu. »
- Littré : « Action de jeter, de lancer un corps pesant. »

[39] DUBOIS et al. (2021), « Projection du violon : analyse sémantique. »

La définition de *projection* dans le contexte de l'évaluation de la qualité des violons ne s'inscrit donc pas dans une définition standard commune du mot mais renvoie à une définition spécifique dont il s'agit d'identifier à la fois si elle existe comme forme consensuelle et quels sont les contenus qui la caractérisent dans la communauté des professionnels de la musique.

Je passe ici les détails de l'analyse linguistique (voir [39]) pour donner directement les conclusions. Si l'on observe une grande dispersion dans les mots utilisés, ainsi que peu d'accord sur une terminologie consensuelle, l'analyse sémantique des discours permet de souligner que cette variabilité dans l'expression recouvre de fait un consensus sur les critères et propriétés sémantiques du concept de projection que l'on peut résumer comme suit :

Projection : Capacité de (permettre à un musicien de) produire (facilement) un son qui possède les propriétés physiques nécessaires pour engendrer sur l'auditeur, en solo ou avec orchestre, sur tous les registres et dans toutes les salles, les effets perceptifs suivants : puissance, clarté, netteté, richesse harmonique, remplissage de l'espace.

L'analyse sémantique du concept de projection partagé par les musiciens et luthiers nous conduit ainsi à formuler des nouvelles hypothèses et rechercher de nouvelles pistes d'investigation pour expliquer la projection en termes physiques et perceptifs. Ainsi, alors que la puissance peut certainement être appréhendée de manière assez simple par le niveau de pression acoustique en décibels et la richesse par le rapport d'amplitude entre les premiers harmoniques et les harmoniques supérieurs, quid de la clarté? Quid du fait de « passer au-dessus de l'orchestre »? L'analyse de ces concepts reste à approfondir pour identifier quelles propriétés acoustiques peuvent en rendre compte. Par ailleurs, les liens perceptifs

qui se dégagent de cette analyse méritent également d'être confirmés à l'aide de tests de jeu et d'écoute pour avancer dans notre compréhension des raisons physiques qui font qu'un instrument projette plus qu'un autre. Ces tests ont déjà été réalisés pour la plupart, mais tous n'ont pas encore été entièrement analysés. Ceux explorant le lien entre projection et niveau sonore perçu seront discutés à la partie 2.3.2.

Après ce volet conceptuel, voyons maintenant ce que la réalisation de tests de jeu et d'écoute nous ont appris sur la perception des instrumentistes et des auditeurs respectivement.

## 2.2 Perception des instrumentistes

### 2.2.1 Préférences et cohérence des jugements

Nous nous sommes intéressés tout d'abord à la stabilité des jugements des violonistes (cohérence intra-individuelle) ainsi qu'à l'accord entre les violonistes (cohérence inter-individuelle), grâce à la mise en place de deux expériences [40], dans le cadre de la thèse de Charalampos Saitis [35].

Dans la première expérience, 20 violonistes ont dû, en aveugle, classer par ordre de préférence 8 violons, cinq fois au cours de deux sessions, séparées de 3 à 7 jours. Ils étaient libres de jouer ce qui leur semblait nécessaire pour réaliser l'évaluation. Alors que la stabilité des classements individuels est élevée, l'accord entre les participants est nul ainsi qu'en témoignent les valeurs moyennes des coefficients de concordance présentés à la figure 2.4 (1 correspond à une cohérence parfaite, 0 à pas de cohérence et -1 à une anti-cohérence parfaite, à savoir des classements opposés).

L'objectif de la deuxième expérience fut d'explorer l'origine des fortes différences inter-individuelles observées en termes de préférence et de quantifier les poids respectifs de divers critères dans le jugement de préférence. Nous étions aussi curieux de savoir dans quelle mesure la cohérence et l'accord des participants seraient affectés en imposant aux participants de se concentrer sur certains critères. Ainsi, nous avons demandé à 13 violonistes d'évaluer successivement 10 violons (présentés aléatoirement) sur 5 échelles différentes : *facilité de jeu*, *réponse*, *richesse sonore*, *équilibre entre cordes*, *palette dynamique*, et préférence. La tâche fut répétée deux fois de sorte que chaque violon a été évalués trois fois pour chaque critère par chaque participant.

Les résultats de la figure 2.5 à gauche montrent que les musiciens ne sont pas plus d'accord entre eux sur des critères qui pourraient sembler plus objectifs que la préférence, et qu'ils sont moins cohérents que dans la première expérience tant pour les critères que pour la préférence (en particulier pour l'*équilibre entre les cordes* et la *facilité de jeu*) sauf peut-être pour la *richesse*. Ceci peut s'expliquer par la différence de méthodologie et semblerait indiquer que des jugements plus robustes sont obtenus lorsque les instruments sont comparés entre eux plutôt qu'évalués un par un. Par ailleurs, la figure 2.5 à droite montre que les violons préférés sont considérés comme riches, et dans une moindre mesure avec une bonne palette dynamique. Ces résultats montrent ainsi que, alors que

[40] SAITIS et al. (2012), « Perceptual evaluation of violins : A quantitative analysis of preference judgments by experienced players »

[35] SAITIS (2014), « Evaluating violin quality : player reliability and verbalization »

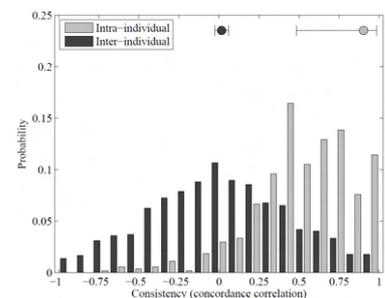
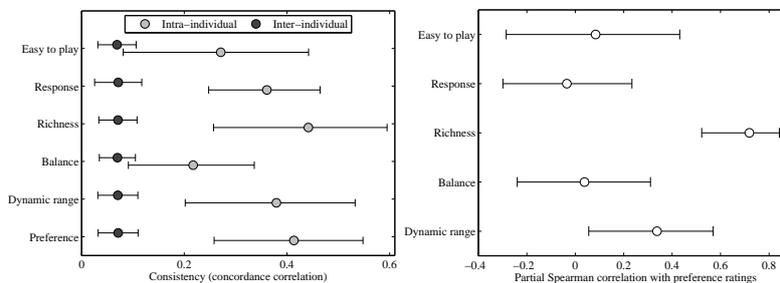


FIGURE 2.4 – Distribution des coefficients de concordance intra- et inter-individuelle, calculés entre les classements de préférence des violons réalisés par le même participant ou par des participants différents. Les symboles au-dessus des histogrammes représentent la moyenne sur les participants avec les intervalles de confiance à 95% [40].

**FIGURE 2.5** – A gauche : moyenne sur les participants des coefficients de concordance intra- et inter-individuelle pour chacune des descripteurs (les barres d'erreur correspondent aux intervalles de confiance à 95%). A droite : Moyenne sur les participants de la corrélation partielle de Spearman entre les évaluations de préférence et les évaluations des violons sur les autres descripteurs. Seules la richesse et la palette dynamique sont associées de manière significative avec la préférence [40].



[41] SAITIS et al. (2015), « Effect of task constraints on the perceptual evaluation of violins »

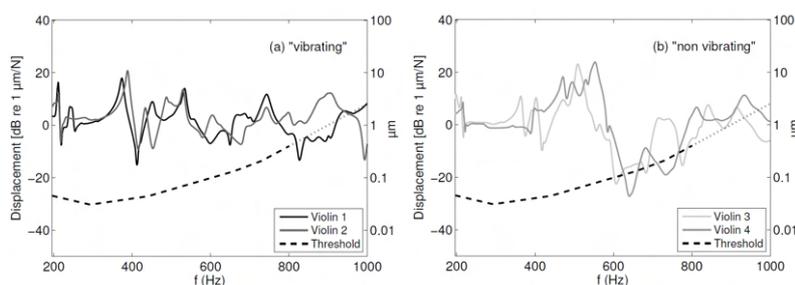
Pour compléter cette investigation systématique de la cohérence des jugements de préférence, une troisième expérience a été mise au point [41], permettant d'explorer l'influence de la tâche (contrainte ou non) d'évaluation sur la cohérence des jugements. 16 violonistes ont ainsi comparé cinq violons sur trois critères – préférence, *richesse* et *palette dynamique* dans deux conditions. Dans la première condition, dite contrainte, les musiciens étaient contraints de ne jouer que les huit premières notes de la gamme chromatique sur la corde sol pour le critère richesse, et les deux notes sib 3 et sib 4 pianissimo puis fortissimo pour le critère palette dynamique. Dans la deuxième condition, dite non contrainte, les musiciens n'étaient pas complètement libres comme dans l'expérience précédente mais devaient jouer le début du premier solo du Concerto n°1 de Max Bruch en sol m (op.26). Alors que la cohérence s'est avérée élevée dans les deux conditions, elle l'était davantage lorsque la tâche était plus contrainte. Ceci pourrait s'expliquer par le fait qu'une tâche plus contrainte est plus facile (car moins de paramètres variables) et donc permet une meilleure répétabilité. De plus, cette expérience a abouti à un accord plus élevé entre les participants que les expériences précédentes. Ceci pourrait conforter l'hypothèse que les musiciens utilisent diverses approches pour évaluer un critère, et que par conséquent, le fait d'imposer l'approche permet d'obtenir un plus large consensus. Cependant, le seul fait que le nombre d'instruments était plus faible par rapport aux expériences précédentes pourrait également expliquer cet accord plus grand. Par ailleurs, de manière non surprenante, les deux conditions ont conduit à des différences notables d'évaluation pour les trois critères. Ainsi, une exploration contrainte permet une meilleure reproductibilité et un meilleur accord mais peut conduire à des évaluations différentes par rapport à une évaluation libre ainsi qu'à réduire les différences perceptibles, ce qui n'est pas souhaitable. Par la suite, j'ai donc préféré continuer à faire des évaluations libres qui me semblent plus pertinentes et bien plus proches des évaluations que peuvent faire les musiciens dans la « vraie » vie.

### 2.2.2 Influence de la modalité tactile

L'une des raisons principales de faire des tests en situation de jeu est de pouvoir permettre une évaluation multimodale et non pas uniquement auditive. En effet, le son d'un instrument n'est qu'une partie de ce qui importe à un musicien. Celui-ci est également sensible à l'ergonomie,

aux sensations vibratoires dans la main gauche, au niveau du torse et au niveau de l'archet, et à une comparaison « entrée-sortie » entre l'énergie fournie aux cordes via l'archet et l'énergie sonore rayonnée. Dans la thèse d'Indiana Wollman [42], que j'ai co-dirigée avec Joël Frelat (*l'Alambert*), nous nous sommes intéressés en particulier au retour vibratoire dans la main gauche, qui participe certainement, d'une manière à déterminer, au ressenti de l'instrument, ressenti vibratoire mais aussi auditif puisqu'il a déjà été montré que la perception auditive d'un stimulus sonore peut être modifiée par l'ajout d'une stimulation vibratoire [43-45]. Quelques auteurs [46, 47] ont effet mentionné que les vibrations du manche devaient influencer sur le « *feel* » mais sans l'étudier perceptivement. Par ailleurs, Askenfelt et coll. [48] ont comparé les niveaux de vibration horizontale dans le manche de quatre violons au seuil de sensibilité mesuré par Verillo [49] au bout du doigt en situation d'affleurement afin de voir si cette vibration pouvait avoir une influence sur le jeu du musicien. Cependant, la mesure de Verillo ne correspond pas au jeu du violon : la prise du manche se fait en effet à la base de l'index et du pouce (et non pas au bout des doigts), avec un peu de pression.

Or la zone anatomique utilisée, la pression ainsi que la surface de contact mise en jeu sont autant de paramètres qui peuvent influencer sur le seuil de sensibilité. D'autre part, les niveaux de vibration mesurés par Askenfelt ont seulement été obtenus pour les quatre fréquences correspondant aux harmoniques du sol grave (196 Hz) dans la région de la sensibilité de la peau, à savoir en-dessous de 900 Hz. Nous avons donc refait des mesures de vibration du manche de divers violons à toutes les fréquences inférieures à 900 Hz et mis en place un dispositif pour mesurer le seuil de sensibilité à la vibration qui corresponde à une situation de jeu du violon [50] : ainsi, la main gauche des participants (14 violonistes expérimentés) était posée sur un manche isolé qui vibrait grâce à des vibreurs piézo-électriques (figure 2.6). La mesure du seuil a été faite classiquement par une méthode adaptative et est représentée par la courbe en pointillés à la figure 2.7, dans laquelle y sont également superposés les niveaux de vibration dans le manche. Nous pouvons observer que la vibration du manche est détectable pour tous les violons à quasiment toutes les fréquences dans le domaine de sensibilité de la peau. En revanche, des différences importantes sont observées entre les violons, et ceci semble être corrélé à une évaluation perceptuelle réalisée par un violoniste professionnel sur quatre violons : il a considéré comme « inertes » des violons dont la réponse vibratoire au niveau du manche présentait un creux vers 600 Hz en comparaison de violons dits « vibrants », qui lui faisaient « un bon massage de la main » ou le faisaient « vibrer jusqu'au ventre ». Cette tendance nécessiterait d'être confirmée avec plus de violons et plus de violonistes.



- [42] WOLLMAN (2014), « Perception bimodale des violonistes en situation de jeu : influence des retours auditif et vibrotactile sur l'évaluation du violon »
- [43] CAULIN et al. (2002), « Tactile "capture" of audition »
- [44] BRESCHIANI et al. (2007), « Signal reliability modulates auditory-tactile integration for event counting »
- [45] OKAZAKI et al. (2012), « Vibrotactile stimulation can affect auditory loudness : a pilot study »
- [46] MARSHALL (1985), « Modal analysis of a violin »
- [47] WOODHOUSE (1998), « The acoustics of "A0-B0 mode matching" in the violin »
- [48] ASKENFELT et al. (1992), « Vibration Sensation in Stringed Instrument playing »
- [49] VERILLO (1971), « Vibrotactile threshold measured at finger »



FIGURE 2.6 – Dispositif expérimental pour la mesure du seuil de détection vibrotactile en situation de jeu : le manche isolé est excité par le dessus par un vibreur piézo-électrique [50].

- [50] WOLLMAN et al. (2015), « On the characterisation of vibrotactile feedback in violinists' left hand : a case study »

FIGURE 2.7 – Niveaux de vibration dans le manche de quatre violons, deux considérés comme « vibrants » (a) et deux comme « non vibrants » (b). Le seuil de détection vibrotactile est reporté en pointillés [50].



FIGURE 2.8 – Dispositif de bagues piézo-électriques permettant le masquage vibratoire dans la main gauche du violoniste.

[51] WOLLMAN et al. (2014), « Investigating the role of auditory and tactile modalities in violin quality evaluation »

[52] WOLLMAN et al. (2014), « Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violin »



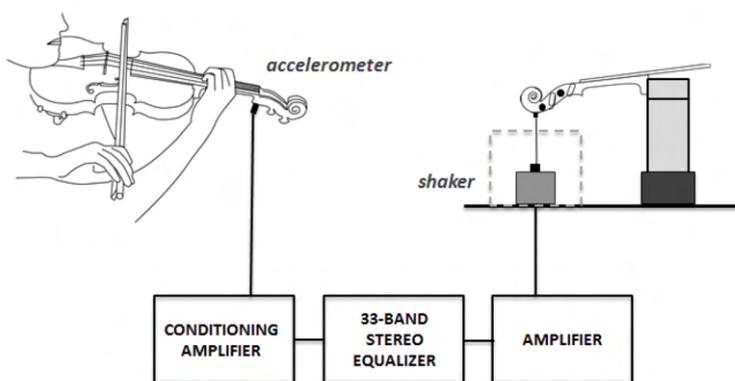
FIGURE 2.9 – Photographies de l'expérience : en haut, le violoniste joueur; en bas, le participant en écoute augmentée.

FIGURE 2.10 – Schéma du dispositif expérimental

Par ailleurs, ceci ne donne aucune indication sur la qualité des violons et une autre expérience a été réalisée pour tester si les vibrations perçues dans la main gauche pouvaient fournir des informations sur la qualité du violon. Cette expérience a été menée en collaboration avec Steve McAdams, à McGill (Montréal). Dans cette expérience, les vingt violonistes participants ont évalué cinq violons dans trois conditions de jeu : i) normale; ii) avec un masquage auditif grâce à un casque anti-bruit et des écouteurs intra-auriculaires qui jouaient du bruit blanc et iii) avec un masquage vibro-tactile au niveau de la main gauche grâce à trois bagues vibrantes (figure 2.8).

Pour chaque condition de jeu, l'évaluation des cinq violons était divisée en deux parties : i) évaluer l'intensité et l'importance de huit critères perceptifs relatifs au jeu du violon; ii) classer les cinq violons par ordre de préférence en terme de qualité globale. Les résultats confirment les observations précédentes, à savoir que les préférences sont fortement individuelles (pas de consensus entre les musiciens). Par ailleurs, les analyses révèlent que le classement des violons dépend assez peu de la condition de jeu! En particulier, le rang du violon préféré et du moins aimé pour chaque participant change peu en fonction de la condition de jeu. Même si les évaluations lorsque la modalité tactile est masquée sont plus similaires aux évaluations en situation normale de jeu que ne le sont les évaluations lorsque l'audition est masquée, le fait que les tendances générales soient conservées avec l'audition masquée laisse supposer qu'il existe des indices de qualité purement tactiles [51].

Cette expérience ne découple pas les modalités tactile et auditive mais supprime l'une ou l'autre. Elle a donc été complétée par une expérience permettant un vrai découplage [52]. Grâce au dispositif représenté dans les figures 2.9 (photographies) et 2.10, l'évaluation de trois violons a pu se faire dans trois situations : i) jeu normal, ii) écoute des violons joués par une autre personne (dénommée violoniste joueur) et iii) une écoute dite augmentée grâce à un retour tactile en temps réel dans un manche isolé des vibrations du manche du violon qui était joué (vibrations captées par un accéléromètre).



En faisant varier le niveau de ces vibrations, nous avons pu montrer qu'un niveau de vibration plus élevé rendait le violon perceptivement plus fort. Ceci a permis d'élargir les résultats de nombreuses études montrant cet effet en condition de laboratoire pour d'autres applications (comme la brosse à dent par exemple) au cas des instruments de musique, dans un contexte un peu plus naturel. Par ailleurs, nous avons également observé

qu'un niveau de vibration plus élevé rendait le violon plus riche. Alors que *riche* semblait être un critère purement auditif puisqu'il fait référence au son, ce résultat laisse en fait suggérer une intégration bimodale entre audition et retour vibrotactile lors de l'évaluation de ce critère. Ceci pourrait expliquer pourquoi ce critère avait quand même pu être évalué par la moitié des violonistes en condition « sourd » dans la deuxième expérience. Enfin, un niveau de vibration plus élevé a également conduit à un niveau plus élevé de plaisir. Par contre, aucun effet n'a été observé sur le dernier critère, à savoir *vivant*, ce qui suggérerait que l'évaluation de ce critère repose davantage sur ce qui se passe dans la main droite (contrôle de l'archet). Ceci montre aussi que le retour vibrotactile dans la main gauche ne joue pas un rôle systématique dans l'évaluation de critères de qualité.

### 2.2.3 Influence de la modalité visuelle

La perception d'un instrument de musique est multimodale : auditive, tactile, visuelle et même olfactive ! Alors que la perception auditive prime lors d'un concert, la perception visuelle l'emporte dans un musée. Son, forme et couleur entretiennent des relations complexes. Si la dimension matérielle d'un instrument peut être appréhendée même dans un état de conservation incomplet, sa sonorité, en revanche, nécessite un instrument complet et de surcroît joué par un musicien pour être entendue. Cependant, cette sonorité peut être présente dans l'imagination des spectateurs, qui feront appel à leur mémoire pour « entendre » le son de l'instrument qu'ils voient. Comment le son imaginé par le spectateur est-il lié à l'aspect visuel et l'esthétique de l'instrument qu'il regarde ? Est-ce qu'un violon de couleur sombre a un son sombre ? La question ainsi posée peut paraître simpliste. Cependant, les réponses collectées lors d'un questionnaire posé à 29 observateurs (10 luthiers et 19 musiciens) à propos de deux violons [53], l'un avec un vernis brun l'autre un vernis jaune doré (figure 2.11) est surprenant. Les deux violons étaient présentés dans les mêmes conditions aux participants, qui pouvaient les voir de toutes les perspectives, mais n'avaient pas le droit de les toucher. Après avoir dû décrire les deux violons, les participants devaient décrire le son de ces violons, tels qu'ils l'imaginaient. Même si 23 participants ont naturellement décrit spontanément les violons en termes de forme, couleur, ..., sans aucune considération sur leur son, ils ont tous, sauf deux musiciens à cordes frottées, pu répondre à la deuxième question. Une différence notable a pu être observée dans leurs réponses entre les luthiers et les musiciens. Pour les premiers, leur imagination du son est basée sur des paramètres « objectifs » de facture et de bois. Ainsi huit sur dix luthiers ont mentionné divers paramètres tels que les voûtes, les mailles et les pores du bois, la géométrie sous le chevalet, la qualité du travail, ... Pour les musiciens, leur imagination du son était principalement (15 sur 17) induite par la couleur du vernis (deux musiciens ont mentionné le chevalet et un la facture). Ce qui est plus intéressant est le relatif consensus obtenu sur la sonorité, et la parenté entre les différences de sonorité imaginée entre les deux violons et leurs différences de couleur. Le violon brun a été imaginé plus riche, chaud, rond, flexible et puissant que le violon jaune, qui lui a été imaginé moins complexe, plus dur, nasal, rigide et serré, et moins puissant.



FIGURE 2.11 – Les deux violons utilisés pour étudier l'influence de la couleur du vernis sur le son imaginé juste en les regardant.

[53] VAIEDELICH et al. (2017), « Perception of old and historical musical instruments »

3: « Le rouge vient en dernier dans l'oeuvre alchimique » écrit l'alchimiste Norton de Bristol au XV<sup>e</sup> siècle. [54]

[54] BALL (2005), *Histoire vivante des couleurs, 5000 ans de peinture racontée par les couleurs*

[55] ECHARD et al. (2009), « The nature of the extraordinary finish of Stradivari's instruments »

[56] ECHARD et al. (2010), « Complementary Spectroscopic Analyses of Varnishes of Historical Musical Instruments »

4: <http://collectionsdumusee.philharmoniedeparis.fr/>

5: Il n'y a pas de manière standardisée de décrire la couleur dans les notices de sorte que la description de la couleur du vernis peut dépendre fortement de la perception de la personne qui écrit la notice : « jaune doré », « brun orangé », « rouge brun », ... De surcroît, il y a des processus chimiques qui peuvent altérer avec le temps la couleur d'origine. Ainsi, les résines jaunes ont une tendance naturelle à devenir brunes par oxydation. Il n'est donc pas facile de connaître la couleur originelle des violons sur la base de leurs notices. Cependant, les pigments rouges sont facilement identifiables et le mot « rouge » apparaît d'une manière ou d'une autre dans la notice lorsqu'ils sont présents. Nous avons ainsi décidé de diviser les couleurs de vernis en deux groupes : « rouge » et « non rouge ».

**Tableau 2.3** – Pourcentage, pour chaque siècle, de violons de la collection du Musée de la musique dont la couleur n'a pas été décrite dans les notices, en considérant la base de données complète d'une part et en enlevant les violons considérés comme expérimentaux d'autre part.

siècle	base de données complète	base de données sans les violons expérimentaux
XVII <sup>e</sup>	8	8
XVIII <sup>e</sup>	7	7
XIX <sup>e</sup>	24	19
XX <sup>e</sup>	21	10

Au-delà de cette évaluation perceptive, l'histoire symbolique des couleurs apporte à ces résultats une dimension historique et sociale. La couleur rouge dans la société occidentale revêt une importance particulière<sup>3</sup>. Les résultats analytiques obtenus il y a une dizaine d'années [55, 56] sur un échantillon de plus d'une centaine d'instruments de la famille du violon, principalement des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles montrent la présence de pigments rouges (vermillon, cochenille, garance), particulièrement dans les instruments italiens mais plus généralement dans les instruments fabriqués par des luthiers dont la réputation était déjà renommée durant leur vivant. Ceci est confirmé par l'analyse des 242 notices descriptives de la base de données liée à la collection du Musée de la musique<sup>4</sup>, qui montre que 62% des violons du XVIII<sup>e</sup> siècle d'origine italienne ont un vernis décrit comme « rouge »<sup>5</sup> alors que ce n'est le cas que pour 25% des violons de la même période mais d'origine française. Il y a cependant un changement important au cours du XIX<sup>e</sup> siècle en France car le vernis rouge apparaît dans respectivement 78% et 91% des notices d'instruments d'origine française du XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles.

Le tableau 2.3 montre que la couleur du vernis est bien moins décrite pour les violons des XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles (plus de 20% des notices ne contiennent pas d'information de couleur) que pour les violons XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles (moins de 10%). Cependant, il y a un relativement grand nombre de violons dits expérimentaux aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles pour lesquels la couleur n'est jamais décrite. Le statut de violon expérimental (tel que l'a le violon trapézoïdal de Savart par exemple) semble être la seule propriété qui ait de la valeur pour le conservateur qui n'a ainsi pas jugé intéressant de décrire la couleur. Si nous enlevons les violons expérimentaux de la base de données, le nombre de notices sans information de couleur n'est que deux fois plus grand pour le XIX<sup>e</sup> que pour les autres siècles.

La prédominance du vernis rouge aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles ainsi que le fait que les violons du XIX<sup>e</sup> ont été moins décrits peut s'expliquer par le fait que la notion de violon ancien a été construite progressivement tout au long des deux siècles et est devenue un archétype. Le développement de techniques de conservation, l'apparition de larges collections nationales, la présentation de copies d'anciens instruments dans les expositions universelles jouent un rôle dans la conquête de l'opinion et conduit à une production principalement basée sur la copie des anciens instruments des maîtres-artisans (principalement crémonais). En conséquence, un vernis ancien est beaucoup mieux considéré qu'un vernis récent, et seuls les vernis des XVII<sup>e</sup> et XVIII<sup>e</sup> siècles peuvent avoir ce statut de « vernis ancien ». De ce fait, leur description – et en particulier celle de leur couleur – apparaît, aux yeux du conservateur, beaucoup plus importante que pour des vernis plus récents. Ceci montre que le regard muséal n'est pas neutre mais aussi que le vernis est constitutif de l'oeuvre dans le cas du violon, à la différence des peintures, dont le vernis est souvent enlevé pour être remplacé. De plus, l'école de lutherie de référence est

l'école italienne (crémonaise et vénitienne) dans lesquels les maîtres célèbres et influents – Stradivarius, Amati, Guarnerius, Gofriller – ont largement utilisé un vernis rouge dans leur production. Toutes ces raisons expliquent ainsi l'enthousiasme pour les vernis rouges aux XIX<sup>e</sup> et XX<sup>e</sup> siècles, qui est bien illustré par cette citation du luthier et musicien Auguste Tolbecque : « C'est ainsi qu'un Stradivarius un peu plus rouge qu'un autre vaut de suite dix mille francs de plus » [57].

Après cette partie sur l'étude de la perception des instrumentistes via une série de tests de jeu, intéressons nous à la perception des auditeurs, via des test d'écoute.

## 2.3 Perception des auditeurs

### 2.3.1 Cohérence des jugements

Une troisième expérience a été réalisée au cours de la thèse de Charalampos Saitis [41] pour étudier si les violonistes en tant qu'auditeurs sont davantage d'accord entre eux. L'hypothèse était que réduire la complexité de l'évaluation à un jugement purement auditif (sans autre modalité) et passif (au sens que l'évaluateur n'est ici pas celui qui produit le son à évaluer) pourrait augmenter l'accord inter-individuel. Il n'en est rien : si on compare la figure 2.12 à la figure 2.4, on peut voir que dans les deux cas, l'accord inter-individuel est quasi nul. Par contre, l'accord intra-individuel est meilleur.

### 2.3.2 Sonie et projection

Les luthiers fabriquent des instruments pour des instrumentistes ; c'est donc principalement leur avis qui compte, et en conséquence mes études s'intéressent essentiellement aux qualités des instruments telles qu'évaluées par des instrumentistes. Parmi ces qualités, nous avons vu à la partie 2.1 que la *projection* est particulièrement cruciale pour un soliste, et la définition que nous avons pu établir, et que je rappelle ici, met bien en évidence la nécessité d'avoir des auditeurs pour évaluer cette qualité : « capacité de (permettre à un musicien de) produire un son qui possède les propriétés physiques nécessaires pour engendrer sur l'auditeur, en solo ou avec orchestre, sur tous les registres et dans toutes les salles, les effets perceptifs suivants : puissance, clarté, netteté, richesse harmonique, remplissage de l'espace » [39]. Le premier effet est lié à la puissance et nous avons ainsi conduit une série de tests pour caractériser le lien entre projection et sonie. En effet, les violonistes différencient souvent les deux, considérant qu'un violon peut sonner fort de près mais ne pas projeter dans la salle, tandis que d'autres (particulièrement les vieux violons italiens<sup>6</sup>) peuvent ne pas être forts tout en projetant beaucoup, comme l'illustre bien le commentaire d'un participant à un test de jeu : « Projection can be limited even when it feels like there is ample sound, and likewise, an instrument may have a tone that carries, though it seems meagre under the ears » [41].

[57] TOLBECQUE (1903), *L'art du luthier*

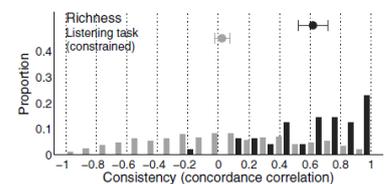


FIGURE 2.12 – Distribution coefficients de concordance intra et inter-individuelles. Les symboles au-dessus des histogrammes représentent la moyenne sur les participants avec les intervalles de confiance à 95% [41].

[41] SAITIS et al. (2015), « Effect of task constraints on the perceptual evaluation of violins »

[39] DUBOIS et al. (2021), « Projection du violon : analyse sémantique. »

6: Le violoncelliste anglais Steven Isserlis écrit ainsi « A famous (and curious) feature of Stradivarius instruments is that their tone seems to increase with distance » [58] tandis que le violoniste américain Franck Almond considère que « a peculiar (and sublime) aspect of great old Italian instruments is that the sound somehow expands and gains more complexity from a distance, especially in a concert hall » [59]. [58] ISSERLIS (01/03/2012), « Stradivarius versus modern violins : why this latest study strikes a discordant note »

[59] ALMOND (01/09/2012), *They blinded me with science*

[41] SAITIS et al. (2015), « Effect of task constraints on the perceptual evaluation of violins »

Pour pouvoir comparer les évaluations proches du violoniste et au fond de la salle, un test d'écoute *live* a été réalisé dans la salle de concert du conservatoire de musique à Oberlin (Ohio, Etats-Unis) durant lequel l'auditoire était divisé en deux groupes : un groupe de 16 auditeurs était sur scène, juste derrière le rideau acoustiquement transparent les séparant de l'instrumentiste ; un groupe de 39 auditeurs était dans la salle, après le 10e rang (figure 2.13).



FIGURE 2.13 – Dispositif expérimental pour comparer les jugements d'auditeurs, proches et loin de l'instrumentiste.

Des paires de violons étaient jouées successivement par divers musiciens et les auditeurs devaient évaluer les différences relatives entre les violons de chaque paire, en termes de niveau sonore (« *loudness* ») pour ceux sur scène et en termes de projection pour ceux dans la salle. La corrélation entre les deux types d'évaluations est excellente (0.90). Nos résultats suggèrent que « projection is neither curious, peculiar, nor sublime, but is simply another word for loudness » [60].

[60] FRITZ et al. (En révision), « How violinists and their audiences evaluate violins »

## 2.4 Conclusion

La mise en place de nombreux tests de jeu et d'écoute en aveugle, accompagnés de questionnaires, a permis de progresser dans notre compréhension de l'évaluation des qualités d'un violon par les instrumentistes et les auditeurs. Je résume ici les principaux résultats, issus aussi bien des travaux présentés dans ce chapitre que des travaux non présentés par souci de concision.

1. Les musiciens sont relativement bien cohérents avec eux-mêmes sur une échelle de temps assez courte
2. Les violonistes ne sont pas du tout d'accord entre eux, et ce quel que soit le prix de l'instrument (supérieur à quelques centaines d'euros) quand le test est fait en aveugle, ni en termes de préférence, ni sur des critères plus spécifiques (richesse, réponse, jouabilité, dynamique et équilibre)
3. Les violonistes sont d'accord sur les qualités que doit posséder le violon qu'ils préfèrent : un violon équilibré, avec un son riche et une grande palette dynamique, qui projette, est confortable à jouer et répond bien. Par contre, ils ne sont pas d'accord sur quel violon possède ces qualités.

4. Les évaluations des auditeurs et des violonistes peuvent différer notablement. Lors du choix d'un violon, les violonistes sont évidemment les mieux placés pour juger des qualités liées au confort de jeu et la jouabilité, mais la présence d'auditeurs peut s'avérer nécessaire pour les aider à évaluer les qualités liées au niveau sonore.
5. La projection ne serait finalement qu'une question de niveau sonore.

Nous allons maintenant nous intéresser à la perception des instrumentistes et des auditeurs dans des cas concrets où les instruments présentent des variations de facture ou de réglage qui ont été contrôlés afin d'étudier l'influence de ces paramètres physiques sur les qualités perçues.



# Explorer et comprendre les qualités perçues par les instrumentistes

# 3

Les études présentées au chapitre précédent n'avaient pas pour seul but de mieux comprendre les critères d'évaluations des musiciens mais visaient aussi à rechercher des liens entre les qualités perçues et des paramètres acoustiques issus des mesures classiques de mobilité au chevalet et de rayonnement. Cette recherche s'est avérée relativement vaine [61] et peut s'expliquer en partie par le fait que trop de paramètres variaient entre les différents violons utilisés dans les tests. Nous nous sommes alors appliqués à réaliser des expériences contrôlant davantage les paramètres de construction des instruments testés. Ce chapitre présente ainsi quelques études de l'influence, sur les qualités des instruments, de paramètres de lutherie : pour le violon, la période de fabrication (partie 3.1), le modèle utilisé (partie 3.2), l'épaisseur des tables (partie 3.3), la qualité de fabrication (entre des instruments d'étude et des instruments de concert, partie 3.4), la nature des cordes (partie 3.5), la longueur de l'âme (partie 3.6) ; pour la guitare, l'essence de bois du fond (partie 3.7). Ne voulant pas voir ce chapitre se transformer en catalogue, j'ai sélectionné ces quelques études parmi toutes celles que j'ai réalisées aussi bien parce qu'elles permettent d'illustrer une grande variété de méthodologies que pour la portée et l'enjeu de certains résultats.

## 3.1 Stradivarius : la part du mythe

### 3.1.1 Introduction et contexte

Les vieux violons italiens du XVIII<sup>e</sup> siècle sont si réputés que Stradivarius est entré dans le langage courant. Les musiciens sont intarissables à leur égard et considèrent que la supériorité d'un grand nombre d'entre eux reste inégalée. Ces instruments posséderaient des qualités de jeu qui seraient immédiatement reconnaissables et ne pourraient être trouvées dans les instruments neufs. Pourtant, de nombreux tests d'écoute en aveugle menés depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle ont montré une préférence pour les instruments neufs [62]. Ces tests n'ont cependant souvent pas été pris au sérieux car trop informels, pas assez rigoureux, et réalisés en situation d'écoute. Or qui peut mieux juger que les instrumentistes eux-mêmes ? En parallèle, divers chercheurs en acoustique et mécanique ont cherché des explications à cette supériorité présumée, en explorant par exemple les propriétés des bois et des vernis utilisés [63-67], les systèmes d'accord des tables d'harmonie et des fonds [68] et le contenu harmonique du son rayonné [13].

Cependant, le postulat de base de cette supériorité acoustique - du point de vue des musiciens - n'avait jamais été étudiée scientifiquement jusqu'à la première étude que nous avons réalisée à Indianapolis en 2010 et publiée dans PNAS en 2012 [69]. Les résultats montrèrent que, en aveugle, les violons neufs étaient globalement préférés et que les

3.1 Stradivarius : la part du mythe . . . . .	25
3.1.1 Introduction et contexte . . . . .	25
3.1.2 Méthodologie . . . . .	26
3.1.3 Résultats . . . . .	27
3.1.4 Discussion . . . . .	27
3.2 Influence du modèle de violon : Stradivarius versus Guarnerius . . . . .	28
3.3 Projet Bilbao : influence de l'épaisseur des tables . . . . .	30
3.3.1 Contexte . . . . .	30
3.3.2 Fabrication des violons . . . . .	30
3.3.3 Mesures vibro-acoustiques . . . . .	32
3.3.4 Tests perceptifs . . . . .	35
3.4 Comparaison de violons d'étude et de violons de concert . . . . .	37
3.5 Influence des cordes . . . . .	38
3.6 Influence de la longueur de l'âme . . . . .	38
3.7 Influence du bois du fond d'une guitare . . . . .	39
3.8 Conclusion . . . . .	41

[61] SAIMS et al. (2012), « Bridge admittance measurements of 10 preference-rated violins »

[62] COGGINS (2007), « Blind faith »

[63] SCHELLENG (1968), « Acoustical effects of violin varnish. »

[64] BURCKLE et al. (2003), « Stradivari, violins, tree rings, and the Maunder Minimum : a hypothesis. »

[65] STOEL et al. (2008), « A comparison of wood density between classical Cremonese and modern violins »

[66] BARLOW et al. (1988), « Wood treatment used in Cremonese instruments »

[67] NAGYVARY et al. (2006), « Wood used by Stradivari and Guarneri »

[68] HUTCHINS et al. (1960), « Subharmonics and Plate Tap Tones in Violin Acoustics »

[13] BISSINGER (2008), « Structural acoustics of good and bad violins »

[69] FRITZ et al. (2012), « Player preferences among new and old violins »

[70] FRITZ (2012), *Preferences among old and new violins, aka the Indianapolis experiment*

[71] FRITZ et al. (2014), « Soloist evaluations of six Old Italian and six new violins »

[72] FRITZ et al. (2017), « Listener evaluations of new and Old Italian violins »

violonistes ne semblaient pas capables de distinguer les violons neufs des vieux. Cette étude a fait beaucoup de bruit dans les médias de par le monde (une revue de presse est disponible dans [70]) et a évidemment été beaucoup critiquée, principalement parce que les résultats ne plaisaient pas, mais aussi parce qu'elle était relativement limitée en terme de nombre d'instruments testés (six), de temps alloué à chaque instrumentiste (une heure) et de la taille de la salle d'essai (une chambre d'hôtel).

Parmi les détracteurs, Hugues Borsarello, violoniste soliste français, a pris la peine de m'appeler pour en discuter et m'inciter à poursuivre le travail, avec sa collaboration. J'ai donc conduit une deuxième étude en région parisienne en septembre 2012 – avec l'aide d'une équipe pluridisciplinaire agrandie (comprenant les auteurs de la première étude à savoir le luthier américain Joseph Curtin, l'ingénieur chez le fabricant de cordes D'Addario Fan-Chia Tao et le statisticien Jacques Poitevineau, auxquels se sont ajoutés Hugues Borsarello, le marchand d'instruments Thierry Ghasarossian et ma doctorante à cette époque Indiana Wollman) – et une troisième étude à New York en mars 2013. Les résultats ont été publiés dans PNAS en 2014 [71] et 2017 [72].

Seule la partie qui s'intéresse au point de vue des instrumentistes, à savoir la première partie de l'étude parisienne [71], est présentée dans ce chapitre. Le reste [72] concerne le point de vue des auditeurs et sera présenté au chapitre suivant.

### 3.1.2 Méthodologie

Dix solistes de renommée internationale ont été invités à tester en aveugle six vieux violons italiens (dont cinq Stradivarius) et six violons neufs durant deux sessions de 75 minutes, la première dans une petite salle de répétition, la deuxième dans une salle de concert de 300 places, réputée pour son acoustique (l'Auditorium Coeur de Ville, à Vincennes).

La principale difficulté a été de réaliser un protocole qui, malgré la condition en aveugle (obtenue par un éclairage très réduit et des lunettes de soudeur), soit le plus écologiquement valide possible. A cet effet, nous nous sommes intéressés à la question de savoir quel instrument les solistes choisiraient pour remplacer le leur pour une tournée hypothétique la semaine suivante. Après les avoir sondés avant l'expérience sur la façon dont ils procéderaient (et en combien de temps), nous leur avons offert la possibilité de tester les instruments d'abord dans une salle de répétition (session 1) puis dans une salle de concert (session 2, figure 3.1). Dans cette dernière, ils pouvaient venir accompagnés d'un ami (dans la salle, séparé de la scène par un rideau acoustiquement transparent) pour avoir son avis, être accompagné par un pianiste mis à leur disposition et écouter Hugues Borsarello jouer pour eux tandis qu'ils passaient de l'autre côté du rideau.



FIGURE 3.1 – Test de jeu sur six violons neufs et six vieux violons italiens dans l'Auditorium de Vincennes.

Deux autres tâches ont été demandées aux solistes. D'une part, ils ont dû évaluer (toujours en aveugle) leur propre violon, leur violon favori (en première place du classement) ainsi que le violon le mieux classé de l'autre catégorie ancien/neuf (généralement en deuxième ou troisième place) en termes de jouabilité, articulation, projection (estimée), niveau sonore sous l'oreille, timbre et qualité globale. D'autre part, les solistes

ont dû deviner si un certain nombre de violons du test (entre six et huit) étaient neufs ou anciens.

### 3.1.3 Résultats

Six parmi les dix solistes ont choisi un violon neuf. Par ailleurs, un seul violon neuf fut aisément le violon préféré parmi les douze instruments, quatre solistes l'ayant choisi comme favori, et quatre autres l'ayant choisi en deuxième position (les solistes devant classer leur quatre violons préférés). En moyenne, les violons préférés neufs ont été évalués de manière supérieure au violons préférés anciens pour la jouabilité, l'articulation et la projection, et au moins de manière équivalente en terme de timbre (figure 3.2).

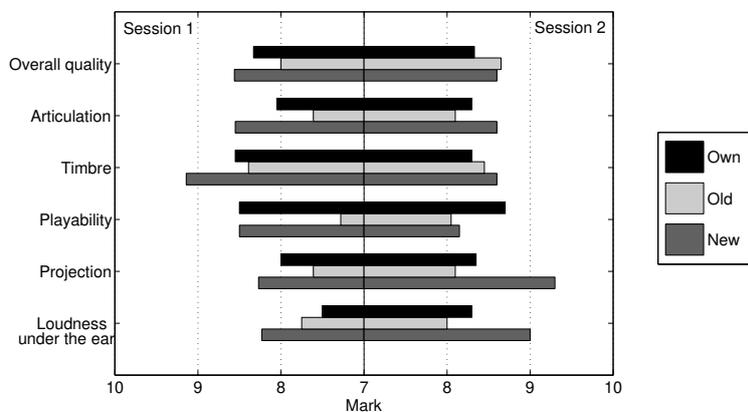


FIGURE 3.2 – Note moyenne par critère pour chaque catégorie de violons : ceux des participants (own), anciens (old) et neufs (new).

Ces résultats ne confirment donc pas la croyance que les violons neufs sont plus puissants que les violons anciens au détriment de leur timbre. Enfin, il s'est avéré que les dix solistes ne sont pas arrivés à faire la distinction entre les violons neufs et anciens mieux que la chance (tableau 3.1), et aucun soliste n'est arrivé à faire la différence de manière systématique.

	correct	faux
violons neufs	15	18
violons anciens	18	13

Tableau 3.1 – Suppositions des solistes concernant l'âge des violons neufs et anciens.

### 3.1.4 Discussion

Ces résultats confirment et étendent ceux de l'étude d'Indianapolis [69] et viennent mettre à mal les croyances quasi canoniques à propos des vieux violons italiens. Nulle surprise alors que cette étude ait eu, comme la précédente, un fort retentissement médiatique en France et à l'étranger, lors de la publication de l'article scientifique. Il semble cependant que, par rapport à la première étude, les critiques furent bien moins vives, et les éloges plus nombreux. Parmi eux, le plus important (et intéressant) est certainement celui de Daniel Levitin, psychologue renommé dans le domaine de la musique, invité par PNAS à écrire un commentaire sur notre article [73]. Il y souligne en particulier : « The study balanced rigor with real-world considerations and represents the most ecologically valid conditions possible while maintaining strict experimental protocols ». Il souligne également le côté sans appel des résultats : « In PNAS, Fritz et al. follow-up their ground-breaking 2012 paper with what will probably be the final nail in the coffin for those who would believe that old musical

[69] FRITZ et al. (2012), « Player preferences among new and old violins »

[73] LEVITIN (2014), « Expert violinists can't tell old from new »

[74] TAI (2014), « Role of timbre memory in evaluating Stradivari violins »

[75] FRITZ et al. (2014), « Reply to Tai : On the inability of 10 soloists to tell apart Old Italian and new violins at better than chance levels »

1: Version longue : [https://www.youtube.com/watch?v=0HXOPjI9l0I&ab\\_channel=StefanAvalos](https://www.youtube.com/watch?v=0HXOPjI9l0I&ab_channel=StefanAvalos)  
Version courte : [https://www.youtube.com/watch?v=tDQw0m7BmPI&ab\\_channel=StefanAvalos](https://www.youtube.com/watch?v=tDQw0m7BmPI&ab_channel=StefanAvalos)



[76] CURTIN (2014), Billet posté le 21/02/2014

instruments sound demonstrably better than new instruments. » L'intérêt de PNAS se note également au fait que le journal a accepté de publier une critique (écrite par un chercheur de Taiwan) [74] et notre réponse à cette critique [75].

Le meilleur accueil au sein de la communauté des violonistes et des luthiers peut s'expliquer par la combinaison de quatre points : i) la situation d'essai d'instruments était plus réaliste ; ii) la diversité des expertises des membres de l'équipe a permis de prendre en compte le point de vue des différents acteurs de la communauté apportant ainsi une plus grande crédibilité à l'étude ; iii) des communications en amont sur la méthodologie et les résultats dans divers ateliers Science et Lutherie auxquels j'ai été invitée en France et aux Etats-Unis ainsi qu'un documentaire par le réalisateur américain Stefan Avalos à destination du grand public <sup>1</sup> ont permis (contrairement aux articles de presse malheureusement très souvent erronés) à la communauté de connaître relativement en détail et avec précision la méthodologie utilisée sans avoir à lire les articles scientifiques.

Ces travaux ont été récompensés par la médaille de bronze du CNRS en 2016 et ont eu d'importantes retombées. Les résultats permettent de remettre à leur juste valeur l'incroyable travail des luthiers actuels et la qualité des instruments contemporains. Nombreux sont les luthiers qui nous ont remerciés et qui n'ont pas hésité à mettre en ligne sur leur site web nos articles ou bien à afficher dans leurs ateliers divers articles de presse. Cela va même jusqu'à révolutionner leur manière de penser. Ainsi, le co-auteur Joseph Curtin décrit sur son blog [76] l'impact qu'a eu la science sur son travail. Plusieurs autres luthiers parlent de « libération », car ils ne se sentent désormais plus obligés de copier les vieux violons italiens. Par ailleurs, ils ont observé une modification des mentalités de certains de leurs clients qui s'intéressent davantage aux violons fabriqués actuellement, suite aux articles de presse qu'ils ont lus sur notre étude.

Nous espérons aussi que cette étude va permettre aux jeunes solistes d'être appréciés et reconnus pour la façon dont ils jouent et non quel instrument ils jouent. Par ailleurs, cette étude montrant que trouver un instrument qui convient à ses besoins musicaux est tout à fait possible dans une gamme de prix accessible, beaucoup de jeunes violonistes, qui savent qu'ils ne pourront jamais s'offrir un vieux violon italien et qui n'ont pas envie d'être à la merci d'un mécène, se sentent rassurés. Une multitude d'outils d'expression musicale de grande qualité est disponible sur le marché du violon neuf : il leur suffit d'ouvrir les oreilles... et de fermer les yeux !



FIGURE 3.3 – Stradivarius à gauche et Guarnerius del Gesu de la collection du Musée de la musique.

### 3.2 Influence du modèle de violon : Stradivarius versus Guarnerius

Les violons contemporains sont en majorité copiés à partir des violons crémonais du XVIII<sup>e</sup> siècle, et principalement ceux des deux grands maîtres que sont Stradivarius et Guarnerius del Gesù. De nombreux luthiers sont convaincus que les modèles Stradivarius ont des qualités sonores spécifiques et différentes des modèles Guarnerius. Même si les modèles de Stradivarius et Guarnerius, respectivement, sont nombreux

et variés, les experts sont capables, visuellement, d'attribuer un modèle à l'un ou l'autre de ces deux luthiers (figures 3.3 et 3.4).

Ils affirment qu'ils peuvent aussi le faire auditivement, avec des caractéristiques de *crystallinité* et de *pureté* pour le « son Stradivarius » et plutôt des caractéristiques de *richesse dans les graves* et de *profondeur* pour le « son Guarnerius ».

Nous avons voulu tester ces affirmations en réalisant un test de catégorisation libre en situation de jeu sur neuf violons, trois modèles Guarnerius – nommés V2, V4 et V6 – (dont un authentique, V2), cinq modèles Stradivarius – nommés V1, V3, V5, V7 et V8 – (dont deux authentiques, V1 et V3) et un modèle innovant V9 (avec un bois de densité beaucoup plus faible que la normale). Le test de catégorisation libre a été mis au point en sciences cognitives pour tenir compte de la nature catégorielle de la perception humaine et éviter que l'expérimentateur n'impose d'*a priori* aux participants [77]. Les participants sont invités à mettre les objets similaires dans le même groupe et les objets dissimilaires dans des groupes différents. Ils peuvent faire autant de groupes qu'ils le désirent, et sont totalement libres de choisir les critères de similarité qui leur sont pertinents. Ils doivent décrire chaque catégorie à la fin de l'expérience. A l'instar du seul cas (du moins à notre connaissance) en acoustique des instruments de musique où elle a été utilisée (pour un test d'écoute de guitares électriques, ne différant que par le bois du manche, soit en ébène, soit en palissandre [78]), cette méthodologie apparaît particulièrement adaptée à notre étude puisque nous avons deux groupes d'instruments en termes de modèle de fabrication.

21 violonistes, dont 15 professionnels, ont participé. La classification ascendante hiérarchique obtenue à partir des données de catégorisation des neuf violons est présentée à la figure 3.5 [79].

Alors que les trois modèles Guarnerius (V2, V4 et V6) ont effectivement été les instruments qui ont été les plus groupés ensemble, ils s'avèrent plus proches de deux modèles Stradivarius que ne le sont les autres modèles Stradivarius [79]. Par ailleurs, les raisons pour lesquelles ils ont été groupés ensemble varient très largement entre les violonistes. Ainsi ils ont pu être considérés aussi bien comme les violons les plus brillants que les violons les plus sombres, les violons préférés que les violons les moins aimés, ... Nos résultats ne permettent donc pas d'étayer les affirmations des luthiers quant à l'existence d'un son typique Stradivarius qui se distinguerait d'un son typique Guarnerius. Par ailleurs, les trois instruments anciens authentiques (V1, V2 et V3) n'ont pas été groupés ensemble, ce qui confirme une nouvelle fois qu'il n'existe pas de « son ancien » par opposition à un « son neuf » et est cohérent avec le fait que les interprètes, dans nos études précédentes, n'ont pu différencier les violons neufs des violons anciens.

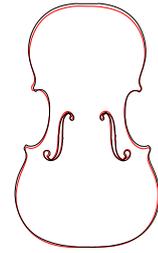


FIGURE 3.4 – Superposition d'un modèle Stradivarius et d'un modèle Guarnerius. En noir : Antonio Stradivari, "Toscano", 1690 ; en rouge : Guarneri del Gesù "Principe Doria", Cremona 1734. Crédit : Francesco Piasentini.

[77] GAILLARD (2012), « Laissez-nous trier ! TCL-LabX et les tâches de catégorisation libre de sons »

[78] PATÉ et al. (2015), « Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarists' perception »

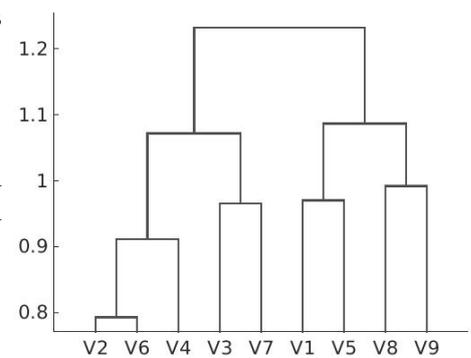


FIGURE 3.5 – Classification ascendante hiérarchique des neuf violons obtenue à partir des données de catégorisation de 21 participants.

[79] FRITZ et al. (2016), « The violin : Studying the influence of the model by means of a free sorting task »

## 3.3 Projet Bilbao : influence de l'épaisseur des tables

### 3.3.1 Contexte

La seule étude (à notre connaissance du moins) qui s'est intéressée à contrôler précisément un paramètre de facture du violon et à en étudier son influence sur la qualité des instruments finis est celle d'Alonso-Moral et Jansson [80]. Des tables, fonds et éclisses d'épaisseurs différentes ont été construits puis assemblés suivant différentes combinaisons. Cependant, toutes ces combinaisons n'étaient pas disponibles en même temps (les violons étaient à chaque fois désassemblés pour refaire de nouvelles combinaisons) et, surtout, elles n'ont pas été évaluées par des musiciens. Leur qualité a seulement été prédite sur la base de travaux antérieurs réalisés sur un ensemble de vingt-quatre violons qui avaient été présentés au concours de lutherie Nordisk Violinbyggareforening [81].

[80] ALONSO-MORAL (1984), « From properties of free top plates, of free back plates and of ribs to properties of assembled violins »

[81] ALONSO-MORAL et al. (1982), « Input admittance, eigenmodes and quality of violins »

2: Ce projet, porté par Unai Igartua, professeur d'acoustique de l'école de lutherie de Bilbao (BELE), a été financé par Erasmus+ (à hauteur de 65 000 euros) et a impliqué deux autres professeurs de BELE ainsi que les luthiers espagnol Roberto Jardon Rico et anglais George Stoppani, et moi-même.

### 3.3.2 Fabrication des violons

Le projet Bilbao <sup>2</sup> s'inspire de cette étude, avec pour but de créer des violons qui puissent être comparés et évalués simultanément par des musiciens et des auditeurs, en tenant compte des standards actuels (épaisseurs un peu plus fines actuellement qu'il y a 35 ans). Durant ce projet, six violons ont été construits à BELE suivant un protocole extrêmement strict afin de minimiser la variabilité des multiples paramètres de construction autres que l'épaisseur des tables d'harmonie et des fonds. Ainsi, les morceaux de bois ont été respectivement choisis dans le même morceau de tronc (épicéa pour les tables, érable pour les fonds) et les tables et fonds ont été découpés avec une machine à commande numérique pour que les voûtes extérieures (correspondant à un modèle Stradivarius) ne soient plus modifiées par la suite. Seules les épaisseurs ont été affinées manuellement par l'intérieur selon un processus basé sur la mesure de fréquences modales, décrit dans la partie suivante. Les manches ont aussi été découpés avec la machine. Les touches et chevalets ont été sélectionnés avec soin parmi une cinquantaine puis, pour les chevalets, taillés suivant un processus similaire à celui utilisé pour les tables et fonds. Au final, trois violons ont été assemblés avec un fond normal et une table souple (fine), normale ou rigide (épaisse). De manière réciproque, trois violons ont été assemblés avec une table normale et un fond souple (fin), normal ou rigide (épais). Par normale, on entend une épaisseur qui est dans la moyenne de ce que les luthiers fabriquent actuellement. Les deux violons ayant un fond et une table normaux servent de contrôle.

Je ne peux rentrer ici dans les détails de la complexité technique du processus (illustré à la figure 3.6) pour contrôler autant que possible la multitude de paramètres aux différentes étapes de fabrication ni dans ceux de la justification de tous les choix méthodologiques, sachant que ce processus a pris deux ans pour aboutir à la fabrication de ces six violons (que l'on nommera violons BELE par la suite). J'exposerai cependant à la partie suivante les procédures qui sont directement liées à des considérations vibratoires.

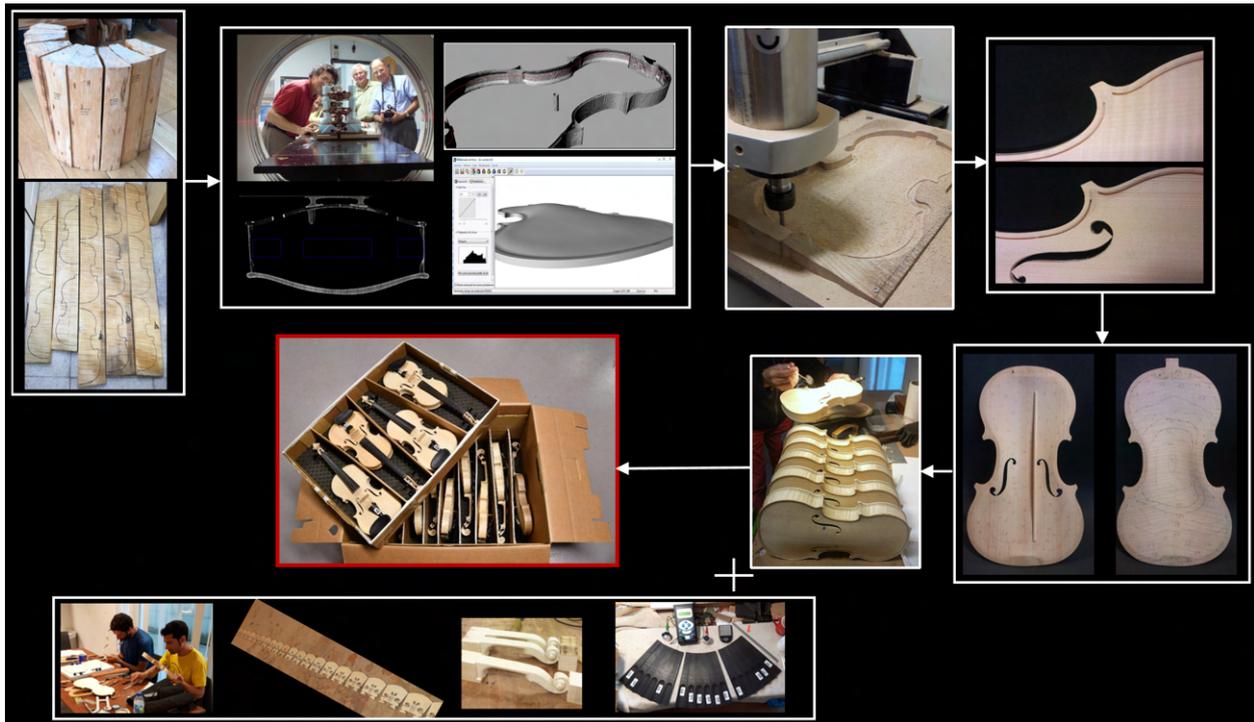


FIGURE 3.6 – Schéma illustrant les différentes étapes de la construction des violons [82].

[82] FRITZ et al. (2019), « The Bilbao project : How violin makers match backs and tops to produce particular sorts of violins »

En sus des étudiants de l'école BELE qui ont fabriqué les six instruments sous l'étroite surveillance des luthiers (professionnels) participant à ce projet, six luthiers professionnels dits externes ont également fabriqué des violons avec quelques contraintes relâchées. Ainsi, ils ont dû choisir des bois de densités similaires à celles des bois utilisés pour les six violons BELE puis les tables, fonds et manches ont été prédécoupés en même temps que les tables et fonds des instruments BELE. Par contre, ces luthiers ont alors été libres d'affiner les tables/fonds (par l'intérieur) comme ils le jugeaient nécessaire. Nous leur avons ensuite fourni tous les accessoires (touches, chevalets, ...). Le but était d'avoir avec ces six instruments dits externes une plus grande variabilité (mais pas trop grande non plus) et de pouvoir mettre en contexte les variations d'épaisseurs contrôlées (toutes choses étant autant que possible égales par ailleurs) des violons BELE par rapport à des variations d'épaisseurs non contrôlées et des variations de bois, de collage, de montage, ..., des violons réalisés par les luthiers externes.

Enfin, à ces douze violons, nous avons rajouté un violon fait par un des luthiers externes, sur un modèle complètement différent (le Plowden de Guarnerius del Gesu). Une idée répandue dans la communauté des luthiers est en effet que l'influence du luthier l'emporte sur le choix du modèle et que donc les instruments d'un même luthier, même s'ils sont construits avec des paramètres très différents, se ressembleront davantage que des instruments construits sur le même modèle par des luthiers différents.



FIGURE 3.7 – Mesures vibratoires réalisées par Ruth Obermayer, une des luthières « externes », sur la caisse d'un des violons BELE.

[83] DAVIS (2013), « On the effective material properties of violin plates »

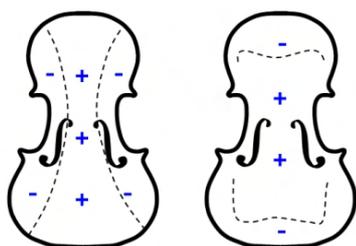


FIGURE 3.8 – Modes 2 (en croix) et 5 (en anneau) d'une table de violon [83].

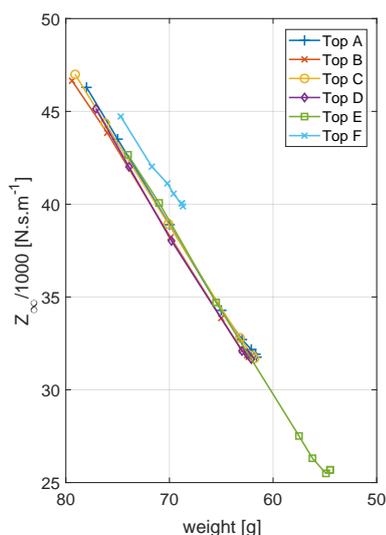


FIGURE 3.9 – Evolution de l'impédance caractéristique des six tables BELE en fonction de leur masse au fur et à mesure de leur mise à l'épaisseur.

### 3.3.3 Mesures vibro-acoustiques

Des mesures vibro-acoustiques ont été faites à toutes les étapes de construction (mise à l'épaisseur progressive des tables et des fonds, ajout de la barre d'harmonie sur les tables, assemblage des caisses, instruments complets), aussi bien pour aider à contrôler la construction que pour des analyses ultérieures.

#### Mesures vibratoires et analyse modale expérimentale

Les mesures vibratoires ont été réalisées de manière classique avec une excitation par un marteau d'impact en divers points de la structure mesurée (62 points pour les tables, 51 points pour les fonds, 113 points pour les corps assemblés et 142 points pour les instruments complets) et une mesure de la réponse avec un accéléromètre miniature (0.2g) positionné pour éviter les lignes nodales des modes les plus importants (dits de signature), principalement en conditions libres (figure 3.7). Les mesures sont ensuite intégrées pour obtenir des fonctions de réponses en fréquence (FRF) homogènes à une vitesse sur une force.

Le contrôle de l'épaisseur des tables et des fonds, au fur et à mesure de leur affinage après la découpe à la machine à commande numérique, s'est fait non pas à partir de mesures statiques (masse ou épaisseur par exemple) mais à partir de l'estimation d'une grandeur qui tient compte du comportement vibratoire, à savoir l'impédance caractéristique  $Z_\infty$  (qui est l'impédance du système moyennée sur tous les points possibles d'excitation). Evan Davis a proposé la formule suivante pour une table ou un fond de violon [83] de masse  $M$  :

$$Z_\infty = 4M \sqrt{\frac{2}{13} (f_2^2 + f_5^2)}$$

avec  $f_2$  et  $f_5$  les fréquences propres des modes 2 et 5 (figure 3.8).

Au fur et à mesure de la mise à l'épaisseur, l'impédance  $Z_\infty$  a été déterminée grâce à la mesure des fréquences des modes 2 et 5 ainsi que de la masse. Au vu de l'évolution de cette impédance en fonction de la masse  $M$ , les choix d'épaisseur ont été effectués. Ainsi, il est clair dès les premiers points de mesure (masses les plus élevées, coin en haut à gauche de la figure 3.9, que les tables E et F se comportent de manière différente des autres. Elles ont ainsi été choisies comme celles qui seraient affinées respectivement le plus et le moins, tout en restant, en termes de masse, dans un intervalle raisonnable au regard des standards actuels. Les quatre autres ont alors été affinées pour avoir une impédance intermédiaire (et identique). Il est intéressant de noter que la table fine (55g, épaisseur moyenne de 2.2 mm) a une masse 13% plus faible que les tables normales (environ 63g, épaisseur moyenne de 2.6 mm), ce qui conduit à une différence d'impédance de 19% ; la table épaisse (69g, épaisseur moyenne de 3.3 mm) a, quant à elle, une masse 10% plus élevée, ce qui conduit à une différence d'impédance de 25%.

Exactement le même processus a été appliqué pour la mise à l'épaisseur des fonds.

Les figures 3.10 et 3.11 montrent la réponse en fréquence moyennée sur les 62 points de mesure (accéléromètre positionné sur le bord intérieur de l'ouïe de gauche, à mi-hauteur) pour les six tables BELE, respectivement juste après leur découpe à la machine à commande numérique et après leur mise à l'épaisseur (avant de coller les barres d'harmonie).

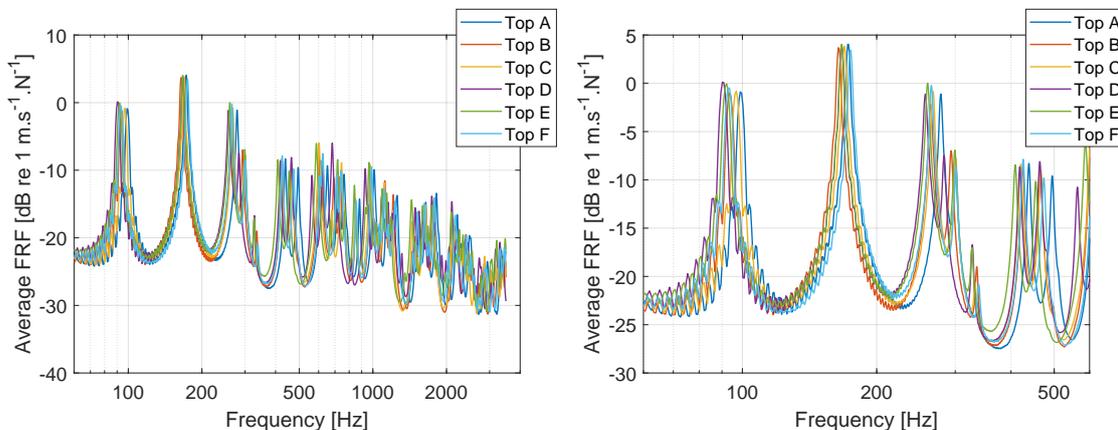


FIGURE 3.10 – FRF moyennée sur les 62 points de mesure pour les six tables BELE après découpe. La figure de droite est un zoom sur les basses fréquences de la figure de gauche.

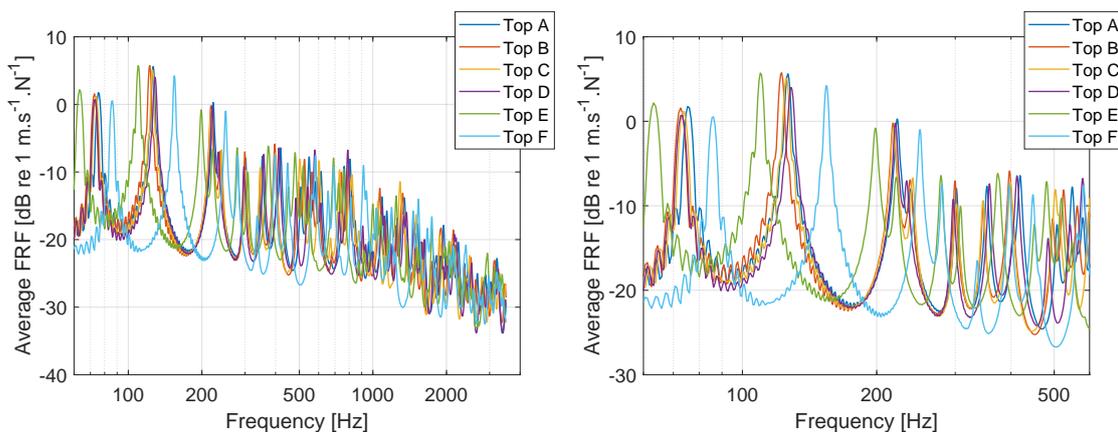


FIGURE 3.11 – FRF moyennée sur les 62 points de mesure pour les six tables BELE après la mise à l'épaisseur. La figure de droite est un zoom sur les basses fréquences de la figure de gauche.

A basse fréquence, les pics sont bien alignés en fréquence et en amplitude après découpe. On peut ainsi observer une différence de 4% sur la fréquence du deuxième mode entre les six tables, qui passe à 5% pour les quatre tables normales (A,B, C et D) après la mise à l'épaisseur. Cette variation est à mettre en regard avec une différence de 13% vers les fréquences basses pour la table E fine (plus souple) et de 22% vers les fréquences hautes pour la table F épaisse (plus rigide), en très bon accord avec les simulations par éléments finis de Colin Gough [84]. Par ailleurs, nous pouvons observer que, comme prédit par ces simulations, les différences sur le mode 5 sont plus faibles que les différences sur le mode 2 (l'effet de la voûte qui reste constante l'emportant sur l'effet de l'épaisseur). Ces mesures montrent que malgré un matériau extrêmement variable et une mise à l'épaisseur manuelle, le contrôle de la construction des ces six tables a été réalisé avec succès.

[84] GOUGH (2015), « Violin plate modes »

Les résultats pour les fonds ne sont pas présentés ici mais sont très similaires.

Les fréquences des modes 2 et 5 ont pu également être mesurées sur les tables et les fonds affinés par les luthiers externes, ainsi que leur masse, de sorte que nous pouvons classer tous les tables/fonds sur une échelle de souple (impédance faible) à rigide (impédance élevée). Puisqu'il s'agit du même modèle de voûte et que les bois utilisés sont de densités similaires, cette échelle peut se convertir en échelle d'épaisseur, qui est plus intuitive pour les luthiers (cf tableau 3.2).

**Tableau 3.2** – Les 13 violons construits dans le projet Bilbao, suivant une échelle thin / thin+ / medium- / medium / medium+ / thick- / thick

violon	table	fond
V1 - BELE	medium	thick
V2 - ext	medium	thin+
V3 - ext	thin+	medium
V4 - BELE	thick	medium
V5 - BELE	medium	medium
V6 - ext	medium	medium
V7 - ext	medium	medium
V8 - ext	medium+	medium-
V9 - BELE	thin	medium
V10 - ext	Guarnerius	
V11 - BELE	medium	medium
V12 - ext	medium-	medium
V13 - ext	medium	thin

M [g]	$f_t$ [Hz]	$\propto Z_\infty$
1.86	3076	5721
1.84	3121	5742
1.84	3123	5746
1.81	3174	5745
1.76	3271	5757
1.81	3170	5738

**Tableau 3.3** – Masse  $M$ , fréquence de tangage  $f_t$  (premier mode) et quantité proportionnelle à l'impédance caractéristique des six chevalets BELE

Un processus similaire a été utilisé pour tailler les chevalets à partir d'un lot de 50 chevalets Despiau. Pour la détermination de l'impédance, seule la fréquence  $f_b$  du premier mode du chevalet (de tangage sur ses pieds) aux alentours de 3 kHz a été utilisée, et c'est la quantité  $M \times f_b$  qui a été contrôlée lors de la taille des chevalets. Les données pour les six chevalets utilisés pour les violons BELE sont indiquées pour information dans le tableau 3.3.

[85] CURTIN (2009), « Measuring violin sound radiation using an impact hammer »



**FIGURE 3.12** – Dispositif de mesure de rayonnement (dans le plan horizontal) d'un violon (ici dans la chambre anéchoïque de l'Institut d'Alembert, avec un violon qui sera présenté à la partie 4.5).

### Mesures acoustiques

Des mesures de rayonnement ont été réalisées sur les treize instruments finis suivant un protocole bien rôdé dans la communauté [85] et illustré à la figure 3.12 : instrument maintenu verticalement ; excitation avec un marteau d'impact sur le chevalet, tangentiellement sur un des coins du chevalet, et parfois aussi perpendiculairement au milieu du chevalet ; enregistrement microphonique à environ 30cm du chevalet, tout autour de l'instrument en restant dans un plan horizontal (12 positions, tous les 30°).

Pour chaque instrument, entre douze (excitations horizontales uniquement) et vingt-quatre (excitations horizontales et verticales) fonctions de transfert ont ainsi été mesurées. Afin de pouvoir comparer facilement plusieurs instruments, celles-ci sont le plus couramment compilées en une seule fonction de transfert grâce à une moyenne RMS. Les mesures (12 excitations horizontales) des deux violons de contrôle (V5 et V11) ainsi que du violon à la table épaisse (V4) sont représentées à la figure 3.13. Nous pouvons voir que les réponses rayonnées des deux violons de contrôle sont extrêmement proches, à notre plus grande satisfaction. Les modes de signature se superposent quasiment parfaitement, tant

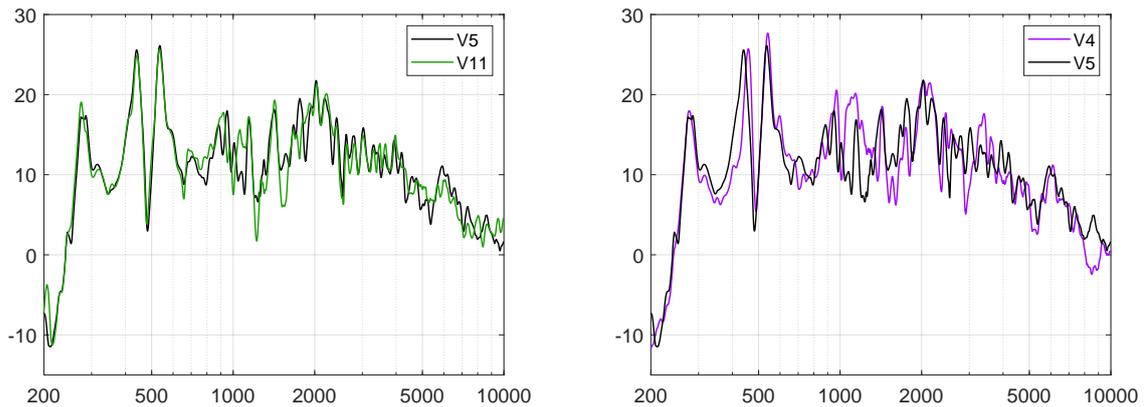


FIGURE 3.13 – Réponse rayonnée (moyennée sur les 12 mesures horizontales) des deux violons de contrôle V5 et V11, ainsi que du violon à la table épaisse, V4.

en amplitude qu'en fréquence. *A contrario*, le violon à la table épaisse s'en éloigne : les deux modes B1- et B1+ sont décalés vers les hautes fréquences, et le niveau de la réponse entre 1000 et 2000 Hz est davantage modifié. Les différences de fréquences modales sont cependant moins grandes que celles observées sur les tables libres ; ainsi, la fréquence du mode B1- ne s'éloigne que de 5%! Ceci est en parfait accord avec les résultats de Niewczyk et Jansson [86] et de Schleske [87], à savoir que les fréquences de résonance de l'instrument assemblé sont moins sensibles à l'épaisseur des tables que ne le sont les fréquences des modes des tables libres. Les différences de niveau pouvant cependant atteindre presque 10 dB à certaines fréquences, nous espérons que ces instruments seront tout de même jugés assez différents par les violonistes et les auditeurs.

[86] NIEWCZYK et al. (1987), « Experiments with violin plates »

[87] SCHLESKE (2000), « Eigenmodes of vibration in the working process of a violin »

### 3.3.4 Tests perceptifs

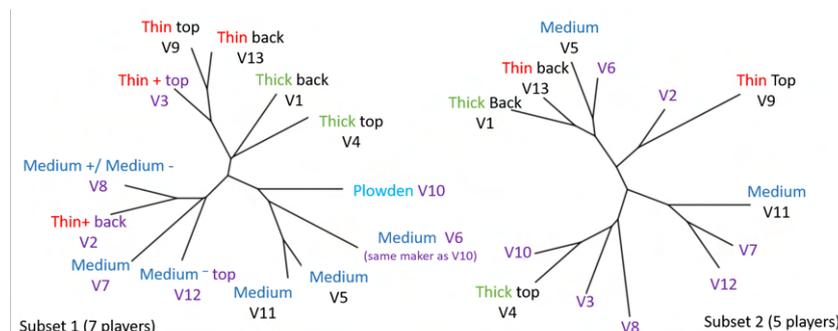
Des tests perceptifs, aussi bien en situation de jeu que d'écoute, ont été réalisés à Bilbao, à l'issue de la construction des violons, puis à Oberlin, six mois plus tard.

Le test de jeu à Bilbao consistait en une catégorisation libre. Les musiciens devaient jouer et évaluer les 13 violons puis les grouper par similarité. Ils devaient ensuite décrire chaque groupe (en particulier le point commun des violons de chaque groupe). L'arbre hiérarchique<sup>3</sup> obtenu sur les 21 participants est assez difficile à interpréter car il y a beaucoup de variabilité individuelle. Nous avons donc regardé si les participants pouvaient être divisés en groupes avec des stratégies de groupement plus similaires. Nous avons ainsi identifié deux groupes, respectivement de sept et cinq participants, dont les arbres sont présentés à la figure 3.14.

La cohérence entre l'arbre correspondant au sous-groupe de sept participants (arbre de gauche) et les paramètres de facture est très forte : pour les instruments BELE, les deux violons avec une table/fond trop épaisse (respectivement fine) sont ensemble ainsi que les deux avec la table et le fond normaux. Par ailleurs, les instruments externes se répartissent bien dans les catégories, mis à part le V2 qui aurait eu plus sa place dans le groupe V9-V13-V3. Il est aussi intéressant de voir que le V10, fabriqué par le même luthier que le V6 mais sur un tout autre modèle, a

3: Un tel arbre permet de représenter les distances perçues entre les violons, la distance entre deux objets étant proportionnelle à la longueur totale des branches les reliant.

**FIGURE 3.14** – Arbres hiérarchiques obtenus pour deux sous-groupes de participants. Les épaisseurs des tables, autres que *medium*, sont spécifiées pour chaque violon. Un code couleur a été ajouté pour identifier plus facilement les groupes de violons.



été mis proche du V6. Ceci est en cohérence avec l’opinion des luthiers : les instruments d’un même luthier ont tendance à se ressembler, même si le luthier les construits suivant des modèles et des règles de construction très différents.

Malheureusement, l’autre arbre (celui de droite à la figure 3.14) est bien plus difficile à interpréter. Il montre aussi des différences énormes d’évaluation des similarités entre violons par rapport au premier arbre. Ainsi, par exemple, V5 n’est plus du tout avec V11 (il en est même loin), mais est avec V13. Ces différences proviennent-elles de perceptions différentes ou bien de différences dans le jeu de ces instruments par les participants (qui conduisent à des différences de perception)? Pour répondre à cette question, nous avons analysé les enregistrements réalisés durant l’expérience. Nous avons en effet demandé à tous les participants de jouer une gamme chromatique de 3 octaves commençant sur le sol 4 (196 Hz) sur tous les violons. Nous avons alors calculé un « *long-term average spectrum* » (LTAS) pour chaque violon et chaque participant. Ces LTAS ont ensuite été moyennés sur l’ensemble des musiciens de chacun des deux groupes, puis traités par un modèle de sonie pour sons stationnaires (modèle de Moore et Glasberg [88], norme ANSI S3.4-2007) pour obtenir la sonie spécifique moyenne de chaque violon, pour chaque groupe de participants. Adoptant la démarche de Lavandier et coll. [89], une distance a été calculée pour chaque paire de violons  $i$  et  $j$ , au sein de chaque groupe de participants, de la manière suivante. Tout d’abord, le rapport  $r_{ij}(f)$  de leurs sonies spécifiques respectives  $L_i(f)$  and  $L_j(f)$  est calculé pour chaque bande de fréquence  $f$  (sachant qu’il y a  $N_f = 371$  bandes) :

$$r_{ij}(f) = \frac{\max \{L_i(f), L_j(f)\}}{\min \{L_i(f), L_j(f)\}} - 1$$

La distance  $d_{ij}$  est alors définie comme la moyenne des  $r_{ij}(f)$  sur les bandes de fréquences :

$$d_{ij} = \frac{1}{N_f} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} r_{ij}(f)$$

Nous avons alors pu calculer, pour chaque groupe de participants, la corrélation entre le vecteur contenant toutes les  $d_{ij}$  ainsi calculées et le vecteur contenant les distances issues de la catégorisation libre. Malheureusement, ces corrélations sont quasi nulles (0.1 pour le groupe 1 et 0.04 pour le groupe 2). Les différences spectrales entre les musiciens (qui peuvent être vraiment importantes, ce qui pose la question de ce qu’est l’identité sonore d’un instrument, cf figure 3.15) ne nous permettent

[88] MOORE et al. (1997), « A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness »

[89] LAVANDIER et al. (2008), « Comparative measurements of loudspeakers in a listening situation »

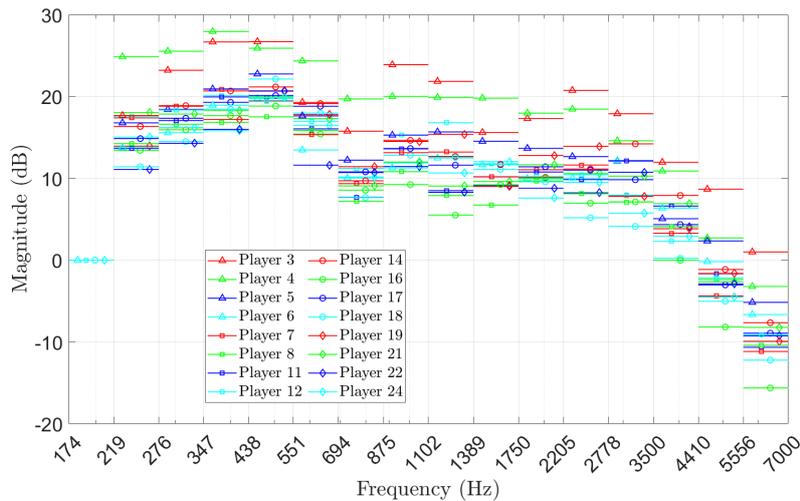


FIGURE 3.15 – LTAS du violon 5 pour 16 participants moyennés par bandes d'octave et normalisés par rapport à la première bande.

donc pas d'expliquer les différences de stratégie de catégorisation entre les participants. Même si le timbre est un des paramètres prépondérants dans l'évaluation d'un instrument, d'autres paramètres, plus temporels (comme la jouabilité, la réponse, l'articulation), sont cruciaux également. Il reste maintenant à trouver des descripteurs audio qui permettent de les quantifier, et voir ensuite si les distances calculées à partir de ces descripteurs sont mieux corrélées avec les distances perceptives.

### 3.4 Comparaison de violons d'étude et de violons de concert

Lors de la thèse de Lei Fu, que j'ai co-encadrée avec Gary Scavone, à l'université McGill à Montréal, trois expériences perceptives ont été mises en place pour mieux comprendre les relations entre les qualités perçues d'un violon et sa structure physique.

Les travaux antérieurs présentés au chapitre 2 ont montré que les musiciens n'étaient généralement pas d'accord entre eux en termes de préférence ni même sur d'autres critères lors de l'évaluation de violons au-dessus d'un certain prix (1300 \$ CAD). La première étude perceptive s'est ainsi intéressée à examiner si l'accord entre les musiciens lors d'essais comparatifs était plus grand pour des violons d'entrée de gamme (violon d'étude) que pour des violons « de concert », si des différences perceptives significatives pouvaient être mises en évidence entre les deux catégories de violons et s'il existait des caractéristiques vibro-acoustiques qui pourraient expliquer ces différences. Les résultats montrent que les violons de concert ont été évalués, de manière significative, plus positivement que les violons d'étude, aussi bien en termes de préférence (figure 3.16) que sur les critères de résonance, clarté, richesse et équilibre (figure 3.17) [90].

Les résultats sont finalement assez similaires à ce qui avait été observé dans notre expérience de comparaison entre des Stradivarius et des violons neufs (six de chaque) [71], exposée au début de ce chapitre. Si les violons sont pris un par un, il n'y a pas vraiment de différences

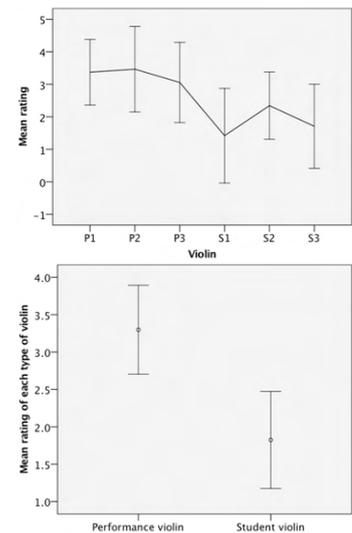


FIGURE 3.16 – Note moyenne de préférence pour chaque violon (P=performance violon, S= student violin) en haut (extrait de [90]) et par catégorie de violon en bas. Les barres d'erreur correspondent aux intervalles de confiance à 95%.

[90] Fu et al. (2019), « Player evaluation of performance and student violin »

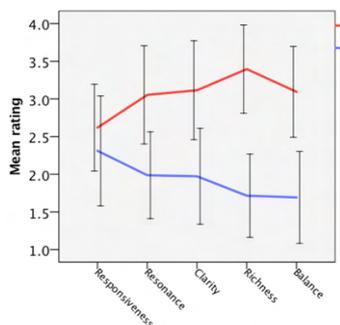


FIGURE 3.17 – Note moyenne par critère pour chaque catégorie de violon : en rouge les violons de concert, en bleu les violons d'étude. Les barres d'erreur correspondent aux intervalles de confiance à 95%.

significatives, en raison de la variabilité individuelle forte au niveau de la préférence. Parmi les violons en haut du classement, il y a aussi bien des Stradivarius que des violons neufs, et il en est de même en queue du classement. Si par contre on fait la moyenne sur les six Stradivarius et qu'on compare par rapport à la moyenne sur les six violons neufs, on observe des effets significatifs (en faveur des violons neufs). De la même manière ici, c'est en faisant la moyenne sur les trois violons d'étude et en la comparant à celle des trois violons de concert qu'on aboutit à un résultat significatif (en faveur des violons de concert).

### 3.5 Influence des cordes

Les deux autres études de la thèse de Lei Fu ont exploré les sources de désaccord entre musiciens à travers deux modifications spécifiques du violon. Ainsi plutôt que de comparer différents violons, qui généralement (sauf dans le cas exceptionnel du projet Bilbao) diffèrent sur une multitude de paramètres qui sont difficilement quantifiables, ces expériences comparent un instrument dans différents états, qui diffèrent suivant un critère bien précis et contrôlé. Ceci se fait cependant à un certain prix méthodologique puisqu'évidemment l'instrument ne peut exister sous plusieurs états de manière simultanée.

Comment les cordes influencent la perception des qualités d'un violon fut l'objet de la deuxième étude. Deux violons, de qualité sonore et de jouabilité très similaires ont été utilisés. Ils étaient initialement montés avec des cordes Dominant. Les participants devaient jouer les deux violons puis décrire et évaluer les différences au cours d'une session intitulée D1-D2. Ensuite, à l'insu des participants, les cordes du violon 2 étaient changées pour un autre modèle (Kaplan ou Pro-Arté) et les musiciens devaient réévaluer les différences entre les deux violons (session D1-K2 ou D1-P2). Contrairement à nos hypothèses basées sur l'opinion des musiciens qui trouvent que l'effet des cordes peut vraiment être très important, les résultats n'ont pas montré de différences significatives entre les diverses conditions expérimentales, à l'exception des évaluations de différence de brillance qui sont significativement plus élevées dans la session D1-D2 que dans la session D1-P2. Nous n'avons pas observé d'amélioration du violon avec des cordes de meilleure qualité et plus onéreuses [91].

[91] Fu et al. (2018), « How different strings affect violin qualities »



FIGURE 3.18 – Âme ajustable en carbone (de la marque Anima Nova).

### 3.6 Influence de la longueur de l'âme

La troisième étude consistait en des tests de jeu mais aussi d'écoute (qui seront présentés à la partie 4.6) pour explorer des modifications de la hauteur de l'âme, pour une position fixe. Il s'agissait à la fois d'étudier comment ces modifications influencent les qualités perceptives d'un violon mais aussi de déterminer le seuil de modification en-dessous duquel luthiers et violonistes ne perçoivent pas de différence. Ce seuil est supposé très bas d'après les luthiers qui sont nombreux à dire que juste enlever un copeau peut faire une différence énorme. A cet effet, une âme en fibre de carbone de longueur ajustable a été utilisée (figure 3.18). Cette âme permet de modifier très précisément la longueur tout en gardant la

position fixe, ce qui ne pourrait être le cas avec une âme traditionnelle en bois.

Durant le test de jeu, les participants commençaient par évaluer les qualités d'un violon donné, dont la longueur de l'âme était modifiée par un expérimentateur, afin de déterminer la longueur optimale (qui conduisait à la meilleure qualité) pour chacun d'entre eux. Dans un deuxième temps, l'expérimentateur modifiait, ou non, la longueur de l'âme, dans une plage de  $\pm 0,1$  mm autour de la longueur optimale, et les participants devaient dire, après avoir joué, si le réglage avait été modifié ou pas. Les résultats montrent que la longueur optimale pour chaque sujet varie énormément (figure 3.19), entre 0.13 mm et 0.62 mm de plus que la longueur de départ de l'âme (53 mm), un intervalle bien compris entre les valeurs extrêmes qui ont été testées (de 0 à 0.66 mm).

Par ailleurs, aucune des variations de longueur, allant jusqu'à 0,11mm, n'a pu être détectée au-dessus du seuil de chance. Ceci semble remettre fortement en question l'impression des luthiers de pouvoir modifier considérablement la qualité d'un violon en réduisant « d'un copeau » la longueur de l'âme. Deux raisons (non mutuellement exclusives) peuvent expliquer cette impression des luthiers. D'une part, pour raccourcir une âme, il faut la sortir et il est quasiment impossible de la remettre exactement au même endroit, ce qui peut ainsi aussi induire des effets sur la qualité sonore. D'autre part, nous avons observé un fort biais des participants, enclins à déceler une modification même si rien n'avait été modifié. Ceci montre l'importance de mettre en place des expérimentations rigoureuses au sein d'un métier très empirique et nourri par des croyances souvent fausses et de ce fait limitantes (*dixit* les luthiers eux-mêmes).

Ces résultats ont fait la couverture (figure 3.20) du numéro du JASA dans lequel ils ont été publiés [92].

### 3.7 Influence du bois du fond d'une guitare

Dans cette partie, nous nous intéressons à un autre instrument à cordes. La guitare acoustique avec cordes en acier est un des instruments les plus populaires au monde. Certains bois utilisés pour la fabrication des fonds sont vénérés par les guitaristes pour leurs propriétés acoustiques et considérés comme supérieurs à d'autres bois. Malheureusement, la plupart de ces bois sont chers, rares, et de sources non durables. Les fabricants de guitares sont conscients de ce problème et ont pris diverses initiatives pour y faire face, comme l'utilisation d'autres essences de bois. Le défi est de trouver des essences durables et peu chères sans avoir à faire de compromis sur la qualité sonore et la jouabilité des instruments.

Bien que les guitares acoustiques soient très fréquemment comparées dans des magazines de guitares, ces comparaisons sont souvent sujettes à diverses sortes de biais, comme la marque, le prix, l'aspect visuel. Nous retrouvons ainsi des problématiques similaires aux cordes frottées, ce qui justifie à mes yeux d'en parler ici, d'autant que j'ai participé à d'autres études sur des guitares, en utilisant des méthodologies similaires à celles développées sur les violons mais que je ne pourrai exposer dans ce mémoire par souci de concision [2, 3].

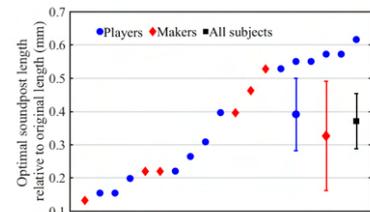


FIGURE 3.19 – Longueur optimale pour chaque participant, relative à la longueur de départ de 53 mm [92].



FIGURE 3.20 – Couverture du numéro du JASA de Juillet 2021.

[92] Fu et al. (2021), « Perception of violin soundpost tightness through playing and listening tests »

[2] WOODHOUSE et al. (2012), « Perceptual thresholds for acoustical guitar models »

[3] VIALA et al. (2019), « Substitution of spruce tonewood with composite materials tailored using numerical models : an application to archtop guitar »



FIGURE 3.21 – Les six guitares fabriquées par Roger Bucknall. Crédit : Sam Carcagno.

[93] CARCAGNO et al. (2018), « Effect of back wood choice on the perceived quality of steel-string acoustic guitars »

FIGURE 3.22 – Mobilité au chevalet des six guitares de l’expérience. Pour comparaison, la mobilité d’une autre guitare acoustique (Yamaha FG-403MS) qui n’était pas incluse dans l’expérience est aussi représentée [93].

Dans l’étude présentée ici, fruit d’une collaboration avec Sam Carcagno et Chris Plack de l’université de Leicester et Jim Woodhouse de l’université de Cambridge, six guitares (fig. 3.21) ont été fabriquées par le renommé luthier Roger Bucknall à partir du même modèle et des mêmes spécifications matérielles, à l’exception du fond et des éclisses, pour lesquels il a utilisé diverses variétés de bois, en termes de prestige, de disponibilité et de prix [93].

A la différence du projet Bilbao (partie 3.3), où aucune compensation des différences d’épaisseur n’a été recherchée, le luthier a ici joué sur certains paramètres de fabrication (en l’occurrence l’épaisseur) pour compenser les variations dues aux espèces de bois utilisées. Le but ici était en effet de produire des guitares de qualité équivalente (que le luthier pourrait vendre !), et montrer que le même standard de qualité pouvait être obtenu avec des essences moins nobles que le palissandre. Les caractéristiques acoustiques des guitares ont été mesurées. Les différences entre les guitares, en termes de mobilité au chevalet, sont faibles (figure 3.22).

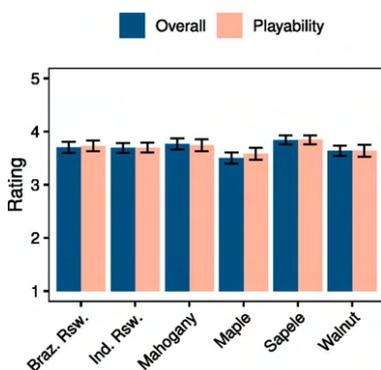
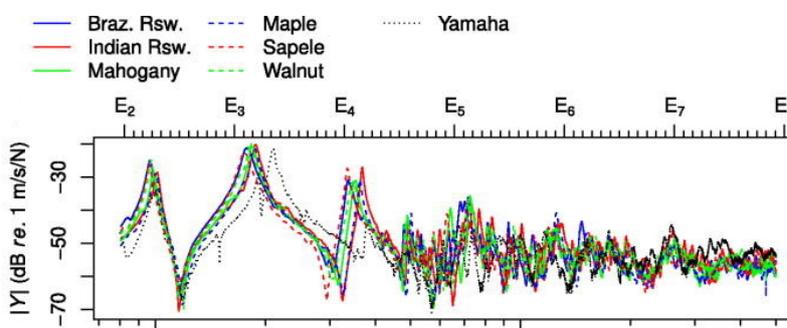


FIGURE 3.23 – Evaluation moyenne de chaque guitare, en termes de qualité globale et de jouabilité. Les barres d’erreur correspondent à  $\pm 1$  erreur-type de la moyenne [93].

Par ailleurs, des évaluations perceptives par des guitaristes experts ont été recueillies lors de tests en aveugle. Ainsi, 52 guitaristes (18 professionnels, 17 semi-pro et 9 amateurs) ont joué les guitares en aveugle et les ont évaluées chacune sur une échelle de 1 à 5 pour seize descripteurs, choisis à partir de l’analyse d’un corpus de critiques de guitare et de discussions avec le luthier du projet. Les résultats obtenus pour les critères « qualité sonore globale » et « jouabilité » sont présentés à la figure 3.23 : les évaluations sont très similaires pour toutes les guitares, pour les deux propriétés.

Un sous-groupe de 31 guitaristes (7 professionnels, 14 semi-pro et 10 amateurs) a ensuite réalisé une tâche de discrimination ABX. Pour chaque essai, les guitaristes jouaient une guitare (A) pendant une minute, puis une autre guitare (B) pendant une minute aussi. Une troisième guitare (qui était l’une des deux) leur était alors présentée, et après une minute de jeu, ils devaient décider s’il s’agissait de la guitare A ou de la B. En raison de contraintes de temps (et de fatigue), seules trois guitares (palissandre brésilien, sapelli et noyer) ont été utilisées dans cette tâche. Ces trois espèces de bois ont été choisies parmi les six possibles pour leur représentativité de différents niveaux de prix et de durabilité. De plus, d’après la figure 3.22, cette sélection inclut les bois qui ont les propriétés physiques les plus disparates (palissandre et noyer). Par une analyse basée sur la théorie de détection de signal [94], un indice  $d'$  permettant de quantifier la discrimination a été calculé (figure 3.24).

[94] BOLEY et al. (2009), « Statistical analysis of ABX results using signal detection theory »

Sachant que la discrimination est considérée comme mauvaise pour des

valeurs inférieures à 1, la figure 3.24 montre que, en tenant compte des intervalles de confiance à 95% (qui sont plus grands que les erreurs-types de la moyenne), la discrimination en aveugle par les guitaristes des différentes guitares est globalement très médiocre.

Ces résultats suggèrent donc que le bois du fond et des éclisses a un effet négligeable sur les qualités sonores et de jeu d'une guitare acoustique, et que des bois moins chers et de sources durables peuvent être utilisés pour remplacer des bois chers et menacés sans perte de qualité. Ces résultats sont importants, au vu des préoccupations environnementales croissantes causées par l'impact de l'industrie des instruments de musique sur la déforestation, qui a été mise en lumière par une campagne récente de Greenpeace en association avec les fabricants de guitares Taylor, Gibson, Martin, Fender, Guild et Yamaha afin de sensibiliser les populations et de protéger les espèces et les habitats (<http://musicwood.org/campaign.htm>).

### 3.8 Conclusion

De nombreux résultats présentés dans ce chapitre ont des retombées directes pour les luthiers et les instrumentistes, et celles-ci ont déjà été discutées au sein de chaque partie. J'aimerais donc plutôt discuter dans cette conclusion de la complexité d'une mise à l'épreuve scientifique des croyances des luthiers et des musiciens. Concevoir des tests de jeu contrôlés sans « jeter le bébé avec l'eau du bain » s'avère particulièrement difficile. Par exemple, un grand nombre d'essais est généralement nécessaire pour obtenir des résultats statistiquement robustes mais cela implique une durée d'expérience longue et de ce fait fatigante, ce qui rend les participants moins sensibles et fiables. Par ailleurs, pour pouvoir relier la perception des instrumentistes avec les paramètres de construction des instruments, il faut soit des instruments que l'on peut modifier – mais ceci implique que les participants ne peuvent pas comparer facilement plusieurs versions de ces instruments, puisque seule une version existe à un instant donné – soit une série d'instruments qui ont été fabriqués dans le but d'une expérience scientifique – ce qui est difficile à obtenir tant pour des questions de coûts, que de disponibilité de luthiers et de complexité méthodologique puisque ces instruments sont faits en grande partie à la main. De plus, la très grande variabilité inter-individuelle, en termes de préférence, de perception, de descriptions verbales, rend les interprétations complexes, de sorte qu'il n'est pas souvent aisé de formuler des réponses sans équivoque aux questions posées. Enfin, des contraintes soit directement imposées par la rigueur scientifique, soit imposées par des considérations pratiques (prêt des instruments limité, usure des cordes voire casse du chevalet après avoir changé les cordes un certain nombre de fois, disponibilité des participants, temps nécessaire pour réaliser une modification comme la longueur de l'âme . . . ) peuvent limiter la portée des résultats. Pour pallier ces difficultés, les tests d'écoute peuvent parfois offrir une solution alternative intéressante. Même s'ils enlèvent un grand nombre d'indices qui sont disponibles (et nécessaires) aux instrumentistes pour évaluer un instrument et, en conséquence, réduit l'évaluation au seul critère de qualité sonore, ils permettent un contrôle beaucoup plus grand et l'exploration d'autres facettes de la problématique qui nous intéresse, comme l'illustre le chapitre suivant.

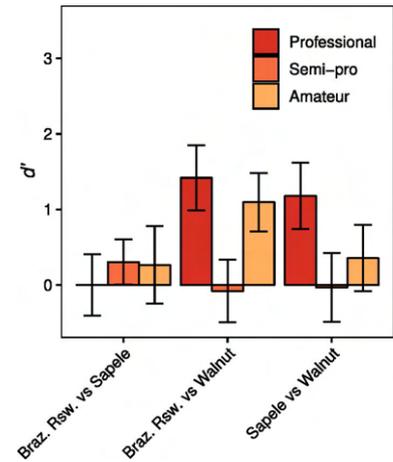


FIGURE 3.24 – Valeurs moyennes des  $d'$  obtenues pour chaque paire de guitares lors du test ABX, en fonction du statut professionnel des participants. Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  erreur-type de la moyenne [93].



# Explorer et comprendre les qualités perçues par les auditeurs

# 4

Comme les luthiers vendent généralement leurs instruments à des instrumentistes (plutôt que des auditeurs), ils sont naturellement intéressés par la perception des instrumentistes et par les liens entre cette perception et les paramètres de construction des instruments d'une part et leurs propriétés acoustiques d'autre part, ce qui a été l'objet du chapitre précédent. Cependant, étudier la perception des auditeurs peut aussi s'avérer intéressant pour de multiples raisons.

Tout d'abord, des modèles physiques de synthèse sonore peuvent permettre de créer des instruments virtuels qui diffèrent de manière très contrôlée (ce qui serait impossible à réaliser avec de vrais instruments) et ainsi explorer l'influence de paramètres physiques sur les qualités sonores perçues (partie 4.1).

D'autre part, étant donnée la nature spatiale de la projection (partie 2.1.5), nous pouvons nous demander comment les instrumentistes sont capables de l'évaluer. Ils en reconnaissent d'ailleurs la difficulté, et un potentiel caractère trompeur comme nous l'avons déjà vu page 21. Par conséquent, mieux comprendre ce qu'est la projection passe par l'étude de l'évaluation de cette qualité par des auditeurs (en comparaison avec l'évaluation des musiciens) lors de tests d'écoute. La partie 4.2 expose les différences de projection entre des violons neufs et des violons anciens.

Par ailleurs, les évaluations des musiciens sont largement influencées par le confort de jeu (épaisseur du manche, courbure du chevalet, ...) et certains aspects de la réponse de l'instrument que le musicien peut évaluer en comparant ce qui « sort » de l'instrument par rapport à ce qu'il met en « entrée », ce qui complique la recherche de corrélations entre les mesures acoustiques (qui n'incluent pas ces aspects) et les qualités évaluées par les musiciens. Ainsi, rechercher des corrélations avec les propriétés sonores telle qu'évaluées par les auditeurs est une piste pertinente à explorer. Des illustrations seront fournies avec les projet ObiAlto (partie 4.3) et Bilbao (partie 4.4).

De plus, des tests d'écoute (en aveugle) peuvent s'avérer intéressants aussi pour s'affranchir des biais visuels lorsque les instruments sont trop différents pour ne pas être reconnus, même en aveugle. Le cas de violons expérimentaux en matériaux composites est présenté à la partie 4.5.

Enfin, l'évaluation de modifications (changement de cordes, modification du chevalet ou de l'âme, ...) sur un violon donné est difficile lors d'un test de jeu, en raison du temps nécessaire pour effectuer ces modifications de manière contrôlée et l'impossibilité de comparer rapidement deux états (ou plus). Des enregistrements sonores de l'instrument dans divers états peuvent alors permettre d'explorer les différences de sonorité induites par ces modifications. Le test d'écoute qui fait le pendant du test de jeu impliquant une modification de la longueur de l'âme (partie 3.6) est ainsi présenté à la partie 4.6.

4.1 Violons virtuels . . . . .	44
4.1.1 Seuils de détection de modifications acoustiques . . . . .	45
4.1.2 Vibrato et amortissement des modes de résonance . . . . .	47
4.1.3 Influence de l'amplitude des modes de résonance . . . . .	47
4.1.4 Discussion . . . . .	48
4.2 Suprématie des Stradivarius à l'écoute: préférence et projection . .	48
4.2.1 Méthodologie . . . . .	48
4.2.2 Résultats . . . . .	49
4.3 Le projet ObiAlto . . . . .	50
4.4 Qualités sonores des instruments du projet Bilbao . . . . .	51
4.4.1 Evaluation des triades . . . . .	51
4.4.2 Evaluation de chaque violon séparément . . . . .	52
4.5 Evaluation de violons en matériaux composites . . . . .	54
4.6 Influence de la longueur de l'âme	55
4.7 Conclusion . . . . .	56

Comme au chapitre précédent, les études présentées ici ont été choisies pour offrir un panorama varié, tant en termes de problématiques que de méthodologies.

## 4.1 Violons virtuels

Durant mon post-doctorat à l'Université de Cambridge, j'ai développé la méthodologie des violons virtuels pour chercher des corrélations entre des attributs acoustiques de violons et les jugements des auditeurs sur la qualité sonore de ces violons [34, 95, 96]. En pratique, l'expérimentation a été mise en place en exploitant le fait que la vibration des cordes d'un violon et le son qui est rayonné par la caisse de ce violon peuvent être traités, en première approximation, de manière indépendante. Ainsi, comme l'illustre la figure 4.1, d'une part la vibration des cordes produites par des musiciens experts est enregistrée, grâce à des capteurs piézo-électriques placés sur le chevalet d'un violon instrumenté, et d'autre part la réponse acoustique du violon qu'on veut synthétiser est simulée par un filtre numérique obtenu par mesure de l'admittance (ou mobilité, à savoir vitesse sur force) au chevalet de ce violon. Le signal sonore de sortie est alors généré en filtrant le signal d'entrée, correspondant à la force exercée par la corde frottée sur le chevalet, par la réponse du violon.

[95] FRITZ et al. (2007), « Perceptual thresholds for detecting modifications applied to the acoustical properties of a violin »

[96] FRITZ et al. (2010), « Perceptual studies of violin body damping and vibrato »

[34] FRITZ et al. (2012), « Exploring violin sound quality : Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties »

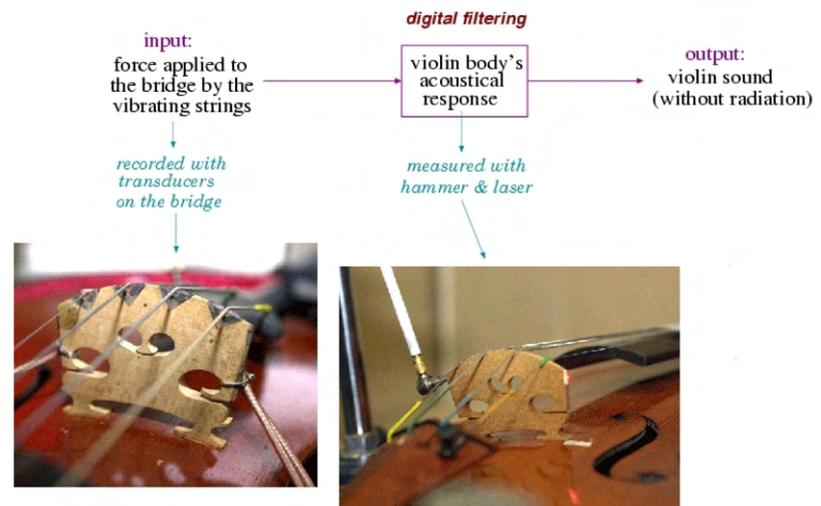


FIGURE 4.1 – Principe des violons virtuels.

Cette méthode dite des « violons virtuels » offre deux avantages principaux. Tout d'abord, il est facile, une fois la réponse acoustique du violon mise sous forme de filtre numérique, de faire des modifications très contrôlées qu'il serait impossible de réaliser par des modifications physiques sur un vrai violon, ce qui permet de créer une déclinaison de violons virtuels, dont les différences sont parfaitement connues et maîtrisées. D'autre part, le signal d'excitation est également contrôlé de manière précise ce qui permet de s'affranchir de la non-répétabilité et de l'adaptation du musicien, et de s'assurer que les différences sonores ne sont imputables qu'aux différences d'ordre acoustique entre les violons (et non à des différences de jeu du musicien).

### 4.1.1 Seuils de détection de modifications acoustiques

**Contexte** La problématique principale des luthiers est de comprendre comment le son est modifié par un changement de paramètres de lutherie (cf par exemple le projet Bilbao, partie 3.3). Nous abordons cette question ici de manière modeste, en rajoutant un intermédiaire : la modification de paramètres de lutherie implique des modifications acoustiques de la réponse en fréquence mécanique (l'admittance/mobilité au chevalet) d'un violon, qui à leur tour impliquent des modifications du son résultant. Sachant que l'influence des paramètres de constructions sur les propriétés acoustiques du violon a déjà été l'objet de nombreuses études (par exemple [97-99]), ce qui nous intéresse est l'influence de modifications acoustiques sur la perception d'un auditeur.

**Modifications acoustiques étudiées** Nous nous sommes limités dans cette première étude à la détermination des seuils de détection d'une modification en amplitude et en fréquence de différents modes de l'admittance au chevalet.

A basses fréquences, le son du violon est dominé par trois modes qui rayonnent beaucoup, et qui, selon plusieurs auteurs, seraient importants pour la qualité sonore (par ex [100]). A0 est une résonance de Helmholtz modifiée ("air mode"), qui se trouve généralement vers 280 Hz. Les deux autres sont des modes de table ("plate modes"), dus principalement à la flexion et l'étirement de la table et du fond : B1- est généralement situé entre 470 et 490 Hz tandis que B1+ se trouve entre 530 et 570 Hz.

A partir de la mesure d'admittances d'un large corpus de violons, qui avaient été classifiés au préalable dans des groupes de qualité très bonne ou modérée (sur la base de leur qualité de facture et leur prix), Dünwald [12] a proposé quatre bandes de fréquence qui seraient importantes, d'après lui (mais sans confirmation par des tests perceptifs) pour l'évaluation de qualité sonore : 190–650, 650–1300, 1300–4200, et 4200–6400 Hz. La première bande inclut les harmoniques graves et pourrait être reliée à la *richesse* tandis qu'il associe la seconde à la *nasalité*, la troisième à la *brillance* et la quatrième à la *clarté*.

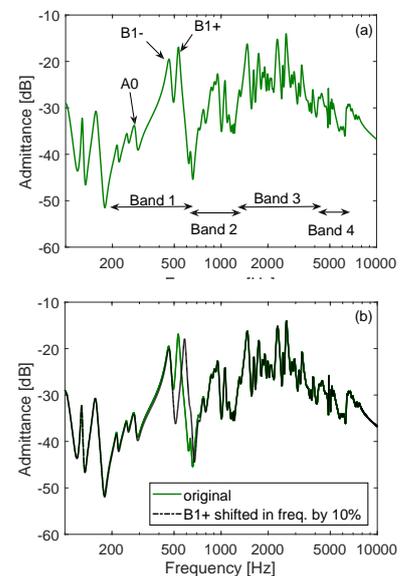
Nous avons mesuré les seuils de détection pour une modification, en amplitude ou en fréquence, de chacun des trois modes ainsi que de tous les modes dans chacune des quatre bandes. Ces trois modes et quatre bandes ainsi qu'un exemple de modification en fréquence du mode B1+ sont représentés à la figure 4.2 (respectivement (a) et (b)).

En pratique, les modifications ont été mises en œuvre de la manière suivante. Une admittance au chevalet calibrée a été mesurée sur un violon fabriqué par le luthier anglais David Rubio puis traitée par des techniques d'identification modale [101] et resynthétisée à partir des paramètres modaux identifiés jusqu'à 7000 Hz, permettant ainsi une modification paramétrique. Ainsi, la réponse en fréquence pouvait être modifiée par la manipulation des paramètres modaux (amplitude et fréquence) des 54 modes nécessaires pour couvrir la gamme de fréquence de 196 Hz (la note la plus basse du violon) à 7000 Hz puis utilisée pour construire un filtre numérique à réponse impulsionnelle finie (FIR) afin d'obtenir le « son » de violons modifiés virtuels.

- [97] CREMER (1985), *The Physics of the Violin*  
 [98] DURUP et al. (2005), « The quest of the violin bridge-hill »  
 [99] GOUGH (2015), « A violin shell model : Vibrational modes and Acoustics »

- [100] HUTCHINS (1962), « The Physics of Violins »

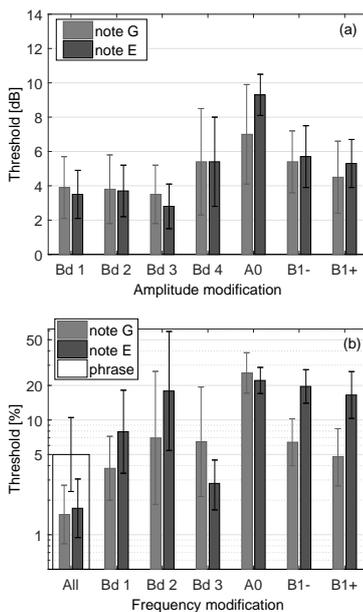
- [12] DÜNNWALD (1991), « Deduction of objective quality parameters on old and new violins »



**FIGURE 4.2** – (a) Admittance resynthétisée du violon de Rubio, avec les trois modes et les bandes de Dünwald qui ont été modifiés; (b) exemple de modification d'un mode : la fréquence du mode B1+ de l'admittance originelle (trait plein) est augmentée de 14% (en pointillés).

- [101] EWINS (2000), *Modal Testing : Theory, Practice and Application*

[95] FRITZ et al. (2007), « Perceptual thresholds for detecting modifications applied to the acoustical properties of a violin »



**FIGURE 4.3** – Seuils moyens de détection d'une modification en amplitude, exprimés en decibels (a) et en fréquence, exprimés en pourcentage de la fréquence centrale et représentés sur une échelle logarithmique (b). Les barres claires et foncées correspondent respectivement aux notes sol et mi, et la barre large blanche correspond à une phrase musicale. Les barres d'erreur représentent  $\pm 1$  écart type.

[102] WATSON (1987), « Uncertainty, informational masking, and the capacity of immediate auditory memory »

[103] SCHLESKE (1996), « On making "tonal copies" of a violin »

**Signal d'excitation** Des phrases musicales et des notes isolées ont été testées dans un test préliminaire, qui a montré un seuil de détection plus bas pour tous les auditeurs pour les notes isolées que pour les phrases. Comme notre but était d'établir les seuils de discrimination les plus bas qui puissent être obtenus dans des conditions optimales, nous avons décidé d'utiliser deux notes isolées : le sol 2 (G3) à 196 Hz, et le mi 3 (E4) à 330 Hz. Le choix de ces deux notes résulte de la distribution de leurs harmoniques. En particulier, le sol 2 a ses second et troisième harmoniques proches des fréquences des modes B1- et B1+, alors que le mi 3 n'a aucun harmonique près de ces modes. Notre hypothèse était que la discrimination était moins bonne dans le cas du mi. La durée des notes isolées a été choisie relativement courte (300 ms) pour des raisons de mémoire échoïque. De plus, avec des notes si courtes, il est difficile de percevoir la technique d'archet, ce qui en réduit son influence.

**Méthodologie** Une méthodologie adaptative classique à choix forcé a été utilisée : trois stimuli sont présentés, deux correspondant au son de référence (admittance non modifiée), un correspondant à une admittance modifiée. Les auditeurs doivent désigner lequel des trois sons est différent. Le test commence avec une grande différence, et au fur et à mesure des bonnes réponses (trois d'affilée), la différence s'amenuise. Une mauvaise réponse fait en revanche augmenter la différence. Le test s'arrête automatiquement après un certains nombres d'oscillations (huit) autour d'une valeur qui est alors considérée comme le seuil de détection.

**Résultats** Les seuils de détection obtenus pour 36 participants musiciens sont présentés à la figure 4.3, extraite de [95]. (Un groupe de 18 non musiciens avait également participé et obtenu des seuils bien plus élevés).

Les seuils de modification en amplitude sont relativement élevés, et encore plus pour les modes (entre 4 et 9 dB) que pour les bandes (3-4 dB). Il y a globalement assez peu de différence entre le sol et le mi. Cette différence est en revanche assez importante pour les seuils de modification en fréquence, pour lesquels, en moyenne, les seuils sont bien plus faibles pour le sol que pour le mi. Ils restent cependant élevés, même pour les bandes, entre 4 et 20%, voire indétectables dans le cas de la quatrième bande. Seul le cas d'un déplacement en fréquence de tous les modes (ce qui reviendrait à faire un violon un peu plus petit ou plus grand) conduit à un seuil faible de 1.5%, ce qui correspond à un demi-ton. Dans ce dernier cas, une courte phrase musicale a également été utilisée et conduit à un seuil bien plus élevé que pour les notes isolées (5%). Même si ce résultat peut au premier abord sembler contre-intuitif puisqu'une phrase offre plus d'éléments sur lesquels se baser pour entendre une différence, ce résultat est cohérent avec le phénomène de masquage informationnel : il est plus difficile de détecter un changement subtil dans un son lorsque le son lui-même varie beaucoup [102].

Cette étude apporte des informations pour les luthiers, en particulier ceux qui font des copies tonales [103], en termes de la précision à atteindre lors de l'accord des modes. Il s'avère que, toute chose égale par ailleurs (ce qui n'est en pratique jamais le cas dans la vraie vie), l'amplitude et

la fréquence des modes peuvent être modifiées de manière bien plus importante que ne pouvaient le penser les luthiers sans affecter beaucoup le son.

#### 4.1.2 Vibrato et amortissement des modes de résonance

Dans un deuxième temps, ces violons virtuels ont été utilisés pour explorer comment la perception du son d'un violon est influencée par le vibrato utilisé par le musicien et l'amortissement des modes de résonance du violon. Dans le cas du violon, le vibrato correspond à une modulation de la fréquence fondamentale grâce au mouvement du doigt (main gauche) sur la corde. La réponse acoustique du violon (admittance au chevalet), qui agit comme un filtre sur le signal de corde, transforme alors cette modulation de fréquence en modulation d'amplitude des différents harmoniques. Cette modulation spectrale complexe est importante pour la perception du timbre. La réponse acoustique d'un violon est ainsi supposée comme l'un des facteurs clé de la perception des musiciens du caractère réactif et vivant de ce violon. Ceci a été testé en créant des violons virtuels dont la réponse est soit plus lissée soit plus erratique que la réponse d'un violon réel, en diminuant ou en augmentant les facteurs de qualité des modes de résonance (le cas d'une division par 2 est illustré à la figure 4.4). Nous avons également modifié l'amplitude du vibrato du signal d'entrée et nous avons réalisé différents test d'écoute. Les résultats [96] montrent que si la réponse d'un violon est trop « plate », il n'est pas possible de compenser en rajoutant du vibrato. Par ailleurs, il existe une valeur optimale des facteurs de qualité, qui est proche de celle des violons réels : si les facteurs de qualité sont trop faibles, le violon n'est pas assez vivant, s'ils sont trop élevés, le violon est très vivant mais également très inégal d'une note à l'autre.

#### 4.1.3 Influence de l'amplitude des modes de résonance

Enfin, ces violons virtuels ont aussi été utilisés pour explorer et quantifier (au-delà des seuils de détection) l'effet perceptif de modifications acoustiques telles qu'un changement d'amplitude des modes de résonance dans cinq bandes d'octave (190-380, 380-760, 760-1520, 1520-3040 et 3040-6080 Hz), sur 14 participants violonistes anglophones [34]. Une augmentation de la « *brightness* » (*brillance*) et de la « *clarity* » (*clarté*) est associée avec une augmentation modérée de l'amplitude des modes dans les bandes 4 et 5, alors qu'une augmentation de la « *harshness* » (*dureté/âpreté*) est associée avec une forte augmentation dans la bande 4. Les jugements diffèrent suivant les participants (2 groupes) pour « *nasal* » (*nasal*) et « *good* » (*bon*). Ces résultats viennent infirmer en grande partie les hypothèses de Dünwald [12], seules hypothèses qui existaient jusqu'alors, mais sans qu'elles aient été testées perceptivement.

Afin d'étudier l'influence de la langue, la même étude a été réalisée dans le cadre du stage ATIAM d'Antonio Cardenas sur 14 participants français en utilisant les traductions données ci-dessus (*brillance*, *clarté*, *dureté/âpreté*, *nasal* et *bon*). Les résultats obtenus sont extrêmement similaires, même pour « *nasal* » (pour lequel 2 groupes sont obtenus également) alors que nous aurions pu penser que la notion de nasalité serait assez différente

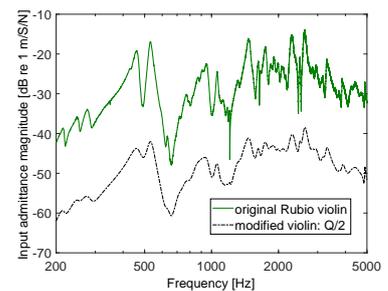


FIGURE 4.4 – L'admittance au chevalet du violon de Rubio (trait plein) et une version modifiée dans laquelle tous les facteurs de qualité ont été divisés par deux (en pointillés). La courbe modifiée est décalée de 20 dB vers le bas pour une question de lisibilité.

[96] FRITZ et al. (2010), « Perceptual studies of violin body damping and vibrato »

[34] FRITZ et al. (2012), « Exploring violin sound quality : Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties »

[12] DÜNNWALD (1991), « Deduction of objective quality parameters on old and new violins »

entre les deux langues. Afin de comprendre la différence de perception entre ces deux groupes, l'étude a été complétée par une analyse linguistique des définitions de la nasalité d'un violon proposées par les participants : un groupe associe la nasalité au timbre d'une voix nasale et pincée et/ou bien au timbre d'un instrument comme la cornemuse, ce qui correspond à des sons riches en harmoniques élevées ; le deuxième groupe associe la nasalité, de manière moins consensuelle que le premier groupe, soit à une voyelle nasale (« on » ou « an ») soit à un son filtré passe-bas, c'est-à-dire pauvre en harmoniques aiguës [104].

[104] CARDENAS (2009), « Corrélation entre les propriétés acoustiques et perceptives du violon »

#### 4.1.4 Discussion

Les avantages de cette méthodologie des violons virtuels ont clairement été mis en évidence dans les exemples ci-dessus, qui ont permis d'établir des résultats intéressants pour les luthiers. Cela donne ainsi des ordres de grandeur pour les luthiers qui s'intéressent à faire des « copies sonores » d'instruments réputés en essayant d'obtenir la même réponse acoustique. Cela a également permis d'apporter des réponses perceptives aux hypothèses de Dünwald, largement citées dans la communauté des luthiers.

Cependant, cette méthodologie produit des sons synthétisés qui restent artificiels et peuvent être éloignés des sons réels. Les utiliser pour explorer, à partir de la mesure de l'admittance au chevalet d'un groupe d'instruments, des différences de qualité (plus fines que des seuils de détection ou des modifications grossières par bande de fréquences), pourrait conduire à des extrapolations (des sons de synthèses aux violons réels) peu pertinentes. Cependant, dans le cas où les instruments considérés partagent des paramètres de construction similaires et ne diffèrent que sur des aspects bien contrôlés, comme c'est le cas pour les violons du projet Bilbao, la méthodologie peut s'avérer intéressante pour rechercher quels paramètres acoustiques sont à l'origine des différences perçues, ce qui sera discuté à la partie ??.

## 4.2 Suprématie des Stradivarius à l'écoute : préférence et projection

### 4.2.1 Méthodologie

Comme expliqué dans l'introduction de ce chapitre, il existe une qualité sonore du violon qui est difficile à juger par les instrumentistes, alors qu'elle est fondamentale pour les solistes : il s'agit de la *projection*, dont nous avons déjà parlé dans le chapitre 2 (parties 2.1.5 et 2.3.2). Peut-être en raison de cette difficulté à juger, les croyances sur cette propriété sont nombreuses et en particulier en ce qui concerne les vieux violons italiens qui sont réputés pour ne pas sonner fort sous l'oreille mais avoir une projection exceptionnelle, bien supérieure à leurs homologues récents (voir les citations des instrumentistes renommés Steven Isserlis et Frank Almond page 21). Nous avons donc décidé de tester ces croyances, ce qui nécessitait des auditeurs, mais aussi un orchestre. A Paris, l'étude a

eu lieu dans la même salle de concert que pour les tests de jeu, à savoir l'auditorium de Vincennes.

Deux solistes ont joué des extraits de 10 à 30 secondes sur diverses paires de violons, toutes constituées d'un violon neuf et d'un Stradivarius, en solo ou avec un accompagnement orchestral. Les auditeurs, environ une cinquantaine, aux oreilles expertes (luthiers, musiciens, audiophiles, ...), devaient juger la projection relative des violons au sein de chaque paire, en solo puis avec orchestre. Nous savions d'avance que si les neufs l'emportaient, nos détracteurs nous attaquaient sur le fait qu'il était possible que les violons neufs sonnaient forts mais n'avaient pas un beau son. Nous ne pouvions cependant pas demander aux auditeurs de répondre à plus d'une question en raison de la charge cognitive déjà importante. Nous avons donc refait l'expérience dans des conditions très similaires, à New York (figure 4.5, extraite du photo-reportage réalisé par le photographe Hubert Raguet pour le Journal du CNRS <sup>1</sup>), où cette fois l'audience était suffisamment grande (environ 80 personnes) pour être divisée en deux groupes qui répondaient à des questions différentes. Ainsi lorsque les uns jugeaient de la projection, les autres se prononçaient sur quel violon ils préféraient.



FIGURE 4.5 – Test d'écoute comparative de trois Stradivarius et trois violons neufs à New York. Crédit : Hubert Raguet.

1: La fin d'un mythe?  
<https://lejournal.cnrs.fr/diaporamas/stradivarius-la-fin-dun-mythe>

## 4.2.2 Résultats

Les violons neufs ont été significativement considérés comme plus projetant, aussi bien à Paris qu'à New York. Par ailleurs, ils ont été préférés en moyenne (cf figure 4.6, extraite de [72] ), même si aucune corrélation entre préférence et projection n'a été trouvée à l'échelle individuelle.

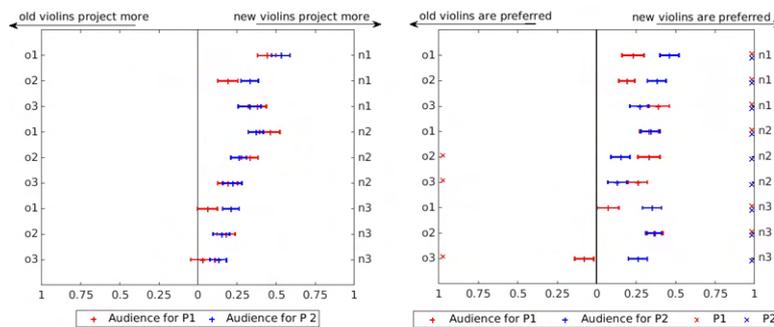


FIGURE 4.6 – Projection relative (à gauche) et préférence (à droite) pour chacune des neuf paires neuf (n1, n2 & n3) / ancien (o1, o2 & o3) testées à New York. Les notes moyennes des auditeurs, pour chacun des instrumentistes (P1 en rouge, P2 en bleu) sont représentées sur une échelle continue de 0 à 1. Les barres d'erreur correspondent à l'erreur-type de la moyenne. Les deux instrumentistes devaient juste dire pour chaque paire s'ils préféraient le violon A (croix sur l'axe  $x=-1$ ), le violon B (croix sur l'axe  $x=1$ ) ou bien ni l'un ni l'autre (croix sur l'axe vertical  $x=0$ ).

De surcroît, la projection des violons de Paris telle qu'évaluée par les auditeurs correspond bien au volume sonore tel qu'évalué par les musiciens lors des tests de jeu individuels, et donc nos observations ne viennent pas étayer les croyances qu'il existerait des violons qui sonnent peu fort sous l'oreille mais qui projettent beaucoup.

Enfin, les auditeurs ne sont pas non plus arrivés mieux que la chance à reconnaître les violons neufs des violons anciens (44% de réponses correctes !)

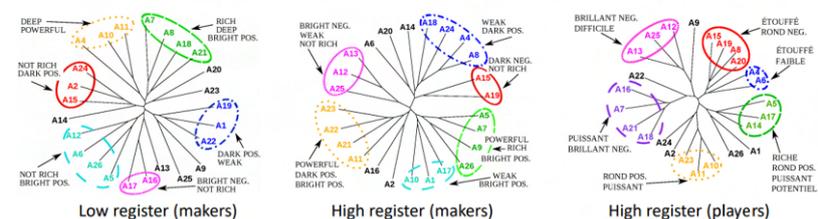
[72] FRITZ et al. (2017), « Listener evaluations of new and Old Italian violins »

### 4.3 Le projet ObiAlto

Alors que le contour géométrique ne diffère que peu entre les violons, il peut varier énormément entre les altos qui sont beaucoup moins standardisés. Durant un atelier de lutherie à Oberlin (aux Etats-Unis), un groupe de luthiers a travaillé ensemble sur un modèle d'alto. 25 altos ont alors été fabriqués sur ce modèle durant l'année qui suivait et ont été rapportés à l'atelier suivant, pendant lequel j'ai pu procéder à une séance d'enregistrement d'une altiste professionnelle jouant deux extraits courts (un dans le registre grave, l'autre dans le registre aigu) sur chaque alto. J'ai ensuite créé deux tests d'écoute (un pour chaque registre) de catégorisation libre, c'est-à-dire que les participants devaient grouper les alti par similarité. Comme nous l'avons déjà vu dans les parties 3.2 et 3.3.4, c'est une tâche qui respecte le fonctionnement catégoriel de la perception et qui n'impose aucun a priori de l'expérimentateur. Nous espérons qu'elle mette en lumière des points communs à certains altos que nous pourrions mettre en relation avec leurs paramètres de facture. Malheureusement, cela n'a pas été le cas. D'une part, l'analyse statistique des données de catégorisation a conduit à des arbres très radiaux (figure 4.7), ne faisant pas apparaître de groupes clairement définis. Cette large variabilité interindividuelle est due ici à la complexité de la tâche mais aussi à la grande diversité des critères d'évaluation des auditeurs. Cependant, nous avons pu trouver quelques attributs perceptifs pour certains des groupes sur lesquels les participants étaient dans l'ensemble d'accord [105]. Ces attributs sont visibles sur la figure 4.7.

[105] FRITZ et al. (2019), « The ObiAlto project : Looking for correlations between perceptual properties and constructional data »

FIGURE 4.7 – Arbres hiérarchiques obtenus pour les deux tests (registres grave et aigu) pour les participants luthiers et pour le test dans le registre aigu pour les participants altistes, avec les attributs perceptifs qui ont été identifiés pour certains groupes.



D'autre part, aucune relation n'a été trouvée entre ces groupes et ces attributs ni avec aucun des descripteurs audio disponibles dans des toolbox comme Timbre [106] ou MIR [107] (centre de gravité spectrale, tristimuli, ...), ni avec des paramètres de facture. Ceci montre que la multiplicité des paramètres lors de la construction d'un instrument permet aux luthiers d'obtenir certaines propriétés perceptives avec des stratégies qui peuvent être très différentes.

[106] PEETERS et al. (2011), « The Timbre Toolbox : extracting audio descriptors from musical signals »

[107] LARTILLOT et al. (2007), « A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio »

La complexité de la tâche et la possibilité de stratégies qui pourraient se compenser au cours de la construction sont dues à deux facteurs : le grand nombre d'instruments et le faible nombre de contraintes imposées aux luthiers (uniquement le patron et le modèle de cordes). Mais le premier facteur résulte d'un choix délibéré. En effet, nous avons espéré qu'un grand nombre d'altos offrant une grande plage de variations de divers paramètres pourrait permettre justement d'établir des liens qu'on ne pourrait pas obtenir avec seulement cinq ou six instruments. En ce qui concerne le second facteur, je n'ai pu le contrôler, n'ayant pas été impliquée dans le projet lors de l'étape de fabrication. Mais cela a pu être le cas dans le projet Bilbao, dont je vais maintenant détailler les tests d'écoute qui ont été réalisés en complément des tests de jeu présentés à la partie 3.3.4.

## 4.4 Qualités sonores des instruments du projet Bilbao

Au-delà des préférences des musiciens et de l'influence du confort et de la jouabilité sur l'évaluation des instruments par des instrumentistes, nous avons voulu explorer si les violons du projet, et en particulier les six violons BELE, avaient des propriétés de timbre bien distinctes. En conséquence, un test d'écoute a été réalisé dans l'auditorium du conservatoire de Bilbao, avec environ quatre vingt participants. Il était divisé en trois parties :

- comparaisons des violons BELE par paires, sous le format ABAB
- comparaisons de deux triades de violons BELE, format ABCABC
- jeu des 13 violons successivement, dans un ordre aléatoire, par un soliste, puis dans un autre ordre par un deuxième soliste.

### 4.4.1 Evaluation des triades

Dans le cas des triades, les auditeurs devaient choisir les deux violons parmi les trois qui étaient le plus similaires, et les deux qui étaient les plus différents. Deux triades ont été testées : V1 (fond épais) – V4 (table épaisse) – V11 (medium-medium) et V5 (medium-medium) – V11 (medium-medium) – V13 (fond fin). Pour la première triade, l'hypothèse d'une distribution équiprobable dans le cas du choix des violons les plus similaires peut être rejetée et les résultats sont représentés à la figure 4.8. On peut y voir que le nombre de fois que les paires V5-V11 et V5-V13



FIGURE 4.8 – Répartition des réponses entre les trois paires possibles pour la triade V5-V11-V13, avec à gauche les paires correspondant aux violons qui ont été perçus les plus similaires et à droites celles correspondant aux violons perçus comme les plus différents. Le code couleur est le même qu'à la figure 3.14.

ont été choisies comme étant les plus similaires est en parfaite cohérence avec une possible répartition des auditeurs en deux sous-groupes, à l'image des sous-groupes de participants instrumentistes 1 et 2 identifiés pour la tâche de catégorisation libre (cf partie 3.3.4). L'interprétation du camembert de droite se fait également en cohérence avec les résultats du test de catégorisation libre : V11 et V13 ont été le plus considérés comme dissimilaires, en cohérence avec le fait qu'ils sont éloignés dans les arbres des deux sous-groupes, suivis par la paire V5-V13, qui n'étaient éloignés que dans l'arbre du sous-groupe 1.

En revanche, pour la deuxième triade, l'hypothèse nulle d'une répartition équiprobable entre les trois paires possibles ne peut être rejetée, ni pour la question des violons les plus similaires, ni pour la question des violons les plus dissimilaires. Ceci est assez surprenant, car au vu des données obtenues avec la troisième partie du test (évaluation de chaque violon séparément, voir ci-dessous), nous aurions pu penser que V1 et V4

seraient considérés comme plus similaires, V11 étant bien préféré aux deux autres. La difficulté de la tâche combinée à une adaptation du musicien peut certainement expliquer ces résultats non significatifs.

#### 4.4.2 Evaluation de chaque violon séparément

Soixante douze auditeurs avertis (luthiers et musiciens) ont écrit des commentaires libres pour chacun des treize violons, joués par deux musiciens. Une classification sémantique des 2680 unités verbales ainsi récoltées a été réalisée dans le cadre du stage ATIAM de Víctor Salvador-Castrillo [108], en collaboration étroite avec des luthiers de nationalités différentes (mais parlant tous anglais). Chaque unité verbale a ainsi été associée à un micro-concept positif ou négatif d'un « key feature » au sein d'une « subcategory », elle-même au sein d'une catégorie (cf tableaux 4.1 et 4.2).

[108] SALVADOR-CASTRILLO (2021), « Correlations between construction parameters, vibro-acoustic characteristics and perceptual qualities of a pool of 13 violins »

**Tableau 4.1** – Architecture de la catégorisation sémantique des unités verbales, du plus haut niveau à gauche (catégories) au plus bas niveau à droite (« key features »).

Category	Subcategory	Key feature
Timbre	Luminance	Brightness
		Darkness
	Mass	Richness
		Depth
	Texture	Roundness
		Non nasality
		Sweetness
Warmth		
Intensity (volume)	Power/Resonance	Power Resonance
	Projection/Spatial	Projection/Spatial
Playability	Response	Response
		Resistance
		Dynamics
	Purity	Clarity Cleanliness
Interest	Interest	Interest
	Emotion/Expressivity	Emotion/Expressivity
Balance	Balance	Balance

**Tableau 4.2** – Classification des unités verbales relatives aux « key features » *brightness*, *sweetness* et *warmth*.

Key feature	Positive microconcepts	Negative microconcepts
<b>Brightness</b>	Bright [sound/tone], shimmering, with shimmer, shining, silvery, balanced in brightness	Not bright, lacks brightness, opaque, matt, only high frequencies
<b>Sweetness</b>	[Very] sweet, not harsh	Lacks sweetness, sharp, shrill, metallic, dry, hard, aggressive, bitter, harsh [in forte/with bow speed/passage between strings/in attack]
<b>Warmth</b>	Warm	Not warm enough, lacks warmth, cold

[109] WALLMARK (2019), « A corpus analysis of timbre semantics in orchestration treatises »

Nous inspirant de la méthodologie proposée dans [109], nous avons calculé une valorisation pour chaque violon  $i$  et pour chaque catégorie (ou sous-catégorie ou « key feature »)  $k$  de la manière suivante :

$$v_i^k = \frac{n_{i+}^k - n_{i-}^k}{N_i}$$

où  $n_{i+}^k$  est le nombre total de commentaires positifs (pour le violon  $i$

dans la catégorie  $k$ ) et de manière similaire  $n_{i-}^k$  est le nombre total de commentaires négatifs.  $N_i$  est le nombre total de commentaires pour le violon  $i$  sur l'ensemble des catégories considérées pour cette analyse. Elle peut ainsi se faire à différents niveaux de catégorisation : par exemple les 5 catégories, les 10 sous-catégories, les 19 « key features » ou bien également des sous-ensembles de cette partition.

Par ailleurs, pour certaines qualités, les auditeurs peuvent n'être sensibles qu'à la présence (ou l'absence de cette qualité). Ainsi, un auditeur notera qu'un violon est nasal, mais certainement pas qu'il n'est pas nasal. Pour cette raison, il est plus intéressant de considérer la déviation de la valorisation  $D_i^k$  par rapport à la valorisation moyenne  $\bar{v}^k$  sur les 13 violons :

$$D_i^k = v_i^k - \bar{v}^k, \text{ avec } \bar{v}^k = \frac{1}{13} \sum_i v_i^k$$

Cette méthode permet ainsi de compiler toutes les unités verbales en des descriptions perceptives pour chacun des treize instruments, à différents niveaux de catégorisation. Ces descriptions sont fournies de manière graphique à la figure 4.9 pour deux niveaux de catégorisation, pour les six instruments BELE.



FIGURE 4.9 – Déviations des valorisations pour les six violons BELE, lorsque sont prises en compte (pour chaque violon) : les trois catégories perceptives principales (80% des unités verbales) à gauche; les sous-catégories perceptives à droite.

Cette méthode permet d'éclairer, de manière assez fine, les différences perceptives entre les instruments, et pourquoi certains instruments ont

été plus ou moins appréciés par les auditeurs. Il apparaît nettement que les instruments réalisés avec une table ou un fond d'épaisseur trop fine ou trop épaisse ont été beaucoup moins aimés, à l'exception du violon 13 qui reste pour l'instant un mystère. Une autre conclusion est que par rapport aux standards actuels, une erreur d'épaisseur détériore moins les qualités sonores si elle rend la table ou le fond plus fin que si elle les rend plus épais, et que l'épaisseur de la table est plus cruciale que celle du fond.

Ce test d'écoute conduit plus clairement à des conclusions sur l'influence des épaisseurs sur les qualités sonores perçues par les auditeurs que le test de jeu de catégorisation libre ne le permet sur les qualités perçues par les violonistes. Plusieurs hypothèses peuvent être émises. En premier lieu, la méthodologie : alors que la tâche de catégorisation nous avait paru comme la plus pertinente au regard de la problématique, elle s'est avérée moins fructueuse que prévu. Les musiciens ont été assez avarés dans leurs descriptions des différents groupes et les grandes différences interindividuelles ont conduit à des arbres radiaux qui ne mettent pas en lumière de tendances. De surcroît, la tâche s'est avérée très difficile en raison de la multiplicité des paramètres. Ainsi, si C est similaire à A pour sa brillance dans l'aigu mais C est similaire à B en termes de puissance, l'instrumentiste peut hésiter longuement entre grouper C avec A ou bien C avec B. A l'opposé, alors que le test d'écoute a aussi semblé compliqué pour les auditeurs, leur nombre important et la méthodologie d'analyse utilisée ont permis de moyennner d'assez grandes différences interindividuelles et de faire ressortir des tendances qui sont en accord à la fois avec nos hypothèses (à l'exception du violon 13) et à la fois avec les perceptions de toutes les participants impliqués dans le projet qui ont pu passer du temps sur les instruments finis, lorsqu'ils ont tous été rassemblés à Bilbao, juste avant les tests perceptifs.

## 4.5 Evaluation de violons en matériaux composites

[110] DAMODARAN et al. (2015), « An overview of fibre reinforced composites for musical instrument soundboards »



FIGURE 4.10 – Les prototypes de violon construits en cinq matériaux différents pour l'expérience. Seulement un des deux TwillC est présenté sur cette photo car les deux violons sont identiques visuellement. Crédit : Tim Duerinck.

[111] DUERINCK (2021), « Violin making with fiber-reinforced composites. An artistic and scientific research journey »

Alors que depuis plusieurs siècles le bois, et plus particulièrement l'épicéa, a été le matériau de prédilection pour les tables d'harmonie de violon, des instruments en fibre de carbone sont entrés sur le marché récemment. Des études ont montré que les matériaux composites pouvaient présenter certains avantages pour la fabrication d'instruments [110]. Cependant, aucune ne s'est intéressée à caractériser comment des violons fabriqués avec des composites différents seraient évalués par des auditeurs.

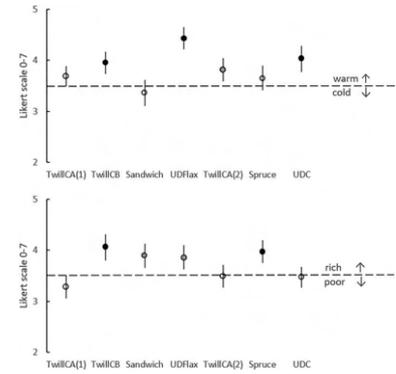
Six prototypes de violons (figure 4.10), différant uniquement par leur table d'harmonie, ont été construits par Tim Duerinck (durant son doctorat à l'Université de Gand [111]) dans un environnement contrôlé en laboratoire. Les matériaux utilisés pour la table sont les suivants :

- UDFlax : unidirectional flax fiber reinforced polymer,
- UDC : unidirectional carbon fiber reinforced polymer (CFRP),
- TwillC : laminate of twill woven and unidirectional carbon fiber reinforced polymer ; ce violon a été fait en double exemplaire pour tester la reproductibilité du processus de fabrication,

- Sandwich : sandwich structure consisting of CFRP skin and an aramid honeycomb core,
- épicea (*Picea abies*), qui sert de référence.

Le reste (fond, éclisse, manche) a été fait en une seule pièce en CFRP.

Ces six violons ont été jugés par des auditeurs expérimentés, dans deux tests en aveugle auxquels j'ai été associée, notamment pour leur analyse et la recherche de corrélation avec des mesures acoustiques réalisées dans la chambre anéchoïque de l'Institut d'Alembert. Contrastant avec l'opinion populaire qu'il manque aux violons fabriqués à partir de carbone certaines propriétés sonores (en particulier la chaleur et la richesse), l'étude montre un aperçu de la diversité de timbres que des violons en polymères renforcés par des fibres peuvent offrir. Elle permet d'explorer les liens entre perception et propriétés des matériaux des tables d'harmonie, comme l'illustre la figure 4.11. De plus, comme ni les musiciens ni les auditeurs n'étaient familiarisés avec ces instruments, les résultats offrent un point de vue sur quel type de qualités sont préférés par des auditeurs pour des instruments qui ressemblent à des violons [112].



**FIGURE 4.11** – Notes moyennes attribuées à chacun des violons par ordre de présentation (TwillCA a été présenté deux fois) pour les échelles *warm-cold* en haut et *rich-poor* en bas. Les points noirs correspondent à des déviations statistiquement significatives ( $p < 0.05$ ). Les barres d'erreur correspondent à  $\pm 1$  erreur-type de la moyenne. [112]

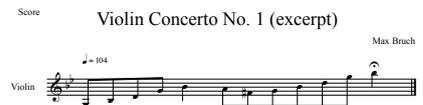
[112] DUERINCK et al. (2020), « Listener evaluations of violins made from composites »

## 4.6 Influence de la longueur de l'âme

Le test de jeu mis en place et décrit à la partie 3.6 avait été assez difficile pour les participants, car il n'y avait pas moyen de comparer les divers états de manière rapide et les différences étaient subtiles. C'était de ce fait compliqué pour les musiciens de déterminer s'ils entendaient une différence parce qu'ils n'avaient pas joué de manière exactement identique ou parce que la longueur de l'âme avait été modifiée. Ceci peut être une des raisons du fort biais des participants envers une modification même si rien n'avait été modifié<sup>2</sup>. Par ailleurs, il s'est finalement avéré que la gamme de variation de la longueur de l'âme aurait dû être plus grande.

Pour pallier ces limitations, nous avons réalisé un test d'écoute basé sur des enregistrements d'un violoniste soliste jouant le même extrait musical (figure 4.12) plusieurs fois pour diverses longueurs d'âme. Les participants devaient ainsi écouter 16 paires d'enregistrements via une interface sur ordinateur et spécifier, pour chaque paire, si le réglage du violon était le même ou non pour les deux enregistrements. Les participants pouvaient réécouter chaque stimulus deux fois. Pour chaque paire, il y avait en fait trois possibilités : les enregistrements pouvaient correspondre à deux longueurs d'âme différentes, à deux prises pour la même longueur d'âme ou bien c'était deux fois exactement le même enregistrement. Le test permettait ainsi d'explorer l'influence de la longueur de l'âme, en regard des variations inévitables dans le jeu du musicien. Par ailleurs, des variations de longueur allant jusqu'à 0.26 mm ont été incluses dans le test. Les résultats montrent que la différence de longueur minimale pouvant être détectée au-dessus du seuil de chance est d'environ 0,20 mm, ce qui confirme les résultats du test de jeu, à savoir que ce seuil est bien au-dessus de ce que beaucoup de luthiers prétendent.

2: Il serait intéressant d'explorer davantage ce biais, au regard d'une anecdote assez courante chez les luthiers, qui serait de faire croire aux instrumentistes qui arrivent en panique avant un concert parce que leur instrument « ne marche plus » qu'ils vont régler le problème avec un ajustement de l'âme, et que les musiciens repartent ravis ... alors qu'ils n'ont en fait touché à rien!



**FIGURE 4.12** – Extrait musical enregistré pour le test d'écoute de discrimination de longueur d'âme.

## 4.7 Conclusion

Au-delà des résultats intéressants pour les luthiers qui ont été exposés dans ce chapitre, j'aimerais conclure, de manière assez similaire au chapitre précédent, en discutant de la difficulté à mettre en place des protocoles qui permettent de tester nos hypothèses et répondre aux questions que nous nous posons. Ainsi, la méthodologie des violons virtuels permet un contrôle parfait des modifications acoustiques et une assurance que les différences perçues sont bien dues à ce que l'on a voulu modifier, mais le côté artificiel des sons synthétisés nuit à l'extrapolation des résultats à ce qui se passe en réalité. À l'inverse, les tests d'écoute *live* permettent une plus grande validité écologique, mais il est impossible de contrôler l'influence du musicien. Alors que le format A-B-A-B nous semble le plus adapté pour comparer des paires d'instruments (afin d'entendre A après B mais aussi B après A), en réalité, les auditeurs pouvaient parfois entendre A-B-A'-B', voire dans le pire des cas A-B-C-D. Devaient-ils alors répondre sur A-B ou bien C-D?

Par ailleurs, les instruments testés sont toujours considérés comme (très) différents en amont du test, lorsque l'équipe de travail (dans laquelle il y a toujours au moins un luthier et un musicien) discute des instruments, sans être en aveugle, en étant proches et alors que le musicien peut illustrer, en temps réel, ce qu'il explique verbalement. Et pourtant, nous sommes souvent surpris par la subtilité des différences entendues lors du test. Une conclusion un brin provocatrice serait donc que rien ne ressemble plus à un violon qu'à un autre et que nous entendons beaucoup moins bien quand nous ne voyons pas! De fait, ceci a rendu certains protocoles moins pertinents que nous ne l'aurions pensé. Par exemple, alors que la tâche de catégorisation libre pour les enregistrements du projet *ObiAlto* nous avait paru la méthodologie la plus intéressante pour dégager des qualités perceptives en lien avec des paramètres de construction sans imposer d'*a priori* ni physique ni perceptif, les résultats viennent remettre en question ce choix, car ils se sont avérés bien moins informatifs que nous ne l'aurions espéré. Les participants ont en effet eu du mal à faire des groupes en raison des différences subtiles entre les altos et ont été très avarés dans leurs descriptions.

Enfin, les auditeurs ne sont pas plus d'accord que les instrumentistes, ce qui peut aussi diminuer les différences entre instruments lors du moyennage des évaluations.

Il n'est donc pas rare d'obtenir des résultats difficiles à interpréter, ce qui est aussi un résultat en soi, au vu de certaines croyances qui laisseraient supposer un accord parfait au sein de la communauté des luthiers et des musiciens. Ceci ne nous empêche cependant pas de continuer à progresser dans notre compréhension des liens entre perception et lutherie, même si l'analyse des données est parfois teintée de frustration!

# Bibliographie

Références par ordre de citation.

- [1] C. FRITZ et J. WOLFE. « How do clarinet players adjust the resonances of their vocal tracts for different playing effects? » *J. Acoust. Soc. Am.* 118 (2005), p. 3306-3315 (cf. p. iii).
- [2] J. WOODHOUSE, E.K.Y. MANUEL, L.A. SMITH, A.J.C. WHEBLE et C. FRITZ. « Perceptual thresholds for acoustical guitar models ». *Acustica - Acta Acustica* 98 (2012), p. 475-486 (cf. p. iii, 39).
- [3] R. VIALA, C. FRITZ, V. PLACET, E. FOLTETE et S. COGAN. « Substitution of spruce tonewood with composite materials tailored using numerical models : an application to archtop guitar ». In : *Int. Symp. on Musical Acoustics*. Detmold, Germany, 2019 (cf. p. iii, 39).
- [4] S. VAIEDELICH, C. FRITZ, E. LAMBERT et M. JANG. « Reconstitution par impression 3D d'une flûte de J Hotteterre dit le Romain : des fac-similés pour demain? » In : *Actes des Rencontres nationales : Recherches en musique*. Paris, France, 2020 (cf. p. iii).
- [5] L. CRETAGNE, C. Garcia ARMIJOS, F. MARMEL, R. LECONTE, C. FRITZ, J. MARCHAL, U. MUELLER, F. OLLIVIER et F. COULOUVRAT. « Design of a Sonic Boom Simulator in an Existing House for Ecologically Valid Perception Studies ». In : *Proc. of e-Forum Acusticum 2020*. Lyon, France, 2020 (cf. p. iii).
- [6] F. MARMEL, L. CRETAGNE, L.-T. THUONG, F. COULOUVRAT et C. FRITZ. « Impact of low sonic boom exposure on psychophysical and cognitive performance ». In : *Proc. of Acoustics in Focus, 180th Meeting of the Acoustical Society of America*. USA, 2021 (cf. p. iii).
- [7] C.M. HUTCHINS et V. BENADE. *Research Papers in Violin Acoustics 1975-1993 with an introduction essay 350 years of violin research - Volume 1*. Acoustical Society of America, 1997 (cf. p. 1).
- [8] J. WOODHOUSE. « The acoustics of the violin : a review ». *Rep. Prog. Phys* 77 (2014), p. 115901 (cf. p. 1).
- [9] E.V. JANSSON. « Tone characteristics of the violin ». *Swedish Journal of Music Research* 1 (1978), p. 83-105 (cf. p. 1).
- [10] A. GABRIELSSON et E. V. JANSSON. « Long-time-average-spectra and rated qualities of twenty-two violins ». *Acustica* 42 (1979), p. 47-55 (cf. p. 1).
- [11] C.M. HUTCHINS. « A measurable controlling factor in the tone and playing qualities of violins ». *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 1 (1989), p. 10-15 (cf. p. 1, 9).
- [12] H. DÜNNWALD. « Deduction of objective quality parameters on old and new violins ». *Catgut Acoust. Soc. J. series II* 1.7 (1991), p. 1-5 (cf. p. 1, 7, 9, 45, 47).
- [13] G. BISSINGER. « Structural acoustics of good and bad violins ». *J. Acoust. Soc. Am* 124 (2008), p. 1764-1773 (cf. p. 1, 25).
- [14] C. FRITZ, A. MUSLEWSKI et D. DUBOIS. « A situated and cognitive approach of violin quality ». In : *20th International Symposium on Music Acoustics*. Sydney, Australia, 2010 (cf. p. 1, 12).
- [15] J. J. GIBSON. *The ecological approach to visual perception*. Boston : Houghton Mifflin, 1979 (cf. p. 2).
- [16] C. GUASTAVINO, B. F.G. KATZ, J.-D. POLACK, D. J. LEVITIN et D. DUBOIS. « Ecological validity of soundscape reproduction ». *Acustica - Acta Acustica* 91 (2005), p. 333-341 (cf. p. 2).
- [17] C. FRITZ, G. STOPPANI, M. CURTIT, C. GOUGH et R. VIALA. « ASIM - Acoustics for string instrument makers : a yearly European training school ». In : *Proc. of e-Forum Acusticum 2020*. Lyon, France, 2020 (cf. p. 4).
- [18] G. WEINREICH. « What science knows about violins – and what it does not know ». *Am. J. Phys* 61 (1993), p. 1067-1077 (cf. p. 7).
- [19] S. McADAMS. « Musical timbre perception ». In : *The psychology of music. Third edition*. Sous la dir. de D. DEUTSCH. Academic Press, 2013, p. 35-67 (cf. p. 8).

- [20] K. SIEDENBURG, C. SAITIS, S. McADAMS, A. N. POPPER et R. R. FAY, éd. *Timbre : Acoustics, Perception, and Cognition*. Springer International Publishing, Switzerland, 2019 (cf. p. 8).
- [21] J. Stepanek A. MELKA et Z. OTCENASEK. « Czech and german verbal description of violin sound properties : Multidimensional analyses of survey data ». *Acustica - Acta Acustica* 82 Suppl.1 (1996), p. 214 (cf. p. 8).
- [22] W.L. MARTENS, C.A. MARASINGHE, C.N.W. GIRAGAMA et A.P. MADURAPPERUMA. « Topic-dependent adjective use in japanese and sinhala : Selection of adjectives differentiating guitar sounds ». In : *Proc. Seventh International Workshop on Human Interface Technology*. Aizu-Wakamatsu, Japan, 2000, p. 27-34 (cf. p. 8).
- [23] V. RIOUX et D. VÄSTFJÄLL. « Analyses of verbal descriptions of the sound quality of a flue organ pipe ». *Musicae Scientiae* 5 (2001), p. 55-82 (cf. p. 8).
- [24] R. FITZGERALD. « Performer-dependent dimensions of timbre : identifying acoustic cues for oboe tone discrimination ». Thèse de doct. University of Leeds, UK, 2003 (cf. p. 8).
- [25] A. C. DISLEY et D. M. HOWARD. « Timbral semantics and the pipe organ ». In : *Proc. 3rd Stockholm Music Acoust. Conf.* Stockholm, Sweden, 2003 (cf. p. 8).
- [26] C. TRAUBE. « An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar ». Thèse de doct. McGill University, Montreal, 2004 (cf. p. 8).
- [27] H. MEINL. « Regarding the sound quality of violins and a scientific basis for violin construction ». *J. Acoust. Soc. Am.* 29 (1957), p. 817-822 (cf. p. 8, 9).
- [28] M. SCHLESKE. « Empirical tools in contemporary violin making : Part I. Analysis of design, materials, varnish, and normal modes ». *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 4 (2002), p. 50-64 (cf. p. 9).
- [29] G. BISSINGER et F. GEARHART. « A standardized qualitative violin evaluation procedure ». *J. Catgut Acoust. Soc. (Series II)* 3 (1998), p. 44-45 (cf. p. 9).
- [30] R. INTA, J. SMITH et J. WOLFE. « Measurement of the effect on violins of ageing and playing ». *Acoust. Australia* 33 (2005), p. 25-29 (cf. p. 9).
- [31] J. ŠTĚPÁNEK et Z. OTCENÁŠEK. « Rustle as an attribute of timbre of stationary violin tones ». *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 3 (1999), p. 32-38 (cf. p. 9).
- [32] G. RUGG et P. McGEORGE. « The sorting techniques : a tutorial paper on card sorts, picture sorts and item sorts ». *Expert Sys.* 22 (2005), p. 94-107 (cf. p. 10).
- [33] W.G. CHARLES. « Contextual correlates of meaning ». *Appl. Psycholing.* 21 (2000), p. 505-524 (cf. p. 10).
- [34] C. FRITZ, A.F. BLACKWELL, I. CROSS, J. WOODHOUSE et B.C.J. MOORE. « Exploring violin sound quality : Investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties ». *J. Acoust. Soc. Am.* 131 (2012), p. 783-794 (cf. p. 11, 44, 47).
- [35] C. SAITIS. « Evaluating violin quality : player reliability and verbalization ». Thèse de doct. McGill University, Montreal, 2014 (cf. p. 12, 15).
- [36] C. SAITIS, C. FRITZ, C. GUASTAVINO, B.L. GIORDANO et G. P. SCAVONE. « Investigating consistency in verbal descriptions of violin preference by experienced players ». In : *Proc. of 12th Int. Conf. on Music Perception and Cognition*. Thessaloniki, Greece, 2012 (cf. p. 13).
- [37] C. SAITIS, C. FRITZ, G.P. SCAVONE, C. GUASTAVINO et D. DUBOIS. « Perceptual evaluation of violins : A psycholinguistic analysis of preference verbal descriptions by experienced musicians ». *J. Acoust. Soc. Am.* 141 (2017), p. 2746-2757 (cf. p. 13).
- [38] M. ZANONI, F. SETRAGNO et A. SARTI. « The violin ontology ». In : *Proc. of the 9th Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM14)*. Berlin, Germany, 2014 (cf. p. 13).
- [39] D. DUBOIS et C. FRITZ. « Projection du violon : analyse sémantique. » In : *Le Violon en France du XIXe siècle à nos jours*. Sous la dir. de C. FRITZ et S. MORALY. Paris, France : Sorbonne Université Presses, 2021 (cf. p. 14, 21).

- [40] C. SAITIS, B.L. GIORDANO, C. FRITZ et G. P. SCAVONE. « Perceptual evaluation of violins : A quantitative analysis of preference judgments by experienced players ». *J. Acoust. Soc. Am.* 132 (2012), p. 4002-4012 (cf. p. 15, 16).
- [41] C. SAITIS, G. P. SCAVONE, C. FRITZ et B.L. GIORDANO. « Effect of task constraints on the perceptual evaluation of violins ». *Acustica - Acta Acustica* 101 (2015), p. 382-393 (cf. p. 16, 21).
- [42] I. WOLLMAN. « Perception bimodale des violonistes en situation de jeu : influence des retours auditif et vibrotactile sur l'évaluation du violon ». Thèse de doct. Université Pierre et Marie Curie, Paris, 2014 (cf. p. 17).
- [43] A. CACLIN, S. SOTO-FARACO, A. KINGSTONE et C. SPENCE. « Tactile "capture" of audition ». *Perception and Psychophysics* 64 (2002), p. 616-630 (cf. p. 17).
- [44] J.-P. BRESCIANI et M. O. ERNST. « Signal reliability modulates auditory-tactile integration for event counting ». *NeuroReport* 18 (2007), p. 1157-1161 (cf. p. 17).
- [45] R. OKAZAKI, H. KAJIMOTO et V. HAYWARD. « Vibrotactile stimulation can affect auditory loudness : a pilot study ». In : *EuroHaptics 2012*. Sous la dir. de P. ISOKOSKI et J. SPRINGARE. Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 2012 (cf. p. 17).
- [46] K.D. MARSHALL. « Modal analysis of a violin ». *J. Acoust. Soc. Am.* 77 (1985), p. 695-709 (cf. p. 17).
- [47] J. WOODHOUSE. « The acoustics of "A0-B0 mode matching" in the violin ». *Acustica - Acta Acustica* 84 (1998), p. 947-956 (cf. p. 17).
- [48] A. ASKENFELT et E.V. JANSSON. « Vibration Sensation in Stringed Instrument playing ». *Music Perception* 9 (1992), p. 311-350 (cf. p. 17).
- [49] R.T. VERILLO. « Vibrotactile threshold measured at finger ». *Perception and Psychophysics* 9 (1971), p. 329-331 (cf. p. 17).
- [50] I. WOLLMAN, C. FRITZ et J. FRELAT. « On the characterisation of vibrotactile feedback in violinists' left hand : a case study ». *Acustica - Acta Acustica* 101 (2015), p. 360-368 (cf. p. 17).
- [51] I. WOLLMAN, C. FRITZ, J. POITEVINEAU et S. McADAMS. « Investigating the role of auditory and tactile modalities in violin quality evaluation ». *PLoS ONE* 9 (2014), e112552 (cf. p. 18).
- [52] I. WOLLMAN, C. FRITZ et J. POITEVINEAU. « Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violin ». *J. Acoust. Soc. Am.* 136 (2014), p. 910-921 (cf. p. 18).
- [53] S. VAIEDELICH et C. FRITZ. « Perception of old and historical musical instruments ». *J. Cultural Heritage* 27 (2017), S2-S7 (cf. p. 19).
- [54] P. BALL. *Histoire vivante des couleurs, 5000 ans de peinture racontée par les couleurs*. trad. Jacques Bonnet. Paris : Hazan, 2005 (cf. p. 20).
- [55] J.-P. ECHARD, L. BERTRAND, A. VON BOHLEN, A.-S. LE HÔ, C. PARIS, L. BELLOT-GURLET, B. SOULIER, A. LATTUATI-DERIEUX, S. THAO, L. ROBINET, B. LAVÉDRINE et S. VAIEDELICH. « The nature of the extraordinary finish of Stradivari's instruments ». *Angewandte Chemie International Edition* 49 (2009), p. 197-201 (cf. p. 20).
- [56] J.-P. ECHARD et L. BERTRAND. « Complementary Spectroscopic Analyses of Varnishes of Historical Musical Instruments ». *Spectroscopy Europe* 2 (2010), p. 12-15 (cf. p. 20).
- [57] A. TOLBECQUE. *L'art du luthier*. Niort : Chez l'auteur, au Fort-Foucault, 1903 (cf. p. 21).
- [58] S. ISSERLIS. « Stradivarius versus modern violins : why this latest study strikes a discordant note ». *The Guardian* (1/03/2012) (cf. p. 21).
- [59] F. ALMOND. *They blinded me with science*. <https://insidethearts.com/nondivisi/they-blinded-me-with-science/>. 1/09/2012 (cf. p. 21).
- [60] C. FRITZ et J. CURTIN. « How violinists and their audiences evaluate violins ». *Acta Acustica* (En révision) (cf. p. 22).
- [61] C. SAITIS, C. FRITZ, B.L. GIORDANO et G. P. SCAVONE. « Bridge admittance measurements of 10 preference-rated violins ». In : *Proc. of Acoustics 2012*. Nantes, France, 2012 (cf. p. 25).

- [62] A. COGGINS. « Blind faith ». *The Strad* 118 (2007), p. 52-55 (cf. p. 25).
- [63] J. SCHELLENG. « Acoustical effects of violin varnish. » *J. Acoust. Soc. Am.* 44 (1968), p. 1175-1183 (cf. p. 25).
- [64] L. BURCKLE et H.D. GRISSINO-MAYER. « Stradivari, violins, tree rings, and the Maunder Minimum : a hypothesis. » *Dendrochronologia* 21 (2003), p. 41-45 (cf. p. 25).
- [65] B.C. STOEL et T.M. BORMAN. « A comparison of wood density between classical Cremonese and modern violins ». *Plos ONE* 3 (2008), e2554 (cf. p. 25).
- [66] C.Y. BARLOW, G.R. EDWARDS P.P. and Millward, R.A. RAPHAEL et D.J. RUBIO. « Wood treatment used in Cremonese instruments ». *Nature* 332 (1988), p. 313 (cf. p. 25).
- [67] J. NAGYVARY, J.A. DiVERDI, N.L. OWEN et H. DENNIS TOLLEY. « Wood used by Stradivari and Guarneri ». *Nature* 444 (2006), p. 565 (cf. p. 25).
- [68] C.M. HUTCHINS, A.S. HOPPING et F.A. SAUNDERS. « Subharmonics and Plate Tap Tones in Violin Acoustics ». *J. Acoust. Soc. Am.* 32 (1960), p. 1443-1449 (cf. p. 25).
- [69] C. FRITZ, J. CURTIN, J. POITEVINEAU, P. MORREL-SAMUELS et F.-C. TAO. « Player preferences among new and old violins ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 109 (2012), p. 760-763 (cf. p. 25, 27).
- [70] C. FRITZ. *Preferences among old and new violins, aka the Indianapolis experiment*. <http://www.lam.jussieu.fr/Membres/Fritz/HomePage/Indianapolis.html>. 2012 (cf. p. 26).
- [71] C. FRITZ, J. CURTIN, J. POITEVINEAU, H. BORSARELLO, I. WOLLMAN, F.-C. TAO et T. GHASAROSSIAN. « Soloist evaluations of six Old Italian and six new violins ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 111 (2014), p. 7224-7229 (cf. p. 26, 37).
- [72] C. FRITZ, J. CURTIN, J. POITEVINEAU et F.C. TAO. « Listener evaluations of new and Old Italian violins ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 114 (2017), p. 5395-5400 (cf. p. 26, 49).
- [73] D.J. LEVITIN. « Expert violinists can't tell old from new ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 111 (2014), p. 7168-7169 (cf. p. 27).
- [74] H.C. TAI. « Role of timbre memory in evaluating Stradivari violins ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 111 (2014), E2778 (cf. p. 28).
- [75] C. FRITZ, J. CURTIN et J. POITEVINEAU. « Reply to Tai : On the inability of 10 soloists to tell apart Old Italian and new violins at better than chance levels ». *Proc. Nat. Ac. Sci.* 111 (2014), E2779 (cf. p. 28).
- [76] J. CURTIN. *Billet posté le 21/02/2014*. <http://josephcurtinstudios.com/category/blog/>, last accessed 1 July 2014. 2014 (cf. p. 28).
- [77] P. GAILLARD. « Laissez-nous trier ! TCL-LabX et les tâches de catégorisation libre de sons ». In : *Le Sentir et le Dire, concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives*. Sous la dir. de Danièle DUBOIS. Paris : L'Harmattan, 2012, p. 189-210 (cf. p. 29).
- [78] A. PATÉ, J.-L. LE CARROU, B. NAVARRET, D. DUBOIS et B. FABRE. « Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarists' perception ». *Acustica - Acta Acustica* 101 (2015), p. 347-359 (cf. p. 29).
- [79] C. FRITZ, J. CURTIN, D. DUBOIS et J. VERSCHOORE. « The violin : Studying the influence of the model by means of a free sorting task ». In : *Int. Symp. on Musical and Room Acoustics*. La Plata, Argentine, 2016 (cf. p. 29).
- [80] J. ALONSO-MORAL. « From properties of free top plates, of free back plates and of ribs to properties of assembled violins ». *STL-QPSR (Speech Transmission Laboratory quarterly progress and status report)*, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden 25 (1984), p. 1-29 (cf. p. 30).
- [81] J. ALONSO-MORAL et E.V. JANSSON. « Input admittance, eigenmodes and quality of violins ». *STL-QPSR (Speech Transmission Laboratory quarterly progress and status report)*, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden 23 (1982), p. 60-75 (cf. p. 30).
- [82] C. FRITZ, G. STOPPANI, U. IGARTUA, R. JARDÓN RICO et A. ARROITAJAUREGI. « The Bilbao project : How violin makers match backs and tops to produce particular sorts of violins ». In : *Int. Symp. on Musical Acoustics*. Detmold, Germany, 2019 (cf. p. 31).
- [83] E.B. DAVIS. « On the effective material properties of violin plates ». In : *Proc. Stockholm Music Acoust. Conf.* Stockholm, Sweden, 2013 (cf. p. 32).

- [84] G. E. GOUGH. « Violin plate modes ». *J. Acoust. Soc. Am.* 137 (2015), p. 139-153 (cf. p. 33).
- [85] J. CURTIN. « Measuring violin sound radiation using an impact hammer ». *J. Violin Soc. Am. : VSA Papers* 22 (2009), p. 186-209 (cf. p. 34).
- [86] B. NIEWCZYK et E. V. JANSSON. « Experiments with violin plates ». *STL-QPSR (Speech Transmission Laboratory quarterly progress and status report), Royal Institute of Technology (KTH), Sweden* 28 (1987), p. 25-42 (cf. p. 35).
- [87] M. SCHLESKE. « Eigenmodes of vibration in the working process of a violin ». *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 4 (2000), p. 90-95 (cf. p. 35).
- [88] B.C.J. MOORE, B.R. GLASBERG et T. BAER. « A model for the prediction of thresholds, loudness, and partial loudness ». *J. Audio Eng. Soc.* 45 (1997), p. 224-240 (cf. p. 36).
- [89] M. LAVANDIER, P. HERZOG et S. MEUNIER. « Comparative measurements of loudspeakers in a listening situation ». *J. Acoust. Soc. Am.* 123.1 (2008), p. 77-87 (cf. p. 36).
- [90] L. FU, C. FRITZ et G. SCAVONE. « Player evaluation of performance and student violin ». In : *26th International Congress on Sound and Vibration*. Montréal, Canada, 2019 (cf. p. 37).
- [91] L. FU, G. SCAVONE et C. FRITZ. « How different strings affect violin qualities ». In : *Proc. Mtgs. Acoust. T. 35. 176th Meeting of Acoustical Society of America Acoustics Week in Canada, Victoria, Canada, 2018*, p. 1-13 (cf. p. 38).
- [92] L. FU, C. FRITZ et G. SCAVONE. « Perception of violin soundpost tightness through playing and listening tests ». *J. Acoust. Soc. Am.* 150 (2021), p. 540-550 (cf. p. 39).
- [93] S. CARCAGNO, R. BUCKNALL, J. WOODHOUSE, C. FRITZ et C. J. PLACK. « Effect of back wood choice on the perceived quality of steel-string acoustic guitars ». *J. Acoust. Soc. Am.* 144 (2018), p. 3533-3547 (cf. p. 40, 41).
- [94] J. BOLEY et M. LESTER. « Statistical analysis of ABX results using signal detection theory ». In : *Audio Engineering Society Convention 127 (Audio Engineering Society)*. New-York, USA, 2009 (cf. p. 40).
- [95] C. FRITZ, I. CROSS, J. WOODHOUSE et B.C.J. MOORE. « Perceptual thresholds for detecting modifications applied to the acoustical properties of a violin ». *J. Acoust. Soc. Am.* 122 (2007), p. 3640-3650 (cf. p. 44, 46).
- [96] C. FRITZ, J. WOODHOUSE, F.P-H. CHENG, I. CROSS, B.C.J. MOORE et A.F. BLACKWELL. « Perceptual studies of violin body damping and vibrato ». *J. Acoust. Soc. Am.* 127 (2010), p. 513-524 (cf. p. 44, 47).
- [97] L. CREMER. *The Physics of the Violin*. MIT Press, Boston, MA, 1985 (cf. p. 45).
- [98] F. DURUP et E.V. JANSSON. « The quest of the violin bridge-hill ». *Acustica - Acta Acustica* 91 (2005), p. 206-213 (cf. p. 45).
- [99] G. E. GOUGH. « A violin shell model : Vibrational modes and Acoustics ». *J. Acoust. Soc. Am.* 137 (2015), p. 1210-1225 (cf. p. 45).
- [100] C.M. HUTCHINS. « The Physics of Violins ». *Scientific American* 207 (1962), p. 79-93 (cf. p. 45).
- [101] D.J. EWINS. *Modal Testing : Theory, Practice and Application*. Research Studies Press LTD, Baldock, England, 2000 (cf. p. 45).
- [102] C. S. WATSON. « Uncertainty, informational masking, and the capacity of immediate auditory memory ». In : *Auditory Processing of Complex Sounds*. Sous la dir. de W. A. YOST et C. S. WATSON. Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1987 (cf. p. 46).
- [103] M. SCHLESKE. « On making "tonal copies" of a violin ». *Catgut Acoust. Soc. J. (Series II)* 3 (1996), p. 18-28 (cf. p. 46).
- [104] A. CARDENAS. « Corrélation entre les propriétés acoustiques et perceptives du violon ». *Mém. de mast. Paris : Université Pierre et Marie Curie*, 2009 (cf. p. 48).
- [105] C. FRITZ, V. FRAISSE et D. DUBOIS. « The ObieAlto project : Looking for correlations between perceptual properties and constructional data ». In : *Int. Symp. on Musical Acoustics*. Detmold, Germany, 2019 (cf. p. 50).

- [106] G. PEETERS, B.L. GIORDANO, P. SUSINI, N. MISDARIIS et McAdams S. « The Timbre Toolbox : extracting audio descriptors from musical signals ». *J. Acoust. Soc. Am.* 130 (2011), p. 2902-2916 (cf. p. 50).
- [107] O. LARTILLOT et P. TOIVIAINEN. « A Matlab Toolbox for Musical Feature Extraction From Audio ». In : *International Conference on Digital Audio Effects*. Bordeaux, France, 2007 (cf. p. 50).
- [108] V. SALVADOR-CASTRILLO. « Correlations between construction parameters, vibro-acoustic characteristics and perceptual qualities of a pool of 13 violins ». Mém. de mast. Paris : Sorbonne Université, 2021 (cf. p. 52).
- [109] Z. WALLMARK. « A corpus analysis of timbre semantics in orchestration treatises ». *Psychology of Music* 47 (2019), p. 585-605 (cf. p. 52).
- [110] A. DAMODARAN, L. LESSARD et A. SURESH BABU. « An overview of fibre reinforced composites for musical instrument soundboards ». *Acoust. Aust.* 43 (2015), p. 117-122 (cf. p. 54).
- [111] T. DUERINCK. « Violin making with fiber-reinforced composites. An artistic and scientific research journey ». Thèse de doct. University of Ghent, Belgium, 2021 (cf. p. 54).
- [112] T. DUERINCK, G. VERBERKMOES, C. FRITZ, M. LEMAN, L. NIJS, M. KERSEMANS et W. VAN PAEPEGEM. « Listener evaluations of violins made from composites ». *J. Acoust. Soc. Am.* 147 (2020), p. 2647-2655 (cf. p. 55).