



**THESE DE DOCTORAT DE  
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Présentée par :

Indiana Wollman

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE**

Sujet de la thèse :

**PERCEPTION BIMODALE DES VIOLONISTES EN SITUATION DE JEU :  
INFLUENCE DES RETOURS AUDITIF ET VIBROTACTILE SUR  
L'ÉVALUATION DU VIOLON**

Soutenue le : 25 octobre 2013

devant le jury composé de :

M. Marc Leman, Rapporteur  
M. Patrick Susini, Rapporteur  
M. Anders Askenfelt, Examineur  
M. Vincent Hayward, Examineur  
M. Joël Frelat, Directeur de thèse  
Mme. Claudia Fritz, Co-Directrice de thèse  
M. Stephen McAdams, Membre invité

Institut Jean Le Rond d'Alembert,  
Equipe Lutheries, Acoustique, Musique,  
11, rue de Lourmel, 75015 PARIS, FRANCE

Ecole doctorale SMAER,  
4, place Jussieu, BC 270,  
75252, PARIS cedex 05, FRANCE

# Résumé

Le jeu du violon est un processus multimodal par essence. L'audition est bien sûr particulièrement sollicitée, mais le sens tactile fait lui aussi partie intégrante du processus de production musicale et de contrôle. Cette thèse étudie la contribution de la modalité tactile – restreinte à la main gauche - des violonistes, à la perception et l'évaluation du son et du ressenti physique d'un violon, en contexte de jeu. Une première approche consiste à confronter les niveaux de vibration mesurés par vibrométrie laser au niveau du manche de plusieurs violons aux seuils absolus de sensation vibrotactile mesurés sur la main gauche de violonistes tenant un manche isolé afin de simuler une situation réelle de jeu. Cette comparaison propose l'existence du retour vibrotactile dans la main gauche comme possible signature perceptive du violon joué. La contribution de ce retour tactile à l'évaluation des qualités d'un violon est ensuite abordée dans une expérience perceptive en situation de jeu permettant de tester trois types de retour sensoriel : (1) normal, (2) masquage auditif (casque anti-bruit + écouteurs diffusant du bruit blanc) et (3) masquage vibrotactile (bagues vibrantes sur les doigts du musicien). Il apparaît que les violonistes basent leur évaluation sur des indices non-auditifs suffisamment puissants pour conduire à une évaluation cohérente des instruments et que même si l'effet du masquage auditif est légèrement plus fort en moyenne que celui du masquage vibrotactile, ce n'est pas nécessairement le cas au niveau individuel. Enfin, l'influence du retour vibrotactile sur la perception auditive des violonistes est étudiée dans une expérience d'intégration multisensorielle, basée sur la mise en place d'un dispositif expérimental permettant de tester une condition d'*écoute augmentée*. Les vibrations du manche d'un violon joué par un violoniste professionnel sont envoyées en temps réel sur un manche de violon isolé, avec un gain modulable. Les participants (violonistes) tenant le manche isolé comme en situation réelle, sont invités à évaluer le violon joué en live. Les résultats montrent que le niveau de vibration dans manche influence significativement l'évaluation de critères *a priori* purement auditifs tels la richesse sonore ou la puissance sonore. Cette étude illustre la complexité des processus multimodaux impliqués dans la perception du violon et qu'il convient de prendre en compte lors de la recherche de corrélation entre paramètres perceptifs et descripteurs acoustiques.



# Abstract

Violin playing is multimodal in nature. Audition of course plays a key role in performance, but the tactile sense is an integral part of the process of musical production and control, as well. This dissertation investigates the contribution of the tactile modality – limited to the left hand – of violinists to the perception and evaluation of the sound and the feel of a violin in a playing context. A first approach involves comparing the vibration levels measured by laser vibrometry at the neck of several violins with the absolute threshold of vibration sensation measured at the left hand, for violinists holding an isolated neck simulating the real playing situation. This comparison presumes the existence of vibrotactile feedback at the left hand as a potential perceived signature of the violin played. The contribution of tactile feedback to the evaluation of violin qualities is then considered in a perceptual experiment testing three sensory-feedback playing conditions : (1) normal, (2) auditory masking (earmuff + headphones presenting white noise) and (3) vibrotactile masking (vibrating rings on musician's fingers). It appears that violinists base their evaluation on non-auditory cues which are powerful enough to lead to a consistent evaluation, and even if, on average, the effect of auditory masking was slightly greater than for tactile masking, it is not necessarily the case at an individual level. Finally, the influence of vibrotactile feedback on the auditory perception of violinists is studied in a multisensory integration experiment, based on an experimental setup designed to test an *augmented listening* condition. The vibrations of a violin played by a professional violinist are transmitted to an isolated neck in real time, with an adjustable gain. Participants (violinists) are asked to evaluate the violin heard live, while holding the neck as in normal playing. Results show that the vibration level at the neck significantly affects the evaluation of *a priori* auditory criteria like sound richness or power. This work illustrates the complexity of multisensory processes involved in violin perception and encourages them to be taken into account when attempting to correlate perceptual parameters with acoustical signal properties.



# Remerciements

Je voudrais dédier ce travail à Pierre Encrenaz dont je serai à jamais reconnaissante d'avoir guidé mes premiers pas en direction du monde magique de l'acoustique musicale.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes co-directeurs de thèse Claudia Fritz et Joël Frelat pour l'extrême liberté qu'ils m'ont laissée dans ce projet. Merci à Claudia dont j'apprécie tant la détermination et la sincérité, d'avoir accepté que je développe un sujet de thèse assez personnel et de m'avoir offert une de mes plus grandes émotions musicales en m'intégrant dans l'expérience qu'elle a conduite à Vincennes. Merci pour tout ce que l'on a appris ensemble au cours de ce parcours de thèse. Merci à Joël pour son rôle de guide stabilisateur, sa constante disponibilité, ses encouragements, son ouverture d'esprit, sa compréhension profonde de ce dont un doctorant a besoin sur le plan psychologique et intellectuel.

Je voudrais exprimer toute ma gratitude à Jacques Poitevineau pour tout ce qu'il m'a appris sur le plan scientifique, en particulier pour m'avoir ouvert le monde des statistiques bayésiennes, pour sa disponibilité extraordinaire dans la phase de rédaction des articles et de mon manuscrit de thèse.

Je garde une profonde reconnaissance à Stephen McAdams pour m'avoir encouragée dans la conception de mon projet de thèse, pour son soutien scientifique sans faille, et pour l'encadrement irremplaçable qu'il m'a procuré lors mes séjours dans son laboratoire, et à l'occasion de chacune de ses visites à Paris.

Je tiens à exprimer des remerciements tout particuliers à Benoît Fabre pour son engagement très généreux dans le suivi des thèses de ses non-doctorants et pour avoir su éclairer en quelques phrases certaines étapes de mon travail et m'apaiser dans des moments de découragement.

Je ne remercierai jamais assez mon ami le violoniste professionnel Frédéric Moisan d'avoir accepté de venir de Montréal pour jouer le rôle de « violoniste-expérimentateur », d'avoir conservé sa bonne humeur et fait montre d'une grande patience pendant la préparation chaotique de l'expérience! Merci aux luthiers Pierre Testa, Olivier Pérot, Philippe Mitéran-Bigorgne, Frédéric Levi et Nicolas Perrin qui nous généreusement prêté des instruments.

Je tiens à remercier Vincent Hayward pour son intérêt, son enthousiasme scientifique et ses précieux conseils tout au long de cette thèse.

Merci à Patrick Susini, Marc Leman, Anders Askenfelt d'avoir accepté de prendre le temps d'analyser mon travail.

Merci à toutes les personnes que j'ai côtoyées au LAM et à McGill. Merci à Laurent Quartier pour son aide dans la conception de dispositifs expérimentaux. Merci également à toute la merveilleuse équipe technique du CIRMMT à Montréal.

Je souhaite remercier spécialement toute la jeune génération du LAM : les grands doc-

teurs Henri Boutin et Sylvain Lamesch pour m'avoir accueillie si chaleureusement lorsque j'ai commencé ma thèse ; un remerciement très particulier à Roman Auvray, mon compagnon de route tout au long de mes études universitaires, et Delphine Chadeaux, notre aînée, d'avoir été là quand il le fallait, c'était précieux ; merci également à Cédrik Erbsen, Arthur Pâté et Paul Luizard, et toute la nouvelle génération des thésards Camille Vautrin, Juan-Pablo Espitia, Alexandre Roy, Augustin Ernoult qui ont contribué à la bonne ambiance du labo.

Je remercie tous les membres de la mumt grad team de MusicTech, McGill que j'ai rencontrés lors de mes séjours au Canada. Et en particulier Sven Amin Lembke, Marccello Giordano, Harris Saitis, Mike Raymond Winters, Carolina Brum Medeiro et Hossein Manssour ainsi que Vincent Fréour et Song Hui Chon.

Merci à toutes les personnes remarquables que j'ai eu la chance de rencontrer pendant ATIAM et en particulier mes très chers sguibs, alliés indispensables de cette thèse : Nigel, Dinhu, Louis, Baba et Robuz.

Merci à T pour son soutien solide de l'ombre et pour le roman que ma thèse lui a inspiré.

Merci à Nico, Anaïs, Alice et Seb d'avoir été là depuis toujours, et de s'être toujours intéressés à ma thèse même si je n'avais pas envie d'en parler.

Je remercie ma famille, mes parents pour leur indéfectible amour et l'incomparable soutien intellectuel qu'ils m'ont toujours apporté. Merci à eux d'être tout simplement hors du commun.

Enfin, un merci immense à Manu pour avoir partagé, pas à pas, chaque étape de ce travail depuis son stage sur le violon. Sans lui certains aspects de cette thèse n'auraient sans doute jamais vu le jour.



# Table des matières

<b>Résumé/Abstract</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>v</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vii</b>
<b>I Introduction Générale</b>	<b>1</b>
1.1 Contexte de l'étude . . . . .	3
1.1.1 Le violon – caractérisation vibratoire . . . . .	3
1.1.2 Evaluation de la qualité du violon : émergence de la notion de « feel » . . . . .	5
1.2 Le sens tactile . . . . .	8
1.2.1 Caractéristiques générales . . . . .	8
1.2.2 Importance du tactile chez les musiciens . . . . .	9
1.3 Intégration audiotactile . . . . .	11
1.3.1 Caractéristiques générales . . . . .	11
1.3.2 En situations concrètes . . . . .	13
1.4 Positionnement de l'étude et problématiques . . . . .	15
<b>II Etude du retour vibratoire au manche</b>	<b>17</b>
<b>1 Seuil(s) absolu(s) de sensibilité vibrotactile dans la main gauche des violonistes</b>	<b>21</b>
1.1 Introduction . . . . .	21
1.2 Paramètres physiques influençant le seuil de sensibilité de la main . . . . .	21
1.2.1 Zone du corps humain . . . . .	21
1.2.2 Surface de contact . . . . .	22
1.2.3 Pression appliquée . . . . .	22
1.3 Mesure du seuil absolu de sensibilité vibrotactile dans la main gauche des violonistes	24
1.3.1 Participants . . . . .	24
1.3.2 Dispositif expérimental . . . . .	24
1.3.3 Procédure . . . . .	25
1.3.4 Calibrage . . . . .	26
1.4 Résultats . . . . .	27
1.5 Conclusion . . . . .	29

<b>2</b>	<b>Retour vibrotactile : vers la discrimination des violons</b>	<b>31</b>
2.1	Introduction . . . . .	31
2.2	Mesures vibratoires sur les violons . . . . .	32
2.2.1	Admittance au chevalet . . . . .	32
2.2.2	Niveaux de vibration au manche . . . . .	32
2.2.3	Procédure expérimentale . . . . .	32
2.3	Caractérisation perceptive et vibratoire d'un ensemble de violon . . . . .	34
2.3.1	Evaluation perceptive d'un violoniste professionnel . . . . .	35
2.3.2	Etudes des comportements vibratoires . . . . .	35
2.3.2.1	Admittances au chevalet . . . . .	35
2.3.2.2	Niveaux de vibrations au manche et seuil de sensibilité : retour vibratoire dans la main gauche . . . . .	36
2.4	Discussion et conclusion . . . . .	38
<b>III</b>	<b>Contributions respectives des modalités auditive et tactile dans l'évaluation des violons</b>	<b>41</b>
<b>3</b>	<b>Investigating the role of the auditory and the tactile modalities in violin quality evaluation</b>	<b>45</b>
3.1	Introduction . . . . .	46
3.1.1	The role of auditory and tactile feedback in musical instrument performance	47
3.1.1.1	Auditory feedback in music . . . . .	47
3.1.1.2	Tactile feedback in music . . . . .	47
3.1.2	Aim and research questions . . . . .	48
3.2	Method . . . . .	49
3.2.1	Participants . . . . .	49
3.2.2	Violins . . . . .	49
3.2.3	Procedure . . . . .	50
3.2.4	Apparatus – Control of sensory loss . . . . .	52
3.2.4.1	Visual feedback control . . . . .	52
3.2.4.2	Auditory feedback masking . . . . .	52
3.2.4.3	Tactile feedback masking . . . . .	53
3.3	Results . . . . .	56
3.3.1	Violin preference task through active touch perception only . . . . .	56
3.3.2	Violin preference under different sensory feedback conditions . . . . .	57
3.3.2.1	General variability between conditions . . . . .	57
3.3.2.2	Auditory vs. tactile feedback involved in violin preference . . . . .	59
3.3.2.3	Auditory + tactile feedback vs. haptic comfort . . . . .	61
3.3.3	Criteria evaluation and overall quality rating . . . . .	61
3.3.3.1	Within-participant coherence . . . . .	61
3.3.3.2	Towards a hierarchy of criteria in normal playing condition . . . . .	62

3.3.3.3	Effect of auditory and tactile masking on criteria evaluation . . .	64
3.3.4	Overall quality vs. preference . . . . .	66
3.4	Discussion and conclusions . . . . .	67
<b>4</b>	<b>Caractérisation vibratoire des violons, et étude d'un cas particulier (comparaison VD/VE)</b>	<b>73</b>
4.1	Introduction . . . . .	73
4.2	Caractérisation vibratoire des cinq violons . . . . .	74
4.3	Comparaison violons VD et VE . . . . .	79
4.3.1	Expérience perceptive : comparaison en condition normale (Cond N) . . .	79
4.3.1.1	Huit critères . . . . .	80
4.3.1.2	Qualité globale . . . . .	81
4.3.1.3	Préférence . . . . .	81
4.3.2	Comparaisons des mesures vibratoires . . . . .	81
4.3.2.1	Admittances . . . . .	81
4.3.2.2	Fonctions de transfert chevalet/manche . . . . .	83
4.4	Discussion et conclusion . . . . .	85
<b>IV</b>	<b>Intégration bimodale dans l'évaluation des violons</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violins</b>	<b>91</b>
5.1	Introduction . . . . .	92
5.2	Method . . . . .	95
5.2.1	Participants . . . . .	95
5.2.2	Violins . . . . .	95
5.2.3	Procedure . . . . .	96
5.2.3.1	Experimental design . . . . .	96
5.2.3.2	Evaluation criteria and musical excerpts . . . . .	99
5.2.3.3	Violinist-experimenter . . . . .	100
5.2.4	Apparatus and materials - experimental set-up in the AL condition . . . .	100
5.2.4.1	Calibration of the system . . . . .	102
5.2.4.2	Perceptual validation of the soundproof box . . . . .	104
5.3	Results . . . . .	105
5.3.1	Absolute judgments . . . . .	105
5.3.2	Comparative judgments . . . . .	108
5.4	Discussion and Conclusions . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Influence du retour vibratoire : une étude des différences inter-individuelles</b>	<b>115</b>
6.1	Introduction . . . . .	115
6.2	Deux groupes de sujets « VibAtt » / « noVibAtt » . . . . .	115
6.2.1	Origine des groupes . . . . .	116

6.2.2	Analyse des évaluations par groupe . . . . .	117
6.2.2.1	Evaluation en absolu . . . . .	118
6.2.2.2	Evaluation en comparaison par paire . . . . .	121
6.2.3	Notation du « Plaisir » en fonction du violon et du groupe . . . . .	122
6.3	Caractérisation des violons . . . . .	124
6.3.1	Violons de l'étude . . . . .	124
6.3.2	Etude de l'interaction groupe $\times$ violon . . . . .	124
6.3.3	Mesures vibratoires sur les violons de l'étude . . . . .	125
6.3.4	Violon préféré vs. violon personnel . . . . .	127
6.4	Discussion et conclusion . . . . .	128
<b>V</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>131</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>143</b>
<b>VI</b>	<b>Annexes</b>	<b>145</b>
<b>A</b>	<b>Traitements statistiques</b>	<b>147</b>
A.1	Définition de l'effet . . . . .	148
A.2	Tests . . . . .	148
A.3	Corrélations . . . . .	149
A.4	Enoncés bayésiens . . . . .	149
<b>B</b>	<b>Campagne de mesures de la Partie 2</b>	<b>151</b>
<b>C</b>	<b>Campagne de mesures de la Partie 3</b>	<b>153</b>
<b>D</b>	<b>Expérience Partie 4 : extraits musicaux</b>	<b>157</b>
<b>E</b>	<b>Expérience Partie 4 : réponses au questionnaire</b>	<b>159</b>
<b>F</b>	<b>Expérience Partie 4 : complément d'analyse</b>	<b>163</b>
	<b>Table des tableaux</b>	<b>172</b>
	<b>Table des figures</b>	<b>175</b>

## Première partie

# Introduction Générale



# Introduction générale

Lorsqu'on les interroge sur leur rapport à la musique, les musiciens disent souvent qu'ils ne l'entendent pas simplement mais qu'ils la « ressentent ». La réponse est la même lorsqu'on les interroge sur leur instrument. Comme le soulignait Marshall (1985), « to be accepted by an artist, an instrument must not only sound correct but it must also “feel” correct » (p. 705). Il apparaît donc qu'au-delà du son, le « ressenti » musical (“feel”) est un élément fondamental de la perception des musiciens, qui suggère l'implication d'autres sens que l'audition. En effet, Marshall utilise le terme « feel » proche de « feeling » : on comprend bien qu'entrent ici en jeu des types d'informations perceptives telles que les informations proprioceptives, vestibulaires, et autres afférences cutanées provenant du système somatosensoriel. Cependant, aucune étude comportementale n'a traité de cette question, et les bases neuronales du “ressenti” musical ne sont pas encore comprises.

Le thème de notre recherche concerne l'un des aspects de la perception musicale, appliqué au violon. Le jeu du violon, comme de tout autre instrument traditionnel, est une expérience multisensorielle, impliquant des composantes perceptives, cognitives et motrices. Mais le « ressenti » est particulièrement probant chez les violonistes qui ont une interaction très forte avec leur instrument (la main gauche tient le manche, le corps du violon est pris entre l'épaule et le menton, la main droite manie l'archet), au point que le jeu peut être décrit comme un dialogue entre deux êtres animés. Le violoniste est tour à tour acteur puis récepteur de la réponse vibratoire du violon. L'interaction tactile entre le violoniste et son violon est donc inhérente à la performance musicale.

L'étude du rôle des informations multisensorielles intervenant chez les violonistes permet d'aborder plusieurs niveaux de problématique liés à la perception et à l'évaluation des qualités d'un violon.

## 1.1 Contexte de l'étude

### 1.1.1 Le violon – caractérisation vibratoire

En vibrant sous l'action de l'archet, les cordes du violon appliquent des forces sur le chevalet, qui, par l'intermédiaire de ses pieds, les transfère au corps de l'instrument (table, éclisses, fond). L'onde sonore naît de la mise en vibration du volume d'air présent à l'intérieur du corps, qui communique avec l'air extérieur par les ouïes de la table, ainsi que de la mise en vibration de l'air ambiant par la caisse elle-même. Le son est ainsi rayonné. Le résonateur – corps – possède plusieurs fréquences de résonances distinctes qui vont favoriser différentes fréquences fournies par les cordes (Benade, 1976). Tout l'art de la lutherie réside dans le choix de ces fréquences par la sélection du bois, le choix des dimensions, le barrage de la table, les épaisseurs, les colles, les vernis etc.



*Image fournie par Paloma Valeva*

FIGURE 1.1 – Éléments de facture d'un violon <sup>1</sup>

Il est clair que les détails de facture du corps d'un violon contrôlent son comportement vibratoire, et donc ses caractéristiques de jeu ainsi que le son qu'il produit. Bien que de nombreuses études aient été conduites sur l'acoustique du violon (Cremer and Allen, 1984; Hutchins and Benade, 1997) il reste très difficile de répondre à la principale préoccupation des luthiers : dans quelle mesure un petit changement apporté à la structure d'un violon influe sur ses qualités de jeu ou le son qu'il produit.

Le violon, comme toute autre structure mécanique, peut être décrit par l'ensemble de ses modes de vibration. Chaque mode possède une fréquence de résonance, un facteur d'amortissement, une déformée modale et un diagramme de rayonnement acoustique. Dans le domaine des fréquences audibles, le violon possède plusieurs centaines de modes de vibration. Dans le domaine des fréquences perceptibles par le sens tactile, le violon possède moins d'une vingtaine de modes. Les modes présents en dessous de 650 Hz environ constituent ce que les acousticiens appellent communément modes de « signature », car la plupart des violons possèdent ces modes. Nous ne considérerons dans cette thèse que les principaux modes de vibration du violon présents dans la région [100-650] Hz (pour une liste plus exhaustive, voir Marshall (1985) et Woodhouse (2002)) :

1. Photo extraite de [www.palomavela.com](http://www.palomavela.com)



- Il existe trois principaux modes de « corps ». Le premier mode de corps est couramment appelé « CBR » ; généralement considéré comme peu rayonnant, il se trouve aux alentours de [380-440] Hz. Viennent ensuite deux modes dits « jumeaux », dénommés « B1- » et « B1+ » par Bissinger (1996) ; ils impliquent des changements de volume de la caisse très importants et rayonnent donc beaucoup. Ces deux modes se trouvent classiquement autour de [450-480] Hz pour B1- et [530-580] Hz pour B1+
- Il existe deux modes de « cavité », associés aux variations de pression de l'air présent dans la cavité interne du violon. Le mode dénommé « A0 » correspond à une résonance de type Helmholtz ; ce mode de cavité est connu pour rayonner beaucoup à travers les ouïes. On trouve classiquement ce mode aux alentours de 280 Hz. Le second mode de cavité, dénommé « A1 » par Jansson (1977), apparaît généralement dans l'intervalle [470-490] Hz, avec  $f_{A1} \approx 1.7 \cdot f_{A0}$ .
- Il existe un mode basé sur la flexion ou la torsion de la partie manche/touche accrochée au corps du violon, et présentant un comportement similaire à celui d'une poutre en flexion ou en torsion : ce mode est classiquement dénommé « B0 », et se trouve aux alentours du mode de cavité le plus bas « A0 ».

Lorsque les fréquences de résonance des modes de corps et de cavité sont proches l'une de l'autre, les modes de vibration observés sont alors une combinaison des mouvements des modes standards impliqués (voir par exemple Woodhouse (1998) pour une étude sur le couplage des modes A0 et B0).

On peut pour finir mentionner les modes propres de quelques éléments constitutifs du violon (il ne s'agit donc pas des modes de « signature » du violon) :

Le système manche/touche du violon présente trois principaux modes de flexion verticaux. Seul le premier mode de vibration est pur, les deux autres sont probablement couplés à d'autres modes proches en fréquence. Les fréquences des deux premiers modes sont très proches des fréquences des cordes ré (293 Hz) et mi (659 Hz). Ces modes pourraient donc être facilement excités lors du jeu du violon.

Le cordier, corps rigide suspendu entre les cordes et son attache élastique, présente deux modes propres dans l'intervalle [300-800] Hz.

Nombre d'études ont déjà tenté de comparer les différents paramètres de ces modes pour caractériser et distinguer les violons.

### 1.1.2 Evaluation de la qualité du violon : émergence de la notion de « feel »

Les premiers travaux s'intéressant à la qualité du violon se sont principalement focalisés sur la caractérisation de l'instrument lui-même en tant qu'objet physique : développement de techniques de mesures de réponse acoustique et vibratoire et analyse comparative sur différents violons, un des objectifs étant d'expliquer les caractéristiques modales mesurées sur les violons à partir de jugements perceptifs globaux (e.g. préférence, appréciation des différents attributs du violon). Ces études ont en particulier tenté d'expliquer la qualité sonore des violons en se basant sur l'observation des modes de « signature » visibles sur les courbes d'admittance au

chevalet (voir Chapitre 4). On peut citer par exemple les travaux de Alonso Moral et Jansson (1982) dont les mesures sur 24 violons ont fait ressortir certains descripteurs acoustiques (e.g. hauteur environ égale des pics de B1- et B1+) pouvant expliquer leur qualité sonore telle que jugée par deux violonistes professionnels. Hutchins (1989) a réalisé des mesures d'admittances sur plus de 100 violons, couvrant une large gamme de caractéristiques de jeu et propriétés sonores. Il est suggéré que la distance fréquentielle entre deux modes explique certains attributs perceptifs du violon (e.g. si la distance entre A1 et B1+ est inférieure à 40 Hz, alors le violon est facile à jouer). Ces résultats n'ont cependant pas été confirmés par la suite. En effet, plus récemment, Bissinger et Gregorian (2003) ont réalisé des mesures acoustiques et vibratoires sur 17 violons sélectionnés pour leur différence de qualité globale, déterminée grâce à l'appréciation d'un violoniste professionnel et/ou grâce à des commentaires d'auditeurs et/ou simplement basée sur la valeur historique du violon. A la différence de Hutchins, aucune tendance n'a finalement pu être dégagée des caractéristiques (fréquence et amortissement modaux) des modes de « signature » pour expliquer les jugements de qualité. Selon une seconde étude (Bissinger, 2008) s'intéressant au rayonnement acoustique des violons, le rayonnement du mode de cavité A0 dépendrait de la qualité du violon : un violon d'excellente qualité rayonnerait plus qu'un mauvais violon. Dünnwald (1991) a suggéré que la répartition des modes sur quatre bandes de fréquences comprises dans le registre du violon [190-6400] Hz pourrait expliquer les qualités de timbre de l'instrument. Cependant des travaux plus récents n'ont pas permis de vérifier cette hypothèse (Fritz et al., 2012a).

Aucune tendance systématique n'a donc été observée quant à la corrélation entre paramètres acoustiques mesurés et jugements perceptifs, aussi la fiabilité des interprétations avancées n'est-elle pas prouvée. La difficulté à généraliser les résultats des études précédemment citées pourrait s'expliquer d'une part, par le fait que ces études ne reposaient en général que sur les jugements perceptifs d'un seul et unique violoniste et d'autre part, par le fait que les circonstances dans lesquelles les évaluations perceptives ont été effectuées n'étaient en général pas contrôlées (on ne sait pas si l'origine des instruments est connue du violoniste ou pas, l'influence de l'aspect visuel des violons sur leur appréciation n'est jamais envisagée, etc.).

Plus récemment, des travaux ont été menés pour étudier la qualité des violons telle que perçue par les violonistes. Dans un premier temps, les violonistes étaient auditeurs : des tests d'écoute ont ainsi été menés en laboratoire afin d'étudier les caractéristiques sonores des violons. Ces tests reposent sur l'évaluation de sons de violon enregistrés, ou synthétisés (Willgoss and Walker, 2007; Fritz et al., 2010). Ce type d'approche présente des limites en ce sens qu'il restreint l'évaluation des violons à un jugement sur le son et néglige l'interaction du musicien avec son instrument. Dans un second temps, (Saitis et al., 2012) et (Fritz et al., 2012b) ont étudié les évaluations des violonistes en situation de jeu, prenant cette fois en compte le son et le ressenti de l'instrument, mais sans les dissocier, ni s'intéresser à comment ces deux types de retour sensoriel interagissent. Bien que beaucoup de violonistes s'accordent à dire que le « ressenti » est un aspect essentiel du jeu et de l'évaluation d'un violon, peu d'études se sont réellement interrogées sur ce qui pouvait donner naissance à cette sensation physique. Même les chercheurs qui ont

évoqué cette notion n'ont fait que l'effleurer.

Le ressenti d'un violon est probablement une combinaison de paramètres liés au confort haptique de l'instrument (e.g. la géométrie, le poids, l'ergonomie) mais également de paramètres liés à sa réponse perçue après excitation (e.g. réponse sous l'archet, retour vibratoire par les différents points de contact).

Gillespie (1999) pose la question « Does the feel of an instrument have anything to do with the ease with which it is played, the ease with which it may be learned, and ultimately its expressive potential? » (p. 245). En ce sens, selon O'Modhain (2000), le « ressenti » d'un instrument à cordes frottées est à rapprocher du retour vibrotactile dans l'archet (forces normales et forces de frottement perceptibles par la main droite tenant l'archet et renseignant le musicien sur la stabilité du contact archet/corde). Cependant, dans la littérature concernant le violon spécifiquement, les quelques études évoquant la notion de « ressenti » d'un violon ont en commun de s'intéresser à un autre retour vibrotactile, celui existant dans le manche de l'instrument.

En tant qu'acousticien, Marshall (1985) a postulé que les principaux modes de vibration du manche du violon seraient ceux qui détermineraient principalement le « ressenti » du violon en ce sens qu'ils existent à des fréquences basses auxquelles la peau humaine est sensible [0-1000Hz] (“it is highly likely that the "feel" of a violin is principally determined by the lowest order vibrational modes of the violin, and particularly those modes that exhibit strong participation by the neck fingerboard and/or corpus”, p. 705). La détection des vibrations par la main gauche pourrait, selon lui, être à l'origine de cette sensation. Dans une seconde étude, Marshall (1986) a étudié comment le maintien du violoniste (position de la main gauche, du menton et de l'épaule) influence le comportement vibratoire du violon. En montrant que plusieurs modes vibratoires étaient amortis (en particulier dans le manche) dans la configuration « instrument tenu », il établit un lien entre l'amortissement des vibrations et la détection de ces dernières par le violoniste. C'est cette détection qui permet au violoniste de juger du caractère plus ou moins « vivant » d'un instrument ; beaucoup de violonistes préférant, selon lui, les violons « vivants » (“the greater the number of occurrences [where the left hand detects motions at antinodal portions of the neck] the more “alive” the violin will be judged by the performer”, p. 1021).

Hutchins (1985) et Woodhouse (1998) ont développé cette recherche en explorant le couplage potentiellement existant entre les modes du corps du violon et ceux du manche (en particulier le mode B0), avec le mode de cavité A0. Selon Hutchins, le couplage pourrait augmenter la sensation de ressenti agréable, désirée par beaucoup de violonistes et elle rapporte le plaisir d'un violoniste de sentir « ses doigts plongés dans les sons » (“his fingers surrounded by sound”, p. 50) lors de la découverte d'un Stradivarius ; ce couplage n'est cependant pas interprété ici comme un attribut fondamental des bons violons. Woodhouse a développé un modèle simple permettant d'observer les phénomènes de couplages des modes A0 et B0 ; plusieurs fonctions de transfert sont définies parmi lesquelles une fonction de transfert du « ressenti » (transfer function to "feel"), qui quantifie le niveau de vibration au manche des violons. Lorsque les fréquences de deux modes coïncident, les niveaux de vibration au manche augmentent, ce qui expliquerait la préférence des violonistes pour les violons dont les deux modes sont couplés.

Cependant, ces études ayant tenté de qualifier les caractéristiques contribuant au ressenti

agréable d'un violon à partir de mesures physiques manquent d'une validation perceptive pour laquelle le rôle du violoniste est central.

## 1.2 Le sens tactile

### 1.2.1 Caractéristiques générales

Dès 1959, Von Békésy souligne que l'audition et le sens tactile sont tous deux sensibles à la même propriété physique : la pression mécanique en forme d'oscillation. Les signaux auditifs (stimulations de la membrane basilaire) et les signaux tactiles (stimulations de la peau) peuvent ainsi être pareillement décrits par leur fréquence.

L'intervalle fréquentiel de sensibilité vibrotactile est grossièrement  $[0 - 1000]$  Hz. Bien que cet intervalle soit limité comparé à celui du système auditif  $[20 - 20000]$  Hz, il est intéressant de noter que les deux sens peuvent percevoir simultanément les mêmes stimuli vibratoires dans une certaine gamme de fréquences correspondant à la fenêtre de recouvrement entre les deux intervalles de sensibilité. Cette plage fréquentielle de recouvrement se trouve comprise dans le registre du violon (voir figure 1.2).

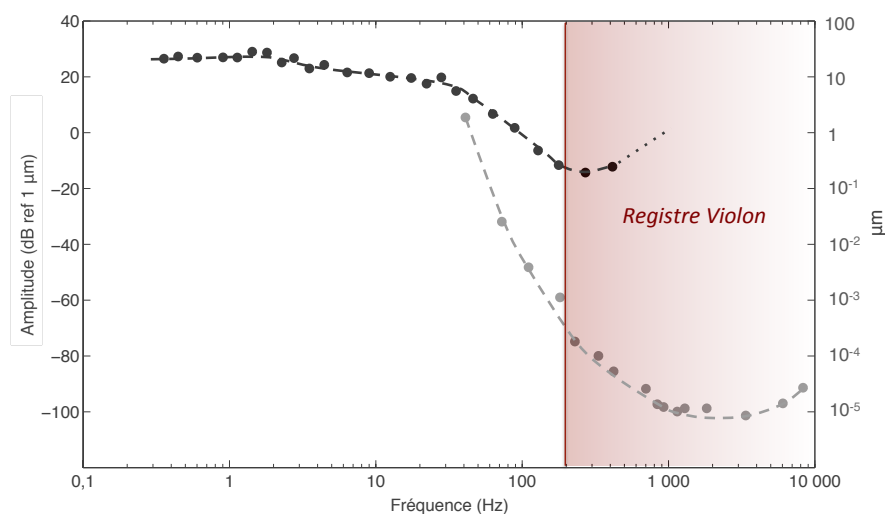


FIGURE 1.2 – Graphe illustrant la relation entre les seuils absolus de sensations tactile et auditive et le registre du violon (adapté de Gescheider, 1997)

Contrairement au système auditif pour lequel le rôle de la fréquence comme dimension perceptive (i.e. la « hauteur ») est très important, le sens tactile n'est pas bon pour discriminer des fréquences ; et cette faculté décroît à mesure que la fréquence augmente. Alors que la fraction de Weber – ici au sens du rapport entre seuil différentiel et fréquence de la stimulation – est de l'ordre de 3% concernant la modalité auditive, elle est plutôt de l'ordre de 30% pour le sens tactile (Verrillo and Gescheider, 1992).

Contrairement au système auditif dont le domaine de fonctionnement couvre une large

gamme d'intensités d'environ 120 dB, le sens vibrotactile n'est sensible que sur un intervalle d'environ 55dB au-dessus du seuil de détection, au-delà duquel les vibrations deviennent inconfortables ou douloureuses (Verrillo and Gescheider, 1992). La faculté sensorielle à discriminer deux intensités est communément appelée *just noticeable difference* (JND) en intensité. Un nombre important de valeurs de JND en intensité du sens tactile a été reporté dans la littérature. Ces valeurs sont généralement comprises entre 1 et 4 dB selon la procédure expérimentale adoptée (Craig, 1974; Gescheider et al., 1992). Les similarités constitutives des deux modalités sensorielles amènent Von Békésy à dire que les ressentis de l'intensité sonore et tactile pourraient émaner d'un même processus de traitement de l'information pour les deux sens.

Par ailleurs, Gescheider (1966, 1967a, 1967b) a montré que les deux modalités auditive et tactile présentaient des seuils de résolution temporelle bien différents : deux stimuli auditifs d'égale intensité sont perçus distincts s'ils sont séparés d'environ 2ms alors que l'on s'attend plutôt à 10-12 ms pour distinguer deux stimulations tactiles.

### 1.2.2 Importance du tactile chez les musiciens

Gaser and Schlaug (2003) ont comparé les structures du cerveau de musiciens (professionnels et amateurs) avec celles de non musiciens. Il en ressort que le volume de matière grise varie grandement entre les deux types de population dans les régions cérébrales dédiées aux tâches motrice, auditive et visio-spatiale. Cette comparaison met en lumière le fait que le cerveau des musiciens peut présenter des changements structurels dus à la répétition sur le long terme de tâches musicales qui entraînent une grande sollicitation de certaines régions cérébrales. En ce sens, il a été montré que l'information tactile joue un rôle clef dans la performance musicale, comme le démontre l'hypertrophie de l'aire de représentation du doigt chez les instrumentistes à cordes (Elbert et al., 1995).

Deux types de toucher doivent être distingués. Le toucher actif, également appelé perception haptique, représente la combinaison d'indices apportés par les récepteurs tactiles et kinesthésiques impliqués dans la manipulation active d'objet. Lorsque des stimuli sont présentés à un observateur stationnaire, les indices issus des récepteurs tactiles constituent ce que l'on appelle le toucher passif (Weisenberger 2001, p. 536). Notons que les deux types de toucher actif et passif sont par nature impliqués dans le jeu du violon : le toucher actif principalement grâce au maniement actif de l'archet à la main droite et aux doigtés effectués à la main gauche, et le toucher passif principalement grâce au retour vibrotactile lors du jeu. Le sens haptique est connu pour devenir de plus en plus développé au cours de la professionnalisation comparé au toucher passif (e.g., Keele 1973; Hollerbach 1990).

En situation de jeu musical, le retour vibrotactile est considéré comme un mécanisme de retour sensoriel important pour les musiciens car il leur permet de faire l'expérience de leur jeu et de le contrôler. Askenfelt and Jansson (1992) ont mis en évidence le fait que les vibrations de plusieurs instruments de musique - dont le violon - pouvaient théoriquement être ressenties par les joueurs. Ils avancent l'idée que le retour vibrotactile joue un rôle important dans le jeu d'ensemble (où entendre son propre son n'est pas toujours possible) et dans la coordination des

tempi. Goebel and Palmer (2008) ont étendu ces conclusions en soulignant l'importance du retour tactile dans la précision de la synchronisation pour les pianistes. Les études de Chafe (1993) sur le violoncelle ont montré que les indices vibrotactiles dans la main gauche des musiciens les rendent sensibles à l'articulation du discours musical (e.g. changement de coup d'archet). Mais, comme constaté par Baader et al. (2005), les études concernant le rôle des indices tactiles dans le jeu des instruments traditionnels restent assez rares dans la littérature. En revanche, la littérature sur les instruments électroniques (sans caisse de résonance acoustique) a, elle, souvent montré les bénéfices apportés par la présence du retour vibrotactile, en particulier pour les joueurs d'instruments à cordes. Il est montré que le retour vibratoire, même sur un instrument électronique, constitue non seulement une information importante pour contrôler les gestes musicaux et la synchronisation (Chafe, 1993), mais que cela contribue également à augmenter le réalisme du jeu (Gillespie, 1999; Bongers, 1998). En particulier, le design des instruments de musique augmentés par ordinateur tendent à reproduire un retour vibrotactile pour que le ressenti physique caractérisant les instruments traditionnels s'en trouve sinon restitué du moins imité (O'Modhain, 2000). Entre autres, l'interaction complexe caractérisant le frottement de l'archet sur la corde à la base du retour vibratoire dans la main droite a été beaucoup documentée. (Nichols, 2002; Florens, 2004; Sinclair et al., 2011).

Cependant, comme le font remarquer Branje et al. (2010) “although the influence of vibration has been studied recently with respect to the production of music using virtual instruments, its potential contribution to perception of music is relatively unknown” (p. 155). En particulier, très peu d'études ont été conduites sur le rôle de la modalité tactile dans l'évaluation des instruments de musique. Un article a particulièrement retenu notre attention car bien que traitant du piano, les interprétations proposées méritent que l'on s'y attarde. Dans « Quality assessment of musical instruments – effects of multimodality » (2001), Galemba s'intéresse au rôle des retours auditif, tactile (et visuel) dans l'évaluation de qualité des pianos. L'auteur décrit une expérience de perception et d'évaluation pionnière — conduite à la fin des années 70 dans l'usine de piano de Leningrad en Russie — mettant en évidence l'importance non soupçonnée de la contribution d'indices purement tactiles à l'évaluation des qualités du piano chez 12 pianistes professionnels. Trois conditions expérimentales ont été testées. (1) Les participants devaient évaluer trois pianos (Steinway, Bechstein, Leningrad) en situation normale de jeu. L'évaluation consistait en une verbalisation libre de leurs impressions et en la notation, entre autres, de la qualité sonore et du confort de jeu des pianos. (2) Les pianistes devaient évaluer les trois pianos en les écoutant assis derrière un rideau acoustiquement transparent. L'évaluation s'est donc faite en situation d'auditeur, et à l'aveugle. L'évaluation consistait d'une part à identifier les pianos entendus et d'autre part à les classer par préférence. (3) Les pianistes devaient identifier les instruments en les jouant les yeux bandés, puis à nouveau les jouer, toujours en aveugle, mais également « en sourd ». Les musiciens ont en effet été rendus sourds à leur jeu par le port d'un casque diffusant du bruit blanc. Les résultats de l'expérience montrent qu'en condition normale, le piano Steinway est systématiquement jugé meilleur du point de vue du timbre. Aucune distinction claire n'est faite entre les pianos en ce qui concerne le confort de jeu. Rappelons que dans cette condition les pianistes pouvaient aussi voir les instruments. En situation d'auditeurs, les pianistes apparaissent

incapables d'identifier les pianos. De manière très surprenante, il apparaît au contraire que les pianistes ont facilement réussi à identifier les instruments lorsqu'ils les jouaient en aveugle et en sourd. Dans cette dernière condition, ils ne pouvaient donc ni entendre le timbre, ni les reconnaître à la vue. Galembo conclut que les joueurs confondent l'information kinesthésique provenant du retour tactile avec l'information auditive renseignant sur le timbre. Il souligne également que des indices visuels pourraient également interférer dans l'évaluation du son et du confort de jeu des pianos (d'où l'intérêt du rideau opaque et du bandeau sur les yeux). Mentionnons également que Keane et Dodd (2011) sont parvenu à des conclusions similaires en étudiant l'influence de la diminution des vibrations des touches d'un piano sur la perception et l'évaluation de pianistes. Cette étude est développée au paragraphe 0.3.2.

Ces travaux illustrent bien que la frontière entre le rôle d'un sens isolé et celui des sens couplés est difficile à déterminer.

### 1.3 Intégration audiotactile

Nous sommes en permanence bombardés d'informations nous parvenant par tous nos sens. Notre perception unifiée et cohérente du monde alentour n'est pas issue de la somme brutale de la perception de chacun de nos sens pris isolément mais provient plutôt de l'intégration de la diversité des données sensorielles dans notre cerveau. L'intégration perceptive multimodale, encore appelée intégration multisensorielle, correspond au mécanisme de traitement des multiples dimensions relatives à un objet ou un événement, soit l'intégration des différents signaux provenant des sens (Lewkowicz and Ghazanfar, 2009). Ce traitement élaboré de l'information a été beaucoup documenté ces dernières années (voir Calvert et al. 2004 pour une revue). En particulier, on retient que ce processus d'intégration nécessite une synchronisation spatio-temporelle des activations et que cette intégration est d'autant plus forte que les signaux sont de faible intensité (principe d'efficacité inverse ; pour une revue sur les conditions nécessaires à l'intégration perceptive, voir Stein and Meredith 1993).

Saldana et Rosenblum (1993) ont suggéré que l'intégration multisensorielle pourrait être facilitée chez les musiciens. Nombre d'études basées sur des techniques d'imagerie ont en particulier montré que les interactions audiotactiles peuvent être très différentes entre deux groupes de sujets possédant des niveaux d'expertise différents (e.g. musiciens vs. non-musiciens, musiciens entraînés vs. non-entraînés (Pantev et al. 2009; Musacchia et al. 2008; Herholz and Zatorre 2012).

#### 1.3.1 Caractéristiques générales

Comparées aux interactions audio-visuelles ou visio-tactiles, les interactions entre audition et sens tactile ont été moins explorées jusqu'à présent sur le plan comportemental et neuronal (voir Kitagawa and Spence 2006; Soto-Faraco and Deco 2009, pour des revues sur le sujet). Pourtant, dans la vie de tous les jours, la possibilité pour que des interactions entre ces deux sens aient lieu est assez forte étant donné que la plupart des activités à l'origine des sensations tactiles produisent également des sons. Mais la perception de ces événements multisensoriels étant souvent

dominée par une des deux modalités — on dira par exemple que la performance musicale est principalement auditive alors que la perception de la texture d’une surface est principalement tactile — ceci a pour conséquence que nous ne sommes pas toujours conscients des interactions audio-tactiles existant dans des situations naturelles (Lütkenhöner et al., 2002). Dans le présent travail nous nous intéresserons à l’influence des informations tactiles sur la perception auditive. L’hypothèse que nous formulons est que les violonistes sont particulièrement attentifs au son qu’ils produisent, et de ce fait ne sont pas toujours conscients de la nature vibratoire de leur instrument.

De nombreuses recherches sur les mécanismes neuronaux sous tendant la perception audio-tactile ont été conduites. On note en particulier l’importance des études concernant les influences tactiles sur l’activité neurale dans le cortex auditif. La question posée de manière récurrente est de savoir à quel moment ces interactions apparaissent au cours du processus de traitement de l’information sensorielle dans l’architecture fonctionnelle. De nombreuses études, utilisant une grande variété de techniques de mesures de l’activité cérébrale (fMRI, MEG) ont démontré que des événements tactiles pouvaient influencer l’activité auditive au cours des premières étapes du traitement cortical (e.g. Kayser et al. 2005; Caetano and Jousmäki 2006). Les interactions audiotactiles pourraient donc avoir lieu au sein même du cortex auditif.

Que ce soit dans le cas de l’influence de stimuli auditifs sur la perception tactile ou de stimuli tactiles sur la perception auditive, les interactions audiotactiles sont étudiées dans des tâches comportementales de bas niveau (dans le domaine spatial et dans le domaine temporel) telles les tâches de détection et/ou discrimination de l’information auditive ou tactile (e.g. intensité ou texture) ou encore les illusions perceptives audiotactiles. Que l’étude porte sur l’influence de l’auditif sur le tactile ou inversement, l’analyse des temps de réponse et des pourcentages de bonnes réponses ont montré un avantage de la situation bimodale sur la condition unimodale (e.g. Ro et al. 2009; Gillmeister and Eimer 2007), résultat classiquement observé dans la littérature sur la perception multisensorielle. De nombreux chercheurs remarquent également que les performances augmentent lorsque les deux stimuli ont la même fréquence (e.g. Ro et al. 2009; Yau et al. 2010). Dans le cas du jeu du violon, les deux types de stimuli étant générés par le même mécanisme – frottement de l’archet sur la corde – ils sont à la même fréquence.

Un aspect de la perception bimodale audiotactile ayant fait l’objet de nombreuses recherches est la perception de l’intensité d’un stimulus. En particulier, de nombreux travaux se sont attachés à mieux comprendre comment cette dimension perceptive, commune à beaucoup de modalités sensorielles, est codée en fonction de la modalité impliquée. Marks a par exemple tenté à plusieurs reprises de quantifier la similarité perceptive de l’intensité entre les différentes modalités et de déterminer à quel point ces équivalences intermodales pourraient être considérées comme absolues (Marks et al., 1986; Marks, 1988). Sur la base des similarités entre audition et toucher déjà mis en évidence par Von Békésy, Marks et ses collègues ont montré que la sonie et l’intensité vibratoire ne sont pas seulement des attributs dépendant d’autres dimensions du stimulus (comme la hauteur) mais qu’elles dépendent également du contexte (i.e. gamme d’intensités présentées). Par ailleurs, Gillmeister and Eimer (2007) ont étudié l’influence des stimuli



tactiles sur la perception de la sonie. Les jugements en sonie apparaissent systématiquement augmentés lorsque des stimuli tactiles sont présentés en même temps que les sons, par rapport à une condition de référence où aucun stimulus tactile n'est utilisé, et ce particulièrement lorsque le niveau des stimuli est proche du seuil de détection (ceci confirme le principe d'efficacité inverse, Stein and Meredith 1993). Ce résultat démontrant l'augmentation de l'intensité auditive perçue avec la présence synchronisée de vibration se retrouve dans plusieurs études (e.g. Schürmann et al. 2004; Okazaki et al. 2012; Yau et al. 2010). Dans le cas du jeu et de l'évaluation du violon, l'intensité sonore correspond a priori au critère de « puissance sonore ».

Le toucher, au même titre que le goût, est considéré comme un sens de contact : la proximité ou le contact entre l'objet et la peau est nécessaire pour qu'une sensation apparaisse. Le corps étant impliqué dans l'émergence de la perception tactile, les interactions audition/toucher se produisent nécessairement dans l'espace proche du corps, périmètre appelé « espace péripersonnel » (Cardinali et al., 2009). Les êtres humains étant plus vigilants lorsque des événements se produisent dans leur espace péripersonnel, il leur est plus difficile d'ignorer des événements audiotactiles que des événements audiovisuels, qui eux se produisent principalement dans l'espace distal. Cela s'applique au jeu du violon, dans lequel les signaux auditifs et tactiles reçus par le violoniste sont spatialement proches.

En résumé, dans le cas des violonistes, si cette interaction audiotactile peut être subtile et inconsciente chez certains musiciens, d'un point de vue pratique, on note tout de même que toutes les conditions sont réunies pour qu'une intégration ait lieu.

### 1.3.2 En situations concrètes

Notons que la plupart des études précédemment citées ont été menées en situation de laboratoire, c'est-à-dire que les participants accomplissaient une tâche relativement simple, dans un environnement n'offrant aucune distraction, ce qui contraste avec la plupart des situations réelles (Ho and Spence 2012, Chap 7, pp 84-85.). Ces études reposent ainsi en grande partie sur des procédures classiques de psychophysique.

Plus rarement, des études menées sur des situations un peu plus quotidiennes se basent sur la manipulation/modulation de stimuli. En ce sens, on peut citer par exemple la fameuse expérience de Jousmäki et Hari (1998), mieux connue sous le nom de « parchment skin illusion », montrant que le retour auditif peut influencer les jugements tactiles sous certaines conditions. Dans cette expérience, les participants devaient se frotter les mains l'une contre l'autre en écoutant au casque un retour sonore modulé de leur action, et noter la sensation de moiteur/rugosité de leur peau. La manipulation auditive a consisté à altérer le contenu fréquentiel de certaines bandes acoustiques émanant du son produit par la friction des deux mains. Les auteurs montrent que la perception de la paume de la main des sujets s'est trouvée significativement affectée par la modification du retour sonore : la peau a été perçue plus molle et sèche lors d'une augmentation du niveau sonore global et plus dure et moite lorsque les sons ont été atténués. Une autre expérience abordant la question de l'utilisation de stimulation acoustique pour moduler la sensation tactile a montré que les indices auditifs pouvaient moduler les jugements des participants sur le caractère agréable de l'utilisation d'une brosse à dent (Zampini et al., 2003) ou encore sur le caractère croustillant

d'une chips (Zampini and Spence, 2004). A notre connaissance, aucune étude n'a cependant abordé la question de la manipulation de signaux tactiles pour moduler la perception auditive. La présente thèse présentera la première étude du genre.

Quelques équipes se sont attachées à mettre en évidence des phénomènes d'intégration audio-tactiles dans des tâches proches de celles réalisées lors du jeu instrumental. Giordano et al. (2010) ont par exemple montré que les percussionnistes intègrent les informations auditive et tactile pour contrôler la vitesse de frappe d'un objet ; et que la modalité tactile apparaît comme le sens dominant dans ce type de tâche. Récemment, Huang et al. (2012) ont montré que les informations auditive et tactile sont intégrées dans des tâches de reconnaissance de rythmes musicaux ; et que la modalité auditive apparaît comme le sens dominant dans ce type de tâche. En réel contexte musical, le travail de Keane et Dodd (2011) a mis en évidence que les informations auditive et tactile sont intégrées chez les pianistes dans une tâche d'évaluation de pianos. A la suite de mesures d'accélération sur des pianos droits et à queue montrant un niveau de vibration sur les touches des pianos droits très supérieur à celui existant sur des pianos à queue, les deux chercheurs ont fait l'hypothèse qu'une façon d'améliorer les pianos droits serait de diminuer les vibrations de leurs touches. Dans l'expérience perceptive décrite dans « Subjective assessment of upright piano key vibration », les auteurs ont essayé de valider perceptivement les modifications de clavier apportées à certains des pianos droits. 24 pianistes de rangs d'expertise différents (ayant entre 6 et 68 années de pratique du piano) ont joué et évalué des pianos droits au cours de deux sessions ; ils avaient à les comparer par paires. Pour la seconde session, le clavier d'un des pianos de la paire avait été modifié (l'unique différence entre les deux pianos d'une paire résidant alors dans le niveau de vibration des touches). Les résultats montrent que pour les pianistes les deux pianos présentaient alors une différence dans le son et la puissance sonore (alors que les mesures effectuées sur les instruments attestent que les propriétés du son du piano modifié n'avaient pas été affectées). Il apparaît donc que les pianistes n'accordent en règle générale que très peu d'importance (consciente) au toucher lors de l'évaluation d'un piano.

## 1.4 Positionnement de l'étude et problématiques

Au cours de ces trois années de thèse, nous nous sommes attachés à étudier le « ressenti » vibratoire du violoniste en situation de jeu et d'évaluation d'un instrument. Compte tenu de la complexité du sens tactile impliqué dans le jeu du violon, nous avons fait le choix d'axer cette étude principalement sur la main gauche des violonistes et le manche du violon, comme une première étape dans la compréhension du phénomène de « ressenti » musical : en contact avec la main, le manche d'un violon est le lieu d'une réponse vibratoire.<sup>2</sup>

Nous avons souhaité aborder l'étude du « ressenti » vibratoire du violoniste sous divers angles - mesures vibratoires sur les violons, confrontation de certaines de ces mesures physiques avec des mesures sur les sensations tactiles des violonistes, et expériences comportementales portant sur la perception tactile (et auditive) des violonistes en situation de jeu et d'évaluation des violons – afin de présenter le phénomène de la façon la plus large possible. Ce travail est donc avant tout expérimental. Le lecteur se référera à l'Annexe A pour une présentation des traitements statistiques conduits sur les données expérimentales recueillies au cours de cette thèse.

Ce manuscrit est composé de cinq parties (comprenant l'introduction et la conclusion). Composée de deux chapitres, chacune des trois parties centrales possède un avant-propos qui expose les problématiques liées à la partie et aide à son insertion dans la démarche globale adoptée pour la thèse.

La Partie 2 confronte des mesures vibratoires effectuées sur les violons avec les seuils de sensation tactile mesurés sur des violonistes (Chapitre 1) afin de déterminer si le retour vibratoire au manche (niveau de vibration perceptible par la main lors du jeu) est une caractéristique propre de chaque violon (Chapitre 2).

La Partie 3 est consacrée à l'expérience perceptive mise en place pour comparer le rôle des modalités auditive et tactile impliquées dans le jeu et l'évaluation des violons. Le Chapitre 3 est présenté sous la forme d'un article intitulé *Investigating the role of the auditory and the tactile modalities involved in violin quality evaluation* (actuellement en révision pour resoumission). Le Chapitre 4 met en rapport les mesures vibratoires réalisées sur les violons de l'expérience et les données perceptives recueillies à l'issue de l'expérience.

La Partie 4 reporte la mise en place expérimentale et les résultats d'une expérience portant sur le caractère multisensoriel de la perception des violonistes lors de l'évaluation d'un violon. Le Chapitre 5 est présenté sous la forme d'un article intitulé *Investigating the role of vibrotactile feedback in modulating some perceptual features of violins* (soumis pour publication). Le Chapitre 6 complète le Chapitre 5 en explorant l'origine des différences inter-individuelles observées dans les jugements perceptifs.

---

2. Notons par ailleurs que le manche peut être décrit par ses qualités ergonomiques propres (e.g. largeur, épaisseur, courbure, contact plus ou moins lisse) qui peuvent intervenir dans le ressenti, mais nous laisserons cet aspect de côté dans la présente étude.



## Deuxième partie

# Etude du retour vibratoire au manche



# Avant-propos

Dans la partie introductive de cette thèse, nous avons vu que plusieurs études mécaniques (ou acoustiques) évoquant la notion de « ressenti » d'un violon ont en commun de se concentrer sur les vibrations des manches de violon ; ces études suggèrent que la perception de ces vibrations par la main gauche tenant le manche est à l'origine du « ressenti » du violon. Cependant, les études abordant cette question du « ressenti » se sont jusqu'ici limitées à la caractérisation acoustique et mécanique de la structure instrumentale, d'un point de vue physique. Or le « ressenti » impliquant la présence du musicien, il nous a semblé nécessaire de compléter ces recherches en mettant en rapport des mesures vibratoires effectuées de façon pertinente sur les violons avec ce que nous savons ou mesurons de la physiologie du système haptique, puis de confronter les résultats obtenus à l'évaluation faite par violoniste professionnel.

A notre connaissance, une seule étude a tenté d'établir des liens entre les mesures physiques classiquement réalisées sur les instruments de musique et des mesures psychophysiques traduisant la sensation humaine. Askenfelt and Jansson (1992) se sont intéressés aux amplitudes de vibration de quatre instruments à cordes — la contrebasse, le violon, la guitare et le piano — existant typiquement lors d'une situation de jeu ; les niveaux mesurés ont été comparés aux seuils de détection de stimuli vibrotactiles reportés par Verrillo (1971). Différents points de mesure ainsi que différentes dynamiques de jeu (de *p* à *ff*) ont été testés sur les instruments. Bien qu'il existe des différences certaines de niveaux de vibration entre les quatre instruments, les résultats démontrent que les amplitudes de vibrations enregistrées sont globalement supérieures au seuil de sensibilité à tous les points de mesure. En particulier, les niveaux de vibration de quatre manches de violons mesurés dans la direction normale au côté du manche (par la suite appelée direction « horizontale ») à l'aide d'un accéléromètre pendant le jeu, se sont révélés être au-dessus ou proches du seuil sur la plage de fréquences considérées. Ce résultat atteste l'existence d'un retour vibratoire perceptible par la main gauche des violonistes lors du jeu.

On peut alors s'interroger sur ce qui distingue la réponse vibratoire d'un violon de celle d'un autre violon. Autrement dit, existe-t-il un retour vibratoire propre au violon joué ? En particulier la question de savoir si les violonistes pourraient parvenir à discriminer des instruments en fonction des vibrations ressenties par leur main gauche est soulevée. On note cependant que l'étude conduite par Askenfelt et Jansson (1992) n'est pas suffisante pour répondre à ces questions, principalement pour deux raisons. D'une part, les niveaux de vibrations des manches des violons ayant été mesurés directement en situation de jeu — par analyse spectrale de l'enregistrement d'un Sol à vide, 196 Hz, joué à l'archet pendant quelques secondes — ils ne sont obtenus que pour les harmoniques de la note jouée ; l'étude se limitant à l'intervalle de sensibilité de la peau [0 - 1000] Hz, les courbes de niveaux sont basées sur cinq points seulement. La discrimination entre les violons s'en trouverait donc limitée. D'autre part, les mesures vibratoires effectuées sont toutes comparées à la courbe de seuil mesurée sur le bout de l'index par Verrillo (1971). Or, comme les auteurs le reconnaissent eux-mêmes, la courbe de seuil utilisée dans cette étude

n'est pas vraiment appropriée. En effet, plusieurs paramètres physiques (comme la surface de contact entre la peau et l'objet vibrant ou encore la pression exercée sur lui) ont été identifiés comme déterminants dans la sensibilité de la peau humaine à la vibration ; ces différents facteurs pourraient être pris en considération pour adapter la courbe de seuil au cas de la tenue du manche de violon, faisant l'objet de notre étude.

L'ensemble des deux chapitres de cette section constitue une étude descriptive ayant pour but de caractériser le retour vibrotactile existant dans la main gauche des violonistes. Pour ce faire, nous avons adopté la même démarche générale que Askenfelt et Jansson, en recourant à des procédures expérimentales mieux adaptées à nos problématiques.

Le Chapitre 1 présente les mesures des seuils absolus de détection vibrotactiles réalisées sur la main gauche de 14 violonistes. Les facteurs physiques déterminant la sensibilité de la peau dans le cas de la tenue du manche de violon y sont examinés.

Le Chapitre 2 est avant tout dédié à la caractérisation d'un ensemble de violons. Ceci implique le report (1) d'un test perceptif conduit avec un violoniste professionnel pour recueillir ses impressions (en particulier son « ressenti » vibratoire) lors du jeu de chaque instrument, et (2) des mesures de niveaux de vibration réalisées sur les chevalets et manches des violons de l'étude (une partie est présentée en Annexe B). Les mesures vibratoires sont alors discutées par rapport au seuil de sensation vibrotactile dans le but d'explorer si les sensations perceptives du violoniste pourraient être liées au comportement vibratoire mesuré des violons relatif au seuil.



# Seuil(s) absolu(s) de sensibilité vibrotactile dans la main gauche des violonistes

---

## 1.1 Introduction

Plusieurs paramètres physiques ont un impact sur la sensibilité de l'humain à la vibration : la fréquence de la stimulation, la partie du corps en contact avec la vibration, la surface de contact entre la peau et l'objet vibrant, ainsi que la pression qui lui est appliquée.

Il apparaît nécessaire de mesurer les seuils de sensibilité directement sur la main gauche des violonistes pour tenter de quantifier le retour vibrotactile perceptible au niveau du manche de différents violons. Les quatre facteurs déterminant la sensibilité de la peau précédemment cités sont étudiés dans le cas de la tenue du manche de violon par les violonistes. Les seuils absolus de détection vibrotactile sont ensuite déterminés sur la main gauche, dans une situation expérimentale imitant une situation normale de tenue de l'instrument, suivant une procédure classique de psychophysique.

Par facilité de langage, nous emploierons indifféremment les expressions « seuil absolu » et « seuils absolus » de sensibilité à la vibration pour parler de la courbe des amplitudes de vibration minimales perçues par la main gauche des violonistes en fonction de la fréquence.

## 1.2 Paramètres physiques influençant le seuil de sensibilité de la main

### 1.2.1 Zone du corps humain

La zone du corps en contact avec la vibration est un des facteurs principaux influençant la sensibilité tactile. Les bouts des doigts ainsi que la région faciale sont en particulier identifiés comme les parties du corps les plus sensibles (e.g. Weinstein 1968; Sherrick and Cholewiak 1986; Verrillo and Gescheider 1992). Dans le cas particulier de la tenue du manche de violon, une phalange du pouce et la base de l'index sont généralement en contact continu avec le manche. La figure 1.1 illustre quelques types de tenue du manche en première position lors du jeu de la corde de Sol. Les photos ont été prises sur des violonistes professionnels ayant participé à l'expérience présentée en 1.2.3.



FIGURE 1.1 – Exemple de tenue du manche lors du jeu sur la corde de Sol

Ces photos font apparaître différents types de positionnements de la main gauche sur le manche. En particulier, le choix de la partie du pouce en contact avec le manche varie d'un violoniste à l'autre. Cela illustre le fait que, comme pour tout autre geste instrumental, différentes écoles coexistent quant à la tenue du manche par la main gauche.

### 1.2.2 Surface de contact

La surface de la peau impliquée dans le contact avec la vibration détermine également la sensibilité de la peau : plus cette surface est grande, plus la sensibilité à la vibration augmente (Verrillo, 1963). Dans l'étude de Verrillo (1971), la surface du bout du doigt en contact avec la vibration est de  $28\text{mm}^2$ , ce qui est très inférieur aux quelques  $5\text{cm}^2$  en moyenne impliqués dans le cas de la tenue du manche d'un violon (la surface exacte de recouvrement du manche par l'index et le pouce variant bien sûr d'un violoniste à l'autre, comme illustré sur la figure 1.1).

### 1.2.3 Pression appliquée

La pression de la peau appliquée sur la surface vibrante est un troisième facteur ayant un impact sur la sensibilité mesurée : une pression plus forte entraînant une plus grande sensibilité à la vibration (Verrillo, 1962; Maeda and Griffin, 1994). Dans l'étude de Verrillo (1971), le bout de doigt ne faisait qu'effleurer la surface vibrante alors que la main gauche du violoniste

	Sol		Do	
	pouce	index	pouce	index
Force médiane (N)	0.15	0.45	0.40	1.53
Ecart-type (N)	1.31	0.80	0.71	2.40

TABLE 1.1 – Valeurs médianes de forces appliquées respectivement par le pouce et l’index lors du jeu des notes Sol (196 Hz) et Do (261 Hz) en *mf*

tenant le manche peut en permanence appliquer une petite pression. La pression appliquée étant proportionnelle à la force appliquée (par l’intermédiaire de la surface de contact, supposée constante) nous confondrons dans ce paragraphe les termes « pression » et « force ».

Des valeurs typiques de force appliquée lors de la tenue du manche du violon ont été mesurées sur 13 violonistes semi professionnels ou professionnels (âge moyen = 35 ans, écart-type = 11 ; nombre d’année de pratique moyen = 28, écart-type = 10). Un seul et même violon a été utilisé pendant toute la campagne de mesures. Les violonistes ont été invités à jouer continuellement un Sol (196 Hz, corde à vide), puis un Do (261 Hz, 3ème doigt sur la corde de Sol) en *mezzo forte*. Pour chacune de ces notes, les forces appliquées aux deux points de contact entre la main et le manche (c’est-à-dire sous le pouce et sous l’index) ont été enregistrées et moyennées sur un intervalle de 3 secondes.

Ces mesures ont été effectuées à l’aide des capteurs piézoélectriques (FlexiForce, Tekscan), longues bandes flexibles dont la zone sensible se présente sous la forme d’un disque de 1cm de diamètre. Ce disque a été délicatement placé sous le doigt des violonistes de telle sorte qu’il soit complètement recouvert par ce dernier (voir figure 1.2). Le calibrage du dispositif et les acquisitions ont été réalisés à l’aide du logiciel ELF (Tekscan).



FIGURE 1.2 – Mesure de pression sous le pouce à l’aide d’un capteur FlexiForce

Le tableau 1.1 indique que la force appliquée par l’index est généralement plus forte que celle appliquée par le pouce pour les deux types de notes jouées (corde à vide ou avec doigté). Cependant cette force peut être très différente d’un violoniste à l’autre, comme en témoignent

les très grandes valeurs des écart-types calculés. Ainsi, certains violonistes tiennent à peine le manche quand d'autres le serrent beaucoup (mais même dans ce dernier cas, la force appliquée n'excède jamais 5N). Ces mesures étant réalisées sur des violonistes (semi) professionnels, on peut raisonnablement supposer que leur posture est plus détendue que celle de violonistes moins expérimentés, qui auraient été plus crispés, et pour lesquels la force exercée sur le manche aurait certainement été plus grande.

Par ailleurs, on observe que les forces de tenue de manche sont inférieures à celles relevées en moyenne par Kinoshita and Obata (2009) au bout des doigts de la main gauche appuyant sur les cordes (e.g. de l'ordre de  $5\text{ N} \pm 2\text{ N}$  lors du la répétition d'une note en *mf* à un tempo de 2 Hz), ce qui n'est pas surprenant. Les forces de tenue mesurées dans notre étude ne sont cependant pas négligeables, elles sont supérieures à celles correspondant à l'étude de Verrillo (1971), que l'on peut supposer (l'auteur ne donnant pas de valeur précise) être de l'ordre de 0.1 N.

Notons pour finir que l'étude conduite à différentes dynamiques de jeu (de *p* à *ff*) sur un violoniste n'a pas montré d'effet particulier de la nuance sur la force appliquée.

## 1.3 Mesure du seuil absolu de sensibilité vibrotactile dans la main gauche des violonistes

### 1.3.1 Participants

Quatorze violonistes expérimentés ont pris part à l'expérience : huit femmes et six hommes. Les participants avaient entre 19 et 65 ans (âge moyen = 29 ans, écart-type = 13), leur nombre d'années de pratique du violon variaient entre 15 et 56 ans (nombre moyen = 23 ans, écart-type = 12). Aucun participant n'a reporté avoir de problème de sensation tactile. Les violonistes ont été payé pour leur participation.

### 1.3.2 Dispositif expérimental

Les seuils absolus de détection vibratoire sont mesurés en fonction de la fréquence dans une expérience de psychophysique. Le dispositif expérimental repose sur l'utilisation d'un manche de violon isolé du corps de l'instrument, ayant pour fonction de vibrer (voir figure 1.3). Il est demandé aux violonistes participant à l'expérience de tenir ce manche de violon classiquement en première position, comme lorsqu'ils jouent un Sol à vide. L'utilisation d'un vrai manche de violon, isolé du corps de l'instrument, est motivée par les raisons suivantes :

- Cela empêche l'excitation d'un corps du violon par le manche et donc la génération de son qui pourrait interférer avec la sensation vibratoire.
- Cela garantit que les violonistes ressentent les vibrations par la main gauche uniquement.
- Cela garantit que les violonistes utilisent la même surface de contact avec le manche vibrant qu'en situation normale de jeu.
- Cela garantit que les violonistes ont assez de repères (liés à la mémoire musculaire) pour exercer la même pression qu'en situation normale de jeu.

Le manche de violon est suspendu par ses deux extrémités par des fils de nylon très fins. Le manche est excité par un petit vibreur (Dayton Audio DAEX13 Mini Exciter Pair 13mm), positionné sur la touche et vibrant dans la direction normale au plan de la touche (direction  $z$ , verticale, sur la figure 1.3). Un casque anti-bruit est utilisé pour masquer les fréquences aigües rayonnées par le système (vibreur + manche).

Les seuils (en fonction de la fréquence) que nous cherchons à mesurer ici correspondent donc aux déplacements minimaux détectables par la main gauche en contact permanent avec le manche, i.e. une phalange du pouce et une phalange de l'index. Ces deux points de contact représentent ce qui sera simplement par la suite nommé la « main gauche des violonistes ».

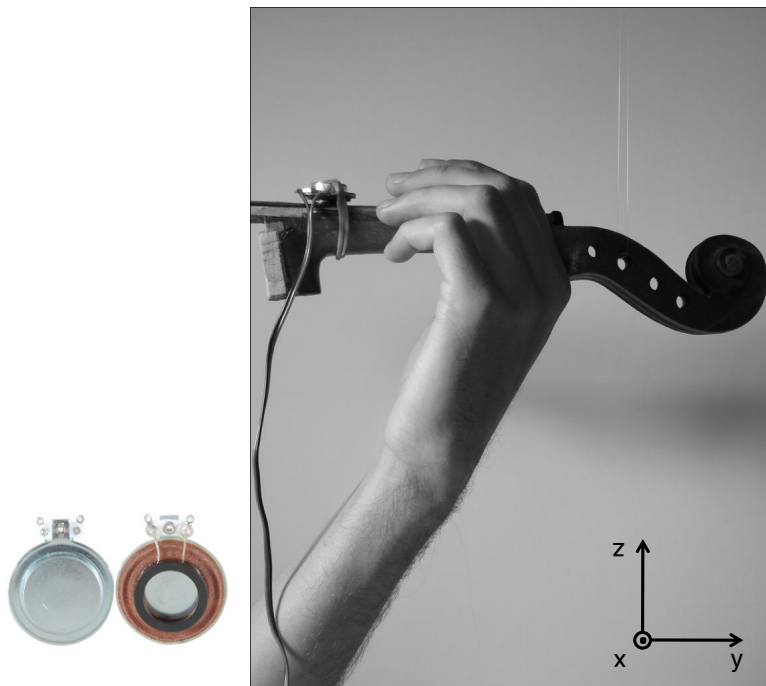


FIGURE 1.3 – Dispositif expérimental pour la mesure des seuils absolus de sensibilité à la vibration : manche de violon isolé excité par un petit vibreur

### 1.3.3 Procédure

Les seuils sont déterminés pour sept fréquences comprises entre 196 et 900 Hz, incluses dans l'intervalle de sensibilité de la peau. Les quatre premières fréquences sélectionnées correspondent aux fréquences des quatre cordes à vide du violon, soit 196 Hz, 293 Hz, 440 Hz and 659 Hz ; les trois autres sont 730 Hz, 800 Hz and 900 Hz, choisies pour couvrir la gamme de sensibilité tactile la plus large. Cependant, les mesures obtenues à 900Hz ont été retirées de l'analyse car le signal vibratoire s'est avéré produire un son (rayonné par le système) trop fort pour ne pas interférer avec la sensation vibratoire. Nous ne présenterons donc par la suite que les résultats des six premières fréquences d'étude.

Les seuils de sensation vibratoire sont évalués à l'aide d'une procédure classique à choix forcés,

à 3 alternatives (3AFC) implémentée sous Matlab. Une règle de suivi adaptatif (« three-down one-up ») permet d'estimer le point à 79% (de détections correctes) sur la fonction psychométrique (Levitt, 1971).

Sur un écran d'ordinateur, trois voyants lumineux s'allument successivement pour informer le participant de l'intervalle temporel au cours duquel la vibration pourrait être ressentie. La vibration correspond à un signal sinusoïdal très bref (600ms, avec des rampes de 30ms pour l'attaque et l'extinction), d'amplitude variable. L'intervalle de temps entre les blocs (« inter-stimulus interval ») est de 1s. Pour assurer une pression permanente sur le manche du violon, les participants doivent dire à haute voix dans quel intervalle – 1, 2 or 3 – le stimulus vibratoire a été perçu, et l'expérimentateur tape lui-même la réponse sur l'ordinateur. Les participants reçoivent à l'écran un retour visuel de la réponse entrée.

La différence en amplitude de deux stimuli vibratoires issus de deux essais successifs est déterminée par un facteur prédéfini, le « pas ». Ce pas est initialement assez large –  $2^{1/2}$  – pour assurer une convergence rapide autour du seuil. Lorsque la première inversion est atteinte (i.e. lorsque la première mauvaise réponse est donnée), le pas est diminué ( $2^{1/4}$ ). La procédure s'arrête automatiquement après huit inversions et le seuil est déterminé en prenant la moyenne des amplitudes des stimuli vibratoires au cours des six dernières inversions.

En début d'expérience, une mesure complète du seuil à la fréquence 440 Hz est réalisée afin de permettre aux participants de se familiariser avec la procédure expérimentale.

### 1.3.4 Calibrage

La correspondance entre accélération du manche à l'endroit de tenue lors de l'expérience et amplitude de vibration du signal alimentant le vibreur lorsque le seuil est atteint est établie après l'expérience, pour chaque participant, et chacune des six fréquences étudiées. Les mesures de correspondance sont réalisées à l'aide d'un accéléromètre 3D. Le fait de mesurer l'accélération du manche après l'expérience, c'est-à-dire sans la main du violoniste, n'est pas un problème ici car d'une part, la main du violoniste ne modifie pas significativement les fréquences de résonance du manche et d'autre part, s'il est vrai que la main peut amortir les niveaux de vibration de certains modes du manche (Marshall, 1986), ce sont précisément les niveaux sans amortissement parvenant à la main qui sont pertinents pour notre étude. Les deux petites surfaces de contact fixes lors de la tenue du manche — pouce et index — étant spatialement très proches, dans cette étude on considère qu'une seule grande surface est impliquée dans le contact ; nous choisissons de mesurer l'accélération à l'endroit où le violoniste place classiquement son index sur le côté du manche en première position puisque c'est à cet endroit-là que la pression appliquée par la main gauche est la plus forte.

Bien que le vibreur excite le manche dans la direction verticale (voir figure 1.3), les vibrations résultantes au point de contact index/manche pourraient apparaître dans toutes les directions. Nous faisons l'hypothèse que pour des fréquences supérieures à 50 Hz, comme c'est le cas ici, il n'est pas possible de discriminer les directions des vibrations perçues — e.g. tan-

gentielle ou normale au contact — une vibration est ressentie de manière globale. Il n'existe à notre connaissance aucune étude comportementale traitant de ces questions ; des considérations physiologiques soutiennent cependant cette hypothèse. Dans cette gamme de fréquences [196 - 900] Hz, la population des récepteurs Paciniens est à l'origine de la réponse neuronale (Lamore et al., 1986). Bien que les récepteurs Paciniens soient individuellement sélectifs aux directions de vibration, la population est distribuée dans des tissus si profonds, à des centimètres de la région de stimulation (Stark et al., 1998), que nous pouvons faire l'hypothèse que l'effet de la géométrie des conditions aux limites (c'est-à-dire la prise du manche dans la main) n'influence pas la propagation des ondes mécaniques excitant la population des Paciniens.

Ainsi, nous avons décidé de quantifier le stimulus vibratoire perçu par l'énergie du signal d'accélération parvenant à la main des violonistes tenant le manche de violon excité pendant l'expérience de mesure de seuil, soit la norme de l'accélération enregistrée selon les trois directions avec l'accéléromètre 3D : normale aux côtés du manche (direction  $x$  sur la figure 1.3), tangentielle au manche (direction  $y$ ) et normale à la touche (direction  $z$ ). Les valeurs de déplacement sont obtenues en micromètres par intégration du signal d'accélération (norme) puis converties en décibels, prenant une référence de déplacement de 1 micron.

## 1.4 Résultats

La figure 1.4 suivante présente la courbe de seuils absolus de sensation vibratoire mesurés sur la main gauche des violonistes en fonction de la fréquence, comparée à celles des seuils de sensibilité à la vibration mesurés au bout de l'index par Verrillo (1971). Notre courbe est basée sur les médianes des mesures faites sur les 14 participants aux six fréquences d'étude. Toutes les valeurs reportées représentent donc les amplitudes minimales de vibration perceptibles par la peau de la main gauche, en décibels. La courbe de seuil est extrapolée entre le dernier point de mesure (800 Hz) et la limite supérieure de l'intervalle de sensibilité tactile (1000 Hz).

Les deux courbes présentées sur la figure 1.4 ont des allures très similaires. En particulier, la pente des courbes est assez semblable (jusqu'à 700 Hz). La courbe de seuil de sensibilité à la vibration mesurée sur la main gauche des violonistes est, sans surprise, légèrement plus basse (de 3 à 10 dB) que celle obtenue sur le bout de l'index. Cela traduit une plus grande sensibilité de la main aux vibrations dans le cas de la tenue du violon que pour un doigt en contact direct avec le vibreur (Verrillo, 1971). Ceci pourrait être expliqué par le fait qu'une surface de contact plus grande ainsi qu'une plus pression plus importante (même si elle reste limitée) sont impliquées dans la présente expérience par rapport à celle conduite par Verrillo. La variabilité des seuils mesurés dans notre étude est assez faible (environ  $\pm 4$  dB), comme en témoignent les barres d'erreurs représentant les écart-types.

La sensibilité de la main gauche des violonistes semble augmenter légèrement entre 196 Hz et 293 Hz (diminution du seuil de détection). A cette fréquence, la peau de la main peut détecter des déplacements aussi petits que  $0,03 \mu\text{m}$ . La sensibilité maximale est atteinte ; elle se trouve dans la région située autour de 300 Hz, donc proche du pic de sensibilité des corpuscules Paciniens à

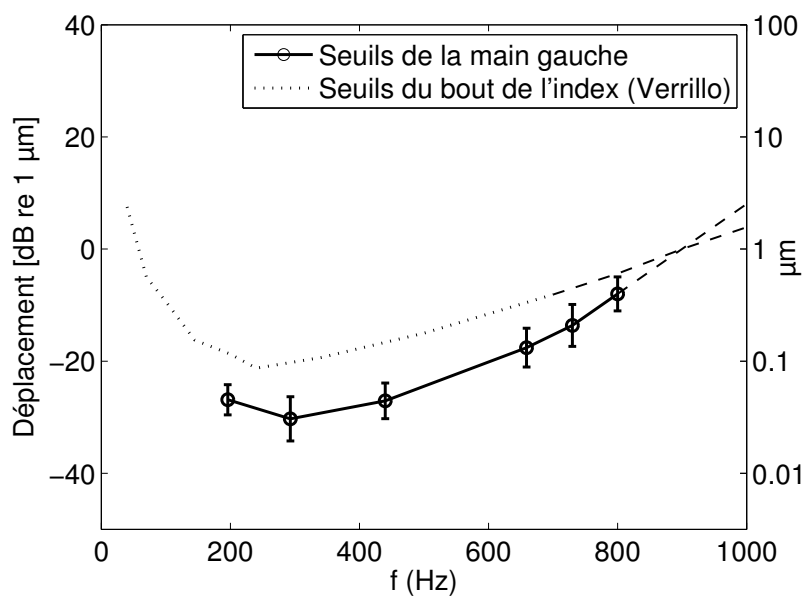


FIGURE 1.4 – Seuils absolus de sensation vibratoire mesurés sur la main gauche de 14 violonistes (trait plein) et mesurés sur le bout de l'index (trait en petits pointillés) (adapté de Verrillo (1971)). Les traits en grands pointillés représentent les seuils extrapolés. Les barres d'erreur représentent les écarts-type

250 Hz (Bolanowski et al., 1988). En effet, la courbe des seuils absolus extrapolée présente son minimum dans cette région fréquentielle. Au-delà de 300 Hz, et jusqu'à 800 Hz, la sensibilité mesurée décroît rapidement (i.e. le seuil absolu augmente), jusqu'à devenir impossible à mesurer.



## 1.5 Conclusion

Dans cette étude, les trois facteurs physiques dépendant du violoniste et ayant un impact sur la mesure du seuil de sensibilité vibrotactile ont été examinés : la zone exacte de la peau impliquée dans le contact, la surface de cette zone ainsi que la pression exercée par le pouce et l'index sur le manche.

Les seuils de sensibilité vibratoire ont été mesurés sur la main gauche de violonistes au sein d'une expérience psychophysique, conduite dans une situation expérimentale approchant des conditions normales de tenue du manche, ce qui maximise la validité écologique de la mesure. La courbe de seuil de sensibilité ainsi obtenue présente une allure très semblable à celle mesurée par Verrillo (1971 sur le bout de l'index, mais elle se trouve entre 3 et 10 dB en dessous ce qui traduit une sensibilité plus grande aux vibrations (les paramètres dépendant du sujet et ayant une influence sur la valeur des seuils étant différents d'une condition expérimentale à l'autre).

Cette étude nous a donc permis d'affiner la courbe de seuil de sensation utilisée par Askenfelt et Jansson pour examiner par la suite le retour vibratoire des violons relativement au seuil de sensibilité des violonistes en situation de jeu. Ce point fait l'objet du chapitre suivant.



# Retour vibrotactile : vers la discrimination des violons

---

## 2.1 Introduction

En 1985, Marshall faisait l’hypothèse que le “ressenti” d’un violon est principalement déterminé par les premiers modes de vibration du violon, particulièrement ceux qui impliquent une participation importante de la partie manche/touche et/ou du corps. L’année suivante, Marshall (1986) postulait que le nombre d’occurrences de résonances vibratoires perçues par la main gauche (ie supérieures au seuil de sensibilité) constituent des indices importants pour la perception et l’évaluation du caractère “vivant” d’un violon, nécessaire pour procurer un “ressenti” agréable. Mais, bien que Askenfelt et Jansson (1992) aient par la suite confirmé par la mesure que les vibrations du manche sont supérieures au seuil de sensibilité vibratoire du doigt, la question de la perception des vibrations du manche n’a jamais fait l’objet d’une étude approfondie. On pourrait se demander si les violonistes parviennent à discriminer des violons au sein d’un ensemble réduit d’instruments en fonction du niveau de vibration théoriquement perceptible en particulier par leur main gauche tenant le manche. Dans un premier temps, l’expérience de Askenfelt et Jansson pourrait être élargie pour tenter de répondre à la question suivante : les niveaux de vibrations du manche sont-ils supérieurs au seuil de sensibilité vibratoire pour tous les violons et à toutes les fréquences ?

Ce chapitre présente une étude expérimentale exploratoire traitant de la caractérisation du retour vibratoire d’un point de vue avant tout physique. En effet, l’étude est conduite suivant une procédure proche de celle adoptée par Askenfelt et Jansson (1992) (voir Avant-Propos de cette partie), mais la procédure expérimentale adoptée pour réaliser les mesures vibratoires sur les instruments permet cependant d’obtenir des niveaux de vibration plus complets sur l’intervalle de fréquence considéré. La dimension perceptive est également prise en compte dans cette étude car elle est conduite sur un panel d’instruments au préalable évalués par un violoniste professionnel dans le but d’examiner si les sensations perceptives du violoniste, indépendamment de son jugement sur la qualité globale des violons, pourraient être liées au comportement vibratoire mesuré des violons relativement au seuil de sensibilité vibratoire (mesuré au Chapitre 1).

## 2.2 Mesures vibratoires sur les violons

Deux types de mesures ont été réalisées sur les violons. Le but de ces mesures étant d'étudier le comportement vibratoire des violons tel qu'il est perçu par les violonistes lors du jeu, l'observation des courbes se limitera à la plage fréquentielle de recouvrement entre le registre du violon et la sensibilité de la peau, soit [196 -1000] Hz.

### 2.2.1 Admittance au chevalet

Dans le cas des instruments à cordes frottées, l'admittance au chevalet — autrement appelée mobilité au chevalet — caractérise le comportement vibratoire du corps, “vu” depuis les cordes. Cette mobilité est définie comme le quotient de la vitesse résultante au point de contact corde/chevalet sur la force appliquée en ce même point. L'admittance au chevalet est supposée contenir l'essentiel de l'information sur l'énergie transférée entre la corde et le corps (Cremer and Allen, 1984). Plus le chevalet est mobile, mieux il transmettra les vibrations de la corde à la table d'harmonie. La mobilité a souvent été considérée comme un facteur déterminant de la qualité d'un violon mais des études plus récentes montrent qu'il est très difficile de corrélérer les mesures vibratoires aux données perceptives (Saitas et al., 2012). Il s'agit cependant de la mesure la plus classiquement réalisée sur le violon.

### 2.2.2 Niveaux de vibration au manche

Les niveaux de vibration au manche des violons sont mesurés pour être comparés au seuil de sensibilité vibrotactile de la main gauche des violonistes (voir Chapitre 3 précédent). Ces mesures nous sont utiles pour tenter de caractériser et distinguer les violons sur la base du ressenti vibratoire des violonistes (par la main gauche). Nous faisons l'hypothèse que ces mesures pourraient également être essentielles pour comprendre et diagnostiquer le couplage entre le manche et le corps du violon. Les niveaux de vibration sont mesurés au niveau de la première position, dans les deux directions suivantes : (1) normale au côté du manche, on parlera par la suite de direction horizontale et (2) normale à la touche, on parlera par la suite de direction verticale. La figure 2.1 suivante illustre ces deux directions (respectivement  $x$  et  $z$ ). Ces niveaux de vibration au manche sont obtenus à partir des fonctions de transfert chevalet/manche. De la même façon que les admittances au chevalet, ces fonctions de transfert lient la réponse vibratoire du système (corps + manche) à la force qui lui est appliquée en entrée (au chevalet).

En dehors de l'étude de Askenfelt et Jansson (1992) reportant des niveaux de vibration mesurés au manche de quatre violons en situation réelle de jeu à l'aide d'un accéléromètre, la littérature ne mentionne aucune mesure similaires.

### 2.2.3 Procédure expérimentale

Pour ces deux types de mesures, une procédure standard de mesure de réponse impulsionnelle a été adoptée (e.g. Jansson 1997). L'excitation impulsionnelle du chevalet est donnée par un marteau d'impact B&K 8203, équipé d'un transducteur de force. C'est la méthode d'excitation

la plus courante pour réaliser des mesures vibratoires sur les violons. Le marteau est monté sur un balancier permettant de fournir une impulsion de force très courte (de l'ordre de quelques millisecondes) et localisée. Ce système assure également une bonne reproductibilité des impacts et offre l'avantage d'un couplage quasi-nul avec l'excitateur. La vitesse vibratoire est mesurée par vibrométrie laser (Polytech, PDV 100), ce qui permet d'éviter les problèmes d'encombrement de la structure qu'entraîne l'utilisation d'un accéléromètre. Nous construisons l'admittance et la fonction de transfert chevalet/manche par division spectrale de la vitesse et de la force appliquée sur le chevalet.

Dans le cas des admittances au chevalet, l'impact est réalisé sur le coin supérieur du chevalet, du côté de la corde la plus grave (Sol, 196 Hz). L'impact est donné suivant la direction de l'archet lorsqu'il frotte la corde de Sol. En pratique, la mesure de la vitesse résultante doit être effectuée le plus près possible du point de fixation de la corde utilisée pour la mesure d'admittance (ici Sol grave) et du point d'impact du marteau. Pour des raisons de praticité, la vitesse est mesurée au niveau du coin supérieur opposé du chevalet (i.e. du côté de la corde la plus aigüe, Mi, 659 Hz), évitant ainsi que la présence du marteau interfère avec le trajet du faisceau laser. Pendant cette campagne de mesure, la vitesse et la force appliquée au chevalet sont donc considérées spatialement unidimensionnelles pour chaque mesure et l'admittance au chevalet est simplement égale au quotient de ces deux grandeurs.

Dans le cas des fonctions de transfert chevalet/manche, l'impact est également réalisé au niveau du coin supérieur du chevalet, du côté de la corde la plus grave (Sol, 196Hz), dans la direction du frottement de la corde de Sol à l'archet. La vitesse vibratoire est mesurée en première position sur le manche (1) dans la direction horizontale sur le côté du manche et (2) dans la direction verticale, entre les cordes de Ré (293 Hz) et La (440 Hz) sur la touche. Ces mesures sont délicates en raison de l'amplitude relativement faible de la vitesse vibratoire du manche. Les fonctions de transfert chevalet/manche sont ensuite converties en niveaux de vibration en deux étapes : (1) l'intégration des données recueillies au vibromètre permettent d'obtenir des déplacements (tout d'abord en micromètres puis convertis en décibels, avec une référence de 1 micron de déplacement) ; (2) la force d'excitation du marteau est fixée à 1 N, pour s'approcher de dynamiques classiques de jeu. On peut en effet considérer que la force appliquée par le marteau sur le chevalet du côté des graves s'assimile à la force  $F$  exercée par la corde de sol lors du jeu avec l'archet. La force  $F$  est donnée par la relation  $F = \frac{Z_0 \times vB}{\beta}$  (Askenfelt 1989), avec  $Z_0$ , l'impédance caractéristique de la corde considérée ( $Z_0 = 0.33$  kg/s pour la corde de Sol),  $vB$  la vitesse d'archet, et  $\beta$  le quotient de la distance entre l'archet et le chevalet sur la longueur totale de la corde. Lors du jeu en mezzo forte,  $vB$  est classiquement de l'ordre de 0.2 m/s et  $\beta$  de 0.08 m. A cette dynamique de jeu, la force  $F$  exercée par la corde lors du jeu avec l'archet est donc d'environ 0.8 N. Lors du jeu en forte,  $vB$  est classiquement de l'ordre de 0.4 m/s et  $\beta$  de 0.05 m. A cette dynamique de jeu, la force  $F$  est donc d'environ 2.5 N.

Afin de mesurer uniquement la réponse de la structure rigide de l'instrument (admittances et fonctions de transfert chevalet/manche), les cordes sont au préalable étouffées à l'aide d'une petite carte cartonnée placée sur la touche. Une plaque de fixation permet de maintenir les instruments en position horizontale : un système de serrage remplace la mentonnière et le manche

du violon repose sur un bloc de mousse imitant la tenue au niveau de la première position. Ces deux conditions aux limites ont été pensées pour s'approcher des conditions réelles de tenue du violon (serrage entre l'épaule et l'os de la mâchoire au niveau du bas de la caisse, et tenue du manche entre l'index et le pouce de la main gauche). L'utilisation d'une plaque de fixation facilite également l'acquisition de signaux à l'aide du vibromètre laser qui nécessite une grande stabilité du dispositif expérimental pour obtenir des mesures précises. Bien que ce système soit couramment utilisé pour réaliser des mesures sur les instruments, nous verrons au Chapitre 4 que, comme tout dispositif de mesure, le système de serrage n'est pas complètement neutre vis-à-vis de la structure à étudier (l'idéal serait en fait de pouvoir réaliser les mesures sur les violons tenus par un musicien, mais cela est en pratique quasiment impossible avec l'utilisation d'un vibromètre laser). Le dispositif expérimental est illustré à la figure 2.1. L'acquisition des données se fait à l'aide d'un programme de mesures développé par Jim Woodhouse<sup>1</sup> à une fréquence d'échantillonnage de 25600 Hz.

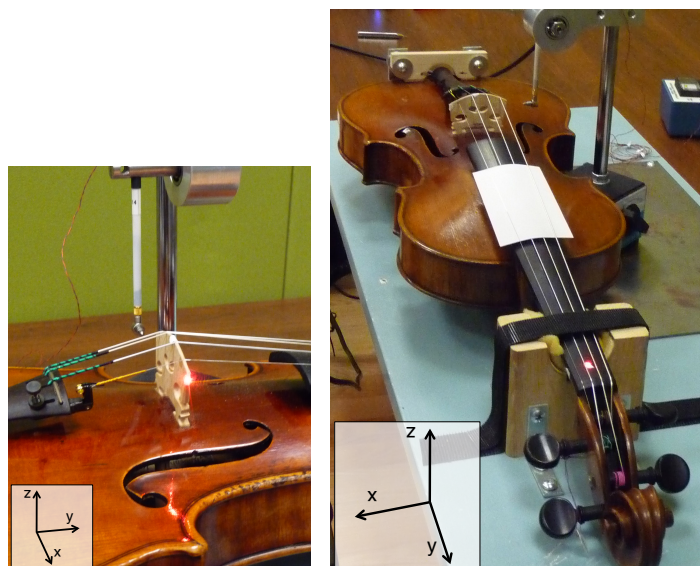


FIGURE 2.1 – Dispositif expérimental utilisé : excitation impulsivonne sur le coin supérieur du chevalet côté Sol et mesure vibratoire au laser coin supérieur du chevalet côté Mi (à gauche pour les admittances au chevalet), sur la touche (à droite pour les niveaux de vibration au manche)

## 2.3 Caractérisation perceptive et vibratoire d'un ensemble de violon

Dix violons ont été rassemblés pour explorer la possibilité de les discriminer en fonction de leur comportement vibratoire, en particulier par les vibrations perceptibles dans la main gauche en contact avec le manche. Ces violons ont été choisis par un luthier pour leurs qualités de jeu différentes. Ces violons ont été fabriqués entre les années 1800 et 1950 ; leur prix varie entre 800

1. DataLogger software

et 6000 euros.

### 2.3.1 Evaluation perceptive d'un violoniste professionnel

Un violoniste professionnel a été invité à jouer l'ensemble des 10 violons, l'un après l'autre, avec pour seule consigne d'exprimer à haute voix ses impressions concernant le son et son ressenti de chaque instrument. Le but de l'étude (propriétés vibratoires perçues des violons) n'a pas été dévoilé au violoniste pour ne pas orienter ses commentaires sur des sensations vibratoires. Le musicien a été laissé libre de jouer ce qu'il voulait pour tester les violons et son discours libre a été enregistré. L'expérience a été conduite dans une pièce relativement obscure et le violoniste a été équipé de lunettes sombres pour éviter que l'aspect visuel des instruments n'influe sur leur appréciation. Les commentaires du violoniste explicitement liés à ses sensations tactiles globales (i.e. non exclusivement tournées vers la main gauche) nous ont amené à réduire notre étude aux quatre violons perçus les plus différents en terme de comportement vibratoire.

Deux de ces quatre violons ont été globalement décrits comme « vibrants ». L'un d'eux était jugé « très agréable au toucher, il répond très vite » avec le commentaire : « en jouant le ré sur la corde de sol ça me fait vibrer jusqu'au ventre ». Le jeu de l'autre violon « fait un bon massage de la main ». A l'inverse, les deux autres violons ont été globalement décrits comme « non vibrants ». L'un d'eux perçu comme « au toucher plus inerte » et l'autre « difficile à jouer, il ne répond pas vite » avec son « manche inerte ».

Nous avons décidé de concentrer l'étude sur ces quatre violons au comportement vibratoire extrême dans le but d'étudier si cette sensation de violon « vibrant », indépendamment de sa qualité globale, pourrait être liée au comportement vibratoire global du violon (admittance au chevalet) ou au comportement vibratoire relatif au seuil de sensation vibratoire présenté au Chapitre 3 précédent (niveaux de vibration au manche<sup>2</sup>).

### 2.3.2 Etudes des comportements vibratoires

#### 2.3.2.1 Admittances au chevalet

La figure 2.2 présente les admittances (en norme) au chevalet des quatre violons sélectionnés, dans l'intervalle de fréquence [196 – 1000] Hz.

Le tableau 2.1 répertorie les principaux modes de « signature » des quatre violons de l'étude compris dans l'intervalle [0 - 1000] Hz, tels qu'ils ont été identifiés sur les courbes d'admittance.

Bien que ces courbes présentent localement des différences, elles ont toutes la même allure dans l'intervalle de fréquences choisi, et les niveaux moyens de vibrations semblent relativement semblables pour les quatre violons. En effet, en dessous de 600 Hz, la réponse des deux types de violons « vibrants » et « non vibrants » est en moyenne semblable, même si les deux violons dits « vibrants » présentent de plus larges variations de réponse : le mode de corps CBR présent juste en-dessous de 400 Hz n'a en effet été identifié pleinement que pour les deux violons « vibrants ».

---

2. Les mesures réalisées sur les six autres violons de l'ensemble sont présentées en Annexe B.

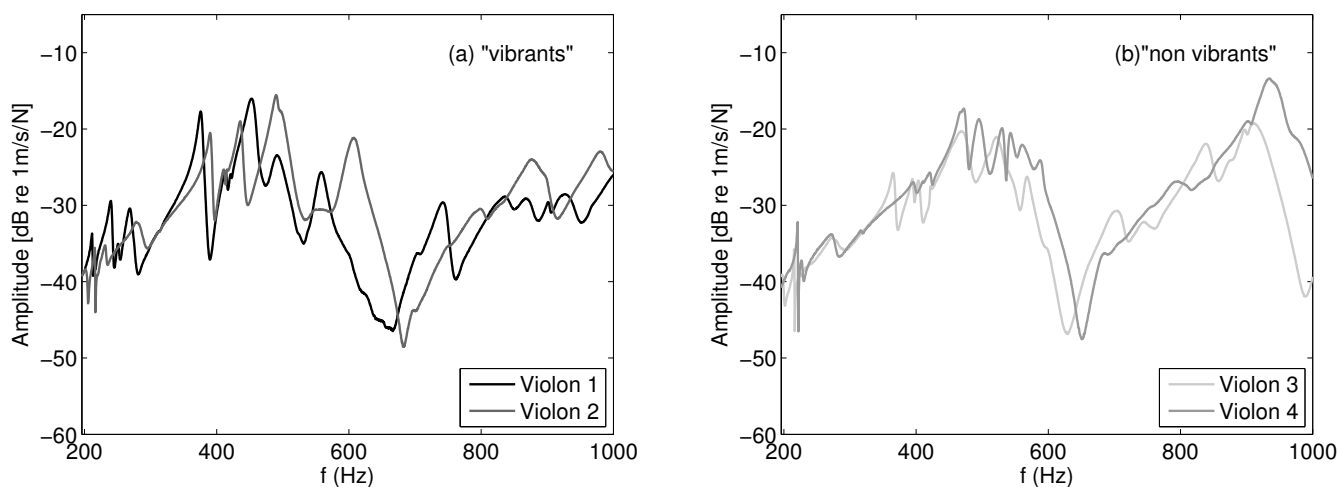


FIGURE 2.2 – Admittance au chevalet des quatre violons sélectionnés pour leur caractère (a) « vibrant », (b) « non vibrant ». Les niveaux sont représentés en dB (ref 1 m/s/N)

		A0	A1	CBR	B1-	B1+
« vibrants »	Violon 1	269	453 ?	375	492	559
	Violon 2	278	435 ?	390	490	607
« non vibrants »	Violon 3	272	471 ?	-	496	544
	Violon 4	272	423	394	469	568

TABLE 2.1 – Fréquences (Hz) des modes signatures des quatre violons

Au-dessus de 600 Hz, la même observation peut être faite considérant les niveaux moyens même si un plus large pic est observé dans les niveaux de vibration des violons « non vibrants » (par exemple en-dessus de 800 Hz).

### 2.3.2.2 Niveaux de vibrations au manche et seuil de sensibilité : retour vibratoire dans la main gauche

Les mesures réalisées dans les directions horizontale et verticale sont présentées sur des figures séparées pour permettre la comparaison avec les mesures de Askenfelt et Jansson (1992) réalisées uniquement dans la direction horizontale.

La figure 2.3 présente les vibrations horizontales du manche des deux violons « vibrants » (figure 2.3 (a)) et des deux violons « non vibrants » (figure 2.3 (b)). Les courbes sont superposées à la courbe de seuil de sensation vibratoire de la main gauche. Les niveaux de vibrations affichés correspondent à une excitation du chevalet de 1 N.

De même que pour les courbes d'admittance au chevalet, on remarque qu'en dessous de 600Hz, les niveaux de vibration moyens des deux types de violons sont semblables et bien au-dessus du seuil de sensibilité, bien qu'il existe des fluctuations de niveaux plus importantes pour



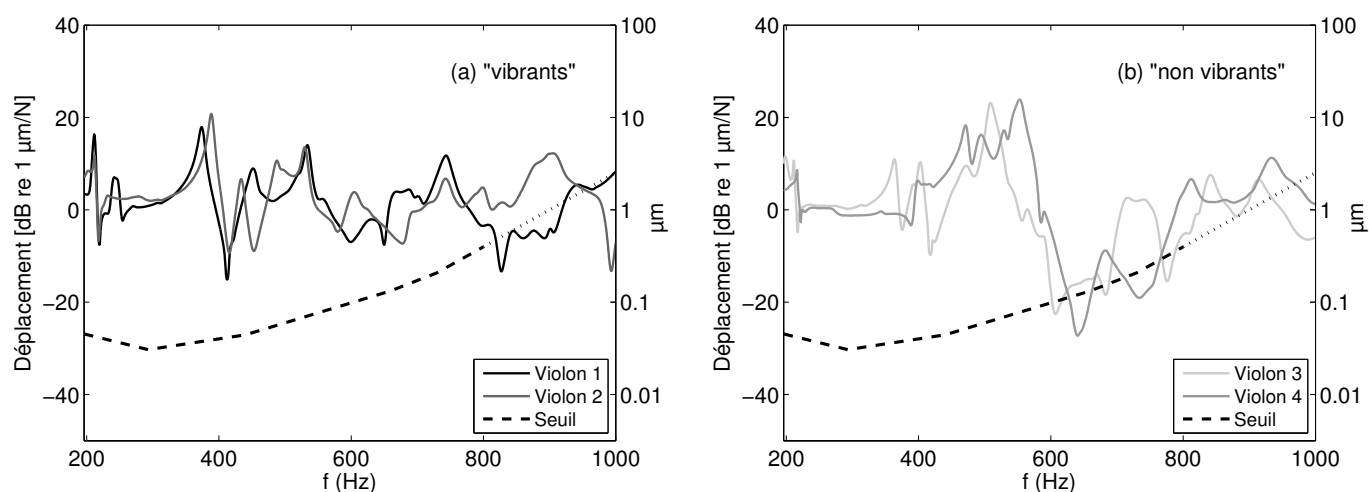


FIGURE 2.3 – Amplitudes horizontales de vibration des violons jugés (a) « vibrants » (b) « non vibrants ». Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés

les violons dits « vibrants » (on retrouve les différences déjà observées entre les deux types de violons pour le mode CBR). Une différence majeure apparaît entre les deux groupes de violons aux fréquences supérieures à 600 Hz. Les amplitudes de vibration au manche des violons dits « vibrants » sont très supérieures au seuil de sensibilité vibratoire (+15 dB en moyenne) jusqu'à 800 Hz. En revanche, les courbes des violons dits « non vibrants » présentent moins de régularité que celles des violons « vibrants » sur l'intervalle fréquentiel [200 - 1000] Hz : les amplitudes de vibration présentent une forte chute d'environ 40 dB aux alentours 600 Hz, les faisant passer sous la courbe de seuil. Au-delà de 600 Hz, les niveaux de vibration restent globalement au niveau du seuil.

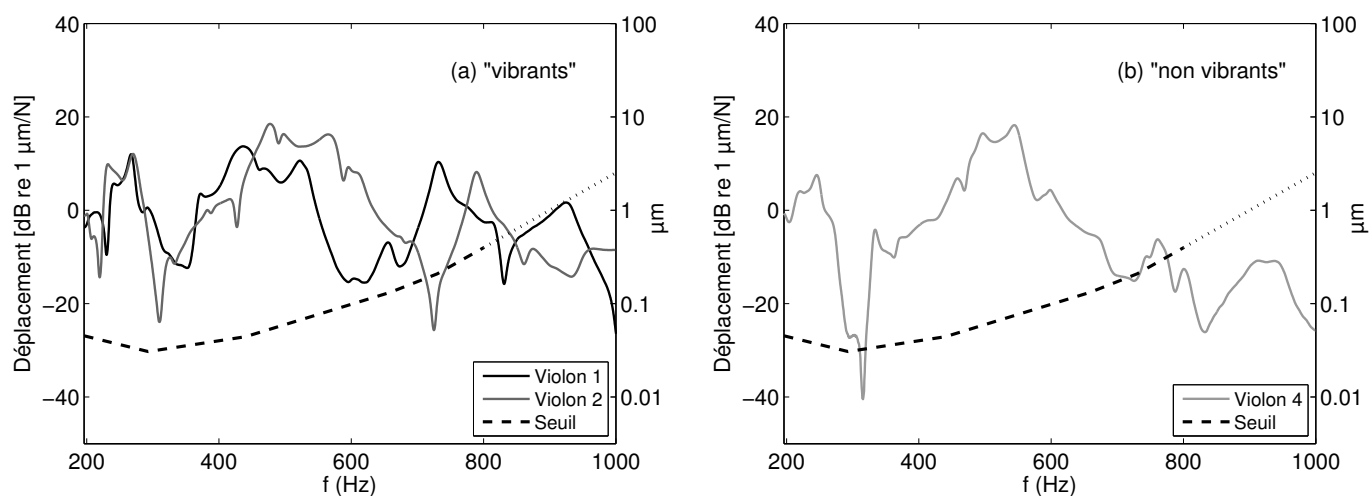


FIGURE 2.4 – Amplitudes verticales de vibration des violons jugés (a) « vibrants » (b) « non vibrants ». Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés

Les niveaux de vibrations n'ont pu être mesurés dans la direction verticale que sur trois des quatre violons, à cause de la vente imprévue d'un des violons « non vibrants » pendant la campagne de mesure. La figure 2.4 présente donc les vibrations verticales du manche des deux violons « vibrants » (figure 2.4 (a)) et de l'un des violons « non vibrants » (figure 2.4 (b)). Les courbes sont superposées à la courbe de seuil de sensation vibratoire de la main gauche.

La différence entre les deux types de violons est nettement moins frappante dans cette direction de mesure, ce qui ne nous permet pas de conclure simplement sur les différences entre les deux types de violons.

## 2.4 Discussion et conclusion

Ce chapitre constitue une étude préliminaire sur l'influence potentielle des vibrations du manche sur la perception de différents violons. Plusieurs études acoustiques ont en effet postulé que le ressenti des vibrations du manche par la main gauche aiderait à la perception et à l'évaluation du « ressenti » d'un violon mais la question n'avait encore jamais fait l'objet d'une étude approfondie. La présente étude a permis d'explorer le phénomène de retour vibratoire pouvant être perçu dans la main gauche des violonistes lors du jeu. Une approche descriptive permettant de comparer les niveaux de vibration des manches des violons et le seuil de sensation de la main gauche mesurée au Chapitre 1 a été proposée.

Pour ce travail exploratoire, sur les 10 violons du panel, nous avons retenu les quatre violons dont le comportement vibratoire était perçu comme extrême (violon explicitement « vibrant » ou au contraire « non vibrant ») lors d'une évaluation perceptive conduite avec un violoniste professionnel car il nous semble que des caractéristiques extrêmes sont plus à même de mettre en évidence des effets dont la mesure pourrait se révéler extrêmement subtile.

Les admittances au chevalet ainsi que les niveaux de vibration au manche dans les directions horizontale et verticale ont été mesurés sur les instruments dans l'intervalle de fréquences [196 - 1000] Hz. Les courbes d'admittance au chevalet ont été analysées pour explorer si la différence de ressenti vibratoire du violoniste pourrait être liée au comportement vibratoire global du violon. L'hypothèse formulée par Marshall (1985) selon laquelle le « ressenti » d'un violon — basé sur les sensations vibratoires — est principalement déterminé par les modes de vibration du violon d'ordre les plus bas semble en partie vérifiée dans cette étude : les violons présentant les plus grands pics de résonance en dessous de 400 Hz (correspondant au mode CBR) sont précisément les violons dits « vibrants » alors que les deux autres violons présentant des résonances d'amplitudes beaucoup plus faibles sont jugés « non vibrants ». Les niveaux de déplacement au manche des violons peuvent également varier grandement d'un violon à l'autre, surtout autour de 600 Hz, dans les directions de mesure horizontale et verticale. Dans ces deux directions, les amplitudes de vibration sont très largement au-dessus du seuil de sensation vibratoire pour les deux violons décrits comme « vibrants » alors que la position de la courbe des violons perçus « non vibrants » dépend de la fréquence. Cette distinction entre les deux types d'instrument est très nette dans la direction horizontale où les courbes de vibration des violons « non vibrants » peuvent être découpées en deux zones de fréquence (ce qui n'est pas le cas des violons dits « vibrants ») : en-dessous de 600 Hz où les niveaux sont bien supérieurs au seuil de sensibilité et au-dessus de 600 Hz où les courbes sont en dessous ou proches du seuil, avec un décrochement abrupt des niveaux à 600 Hz, qui apparaît alors comme une fréquence de coupure. La comparaison des courbes de vibration des deux types de violon semble donc en accord avec la catégorisation du violoniste. La seconde hypothèse de Marshall (1986) selon laquelle le caractère vibrant d'un violon dépendrait du nombre de fois qu'une résonance du manche se trouve au-dessus du seuil de sensation pourrait donc être reformulée. Il apparaît en effet ici que la position de la courbe de vibration comparée au seuil de sensibilité tactile reflèterait le caractère vibrant d'un violon. De surcroît, plus cette courbe est régulière sur le registre du violon, plus le violon est perçu vibrant.

Il est intéressant de remarquer que la baisse rapide des niveaux de vibrations autour de 600 Hz mise en évidence sur les courbes des manches « non vibrants » est en fait une caractéristique des violons apparaissant classiquement sur les courbes d'admittance au chevalet. Ce phénomène est d'ailleurs clairement observable sur les quatre courbes d'admittance présentées. Il est dû à l'absence de modes dans la région [600 - 700] Hz. Les deux types de mesures — admittances et niveaux de vibration au manche — ayant en commun une excitation au chevalet, il n'est pas surprenant que certaines caractéristiques observées sur les admittances des violons se retrouvent dans les mesures de vibration réalisées sur les manches. Une question intéressante serait donc d'examiner pourquoi cette coupure autour de 600 Hz se retrouve sur les mesures de vibration des manches de seulement deux des quatre violons étudiés, précisément ceux jugés « non vibrants ». Cette question pourrait nécessiter une attention particulière — les différences de caractéristiques des couplages corps/manche et manche/tête pourraient expliquer cette catégorisation — mais elle ne fait pas l'objet de cette étude.

Les résultats de cette étude sont donc en accord avec ceux de Askenfelt et Jansson montrant que les niveaux de vibration au manche des violons sont globalement supérieurs à ceux du seuil de sensation ; mais la procédure expérimentale utilisée ici permet d'affiner ces résultats car elle permet de moduler ce constat en fonction du type de violon et la note jouée. En effet, ces observations signifient que les vibrations des notes plus aiguës que Ré, 587 Hz, peuvent être perçues sur les violons « vibrants » mais presque pas lors du jeu des violons « non vibrants ». Les vibrations des notes plus graves que ce Ré, 587 Hz, peuvent être perçues sur les deux types d'instruments mais l'intensité de ces vibrations devrait être différente si l'on considère que les amplitudes des premières harmoniques des notes jouées peuvent moduler l'intensité perçue. Les intensités des vibrations des notes fondamentales plus graves que Ré, 587 Hz, sont en effet semblables pour les deux types de violon mais les harmoniques comprises dans l'intervalle [600 – 1000] Hz ne devraient être perceptibles que pour les violons dits « vibrants ». La question de savoir de combien les vibrations de la corde, perceptibles par les doigts appuyant sur les cordes, affectent la sensation vibratoire pourrait également être pris en compte dans des études futures. Finalement il est aussi probable que les violonistes soient particulièrement sensibles aux changements abrupts de niveau de vibration lors du jeu. La constatation de O'Modhrain (2000), "Only when the response of the instrument changes suddenly is the player again conscious of its « feel »" (Chap 5, p. 72) pourrait ici se vérifier.

Cette étude est une étape descriptive apportant des éléments révélant l'existence d'un retour vibrotactile au manche propre à chaque violon. La position de la courbe de vibration d'un violon par rapport au seuil pourrait être une illustration du retour vibrotactile existant dans le manche lors du jeu de ce violon. Le retour vibratoire pourrait ainsi constituer une « signature » perceptive de l'instrument ; ceci justifie la différenciation perceptive des violons, établie par les violonistes eux-mêmes, sur la base des comportements vibratoires de chaque instrument. Cependant d'autres études seraient nécessaires pour confirmer cette tendance sur un plus large panel de violons, et engageant un plus grand nombre de violonistes.

## Troisième partie

# Contributions respectives des modalités auditive et tactile dans l'évaluation des violons



## Avant-propos

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente, étudier la perception des violonistes constitue une étape fondamentale pour mieux comprendre et interpréter les mesures vibratoires couramment pratiquées sur le violon. En particulier, la perception tactile, trop peu prise en compte jusqu'à présent dans les jugements de qualité, a ouvert le champ à de nouvelles vues. Mentionnons à nouveau ici les travaux de Alexander Galembo (2001). L'expérience qu'il rapporte, conduite à la fin des années 70 dans l'usine de piano de Leningrad, porte sur le rôle des retours auditif, tactile et visuel dans l'évaluation de qualité des pianos ; il en ressort que, même sans retour auditif, les pianistes sont capables de retrouver avec précision le type de piano sur lequel ils jouent car ils se basent sur des indices kinesthésiques provenant du retour tactile suffisamment puissants et porteurs de sens pour émettre des jugements comparables à ceux émis dans une condition normale de jeu. Il est intéressant de savoir si pour le violon le retour tactile est aussi informatif. Une expérience perceptive, explicitement orientée sur la sensation tactile — dans un premier temps — de la main gauche, pourrait de plus être utile à la corrélation des propriétés physiques et mécaniques de l'instrument avec les jugements perceptifs de l'instrumentiste ; elle nous permettrait d'approfondir notre connaissance des modes de vibration du violon déterminant le "ressenti" tactile du musicien par opposition à ceux qui déterminent la qualité sonore perçue. En ce sens, une première recherche sur le ressenti tactile en relation avec la perception du son nous paraît essentielle.

Dans cette partie du manuscrit, nous traitons de la contribution respective de la modalité auditive et de la modalité tactile à l'évaluation perceptive des violons. Le terme « modalité tactile » renvoie ici au ressenti des vibrations dans la main gauche des violonistes. Il s'agit donc d'un toucher passif. Lorsque le terme est étendu au tactile actif, cela sera précisé.

Le Chapitre 3 est proposé sous la forme de l'article *Investigating the role of auditory and tactile modalities in violin quality evaluation*, I Wollman, C. Fritz, J. Poitevineau, S. McAdams (en révision pour resoumission). Une façon d'étudier le rôle d'un retour sensoriel est de mesurer la conséquence comportementale de la suppression de ce retour. C'est la démarche que nous avons choisi d'adopter pour cette recherche. Une expérience d'évaluation de violons par des violonistes professionnels en contexte de jeu a en effet été mise en place pour tester différentes conditions de retour sensoriel : condition normale (par la suite notée « Cond N »), condition de jeu avec audition masquée (« Cond noA ») et condition de jeu avec tactile masqué (« Cond noT »). L'expérience perceptive présentée dans ce chapitre explore donc les impacts respectifs des masquages auditif et vibrotactile sur les jugements des violonistes portant sur les qualités des violons de l'étude. Le recours au masquage sensoriel a nécessité la mise en place de deux expériences préliminaires afin de déterminer les seuils de masquage de chacun des deux sens (auditif et vibrotactile dans la main gauche), spécifiques au jeu du violon. Ces mesures ont été réalisées directement en contexte de jeu et sont détaillées au sein de ce chapitre.

Les questions auxquelles nous tentons de répondre dans ce chapitre sont nombreuses. Elles

traitent entre autres de la liste de critères d'évaluation — liés aux attributs physiques du violon — et sa pertinence pour des violonistes professionnels, et du lien existant entre chacun des critères d'évaluation et les modalités auditive et tactile ; ces questions concernent également la relation entre les différents types de notations utilisés : critères d'évaluation, préférence (subjective) et qualité globale (« objectivée »). L'Annexe A détaille les traitements statistiques utilisés.

Le Chapitre 4 présente les mesures vibratoires effectuées sur les cinq instruments de l'étude. Une campagne de mesure plus étendue que celle pratiquée dans la Partie 2 a été mise en place, car le chevalet est également excité suivant la direction verticale — et non plus simplement horizontale — et les réponses vibratoires au chevalet ou au manche sont mesurées suivant les deux directions horizontale et verticale. Les influences de deux types de conditions aux limites (condition libre-libre ou condition d'encastrement) induites par les procédures expérimentales sont également comparées au sein du chapitre. Une partie des mesures réalisées est présentée en Annexe C. Par rapport aux études réalisées jusqu'ici, le présent travail est basé sur un champ de mesures plus large et sur un nombre plus grand de jugements perceptifs recueillis dans une situation de test perceptif contrôlé (expérience présentée au Chapitre 3). Il nous semble être une bonne base pour identifier des descripteurs dans les réponses vibratoires (permettant de distinguer les instruments les uns des autres) et de tenter de les corrélérer aux jugements perceptifs des violonistes. Par ailleurs, un cordier spécial équipé d'une petite masse ajustable a été monté sur un des violons de l'expérience perceptive. Nous avons considéré ce violon équipé du cordier ajustable comme deux violons différents, selon l'une ou l'autre des deux positions retenues pour la masse. La comparaison des « deux violons » issus du même instrument est intéressante tant d'un point de vue perceptif — analyse des résultats de l'expérience pour ces violons uniquement — que du point de vue du comportement vibratoire et fait l'objet d'un intérêt particulier dans le chapitre.



# Investigating the role of the auditory and the tactile modalities in violin quality evaluation<sup>1</sup>

---

## *Abstract*

The role of auditory and tactile modalities involved in violin playing and evaluation was investigated in an experiment employing a blind violin evaluation task under different conditions : i) holding the instruments without producing sound, ii) normal playing conditions, iii) playing with auditory masking, and iv) playing with vibrotactile masking. Under each condition, 20 violinists evaluated five violins according to criteria related to violin playing and sound characteristics and rated their overall quality and relative preference. Violinists agree more on the importance of rating criteria than on the actual ratings given violins. Both auditory and tactile modalities appeared important in the violinists' evaluations. Their relative importance was found to depend on the violinist, the violin and the type of evaluation (criteria or preference). The overall quality ratings were accurately predicted by the rating criteria, which also proved to be perceptually relevant to violinists, but were poorly correlated with the preference ratings, suggesting that the two types of ratings may stem from different decision-making strategies.

---

1. I. Wollman, C. Fritz, J. Poitevineau, S. McAdams, "Investigating the role of the auditory and the tactile modalities involved in violin quality evaluation" (en révision)

### 3.1 Introduction

Music performance, in general, is a multimodal experience, involving perceptual, cognitive and motor components. When playing music, one of the most prominent sources of sensory information that accompanies audition is touch. As in the performance of many musical instruments, violinists are in intimate contact with the violin, the instrument being held very close to the player : the chin and the shoulder hold the violin body, the left hand the neck, and the right hand the bow. In addition to the sound, by fingering and drawing their bow across the strings, violinists receive vibrotactile feedback from their instrument as an implicit complement of the music produced. The tactile interaction between violinists and violin is thus inherent in the musical performance process and is probably related in one way or another to the feel of the violin. As reported by Marshall (1985), “to be accepted by an artist, an instrument must not only sound correct but it must also feel correct”. Violinists thus probably use this tactile sensory input to perform better, to evaluate their own playing, and even to evaluate the quality of the instrument they are playing or are considering acquiring. In that sense, musical instrument evaluation is a complex perceptual, motor and cognitive task as well.

Previous work on the rating of violin quality has mainly focused on the characterization of the instrument itself, based either on comparative measurements of the violins’ physical properties (e.g. Dünwald (1991); Bissinger (2004, 2008) or on evaluations of violin sound through listening tests (Willgoss and Walker, 2007; Fritz et al., 2010). These two approaches have limitations as they only use a restricted set of audition-based criteria for the evaluation and neglect the player-instrument interaction. However, recently, Fritz, Curtin, Poitevineau, Morrel-Samuel and Tao (2012b) and Saitis, Giordano, Fritz and Scavone (2012) have investigated violinists’ evaluations while playing, bringing into consideration the sound and the “feel” of the instrument. The “feel” of the instrument is one aspect of violin playing and evaluation that has received little attention so far. Although many violinists report being really concerned about the “feel” of their instrument, there is a lack of consideration in the violin literature among authors who invoke this notion regarding what actually gives rise to the feel.

Marshall (1985) stated that the vibrational modes of violin necks principally determine the “feel” of the instrument in that they exist at low frequencies to which the human skin is sensitive [0-1000Hz]. According to him (1985, 1986), the detection of vibrations by the left hand of violinists is the basis for the sensation of the feel of the violin, sometimes referred to as its degree of “liveliness”. Hutchins (1985) and Woodhouse (1998) developed this idea by investigating how frequency matching between modes of the violin body and violin neck can enhance the sensation of “good feel”. In the violin literature, the notion of feel is thus commonly associated with vibrotactile feedback.

However, all these studies intended to quantify the characteristics of “feel” from vibrational measurements, but lack perceptual validation of their claims. A study of “feel” in a perceptual experiment is thus needed to quantify the extent to which the tactile modality alone can contribute to the perception of the overall quality of a violin. Eventually, this examination could help better correlate acoustical properties of the instrument with perceptual characterization of

violins by deepening knowledge of the vibrational modes that influence the feel of violins more than of what determines the tonal quality of the instrument. Thus an initial investigation of how important the tactile sense is in violin playing and evaluation is required, particularly in relation to the contribution of the auditory modality.

### **3.1.1 The role of auditory and tactile feedback in musical instrument performance**

Several studies have investigated the role of one or more sensory modalities in musical performance. In particular, auditory and tactile modalities are regarded as important feedback mechanisms that enable musicians to control and experience their playing.

#### **3.1.1.1 Auditory feedback in music**

Since the paper of Lashley (1951), research on musical instrument performance has demonstrated that an absence of auditory feedback does not impair or disrupt performance (Gates and Bradshaw, 1974; Banton, 1995; Finney, 1997) and only slightly affects expressive performance (Repp, 1999). Disruption can appear when auditory feedback content is altered, demonstrating the necessity of congruence between perception and action in music performance (see Pfordresher (2006), for a review of the effects of altered auditory feedback). However, these studies have only dealt with musical performance on electronic keyboards, because it is easy to remove the auditory feedback with them. This research needs to be extended to the performance of other musical instruments. Fulford, Ginsborg and Goldbart (2012) recently explored the possible impairment in string ensemble playing by attenuating the auditory feedback to four violinists. Again, no serious effect of auditory attenuation was found on performers' ability to play in a group, although the auditory masking was not complete.

Several authors have argued that players rely on their internal auditory representation of music, even in the absence of any audible sound

#### **3.1.1.2 Tactile feedback in music**

Two types of touch need to be distinguished. Active touch, also called haptic perception, "refers to the combination of cues provided by tactile and kinesthetic receptors during active manipulation of objects in the environment. When stimuli are presented to a stationary observer, the cues arising from tactile receptors are referred to as passive touch" (Weisenberger 2001, p. 536). It is interesting to note that active touch and passive touch are inherently involved in violin playing : active touch mainly because of active bowing and fingering and passive touch mainly because of vibrotactile feedback during playing.

Several authors (e.g. Keele 1973; Hollerbach 1990) have reported that the tactile and kinesthetic senses are more important than passive touch in expert performance. Askenfelt and Jansson (1992) proved that vibrations of many instruments including violins can be felt by the player. They suggested that this vibrotactile feedback plays an important role in ensemble playing (where hearing one's own auditory feedback is not always possible) and in timing. Goebel

and Palmer (2008) extended this finding by highlighting the role of tactile feedback in performance timing accuracy for pianists. But, as Baader, Kazennikov and Wiesendanger (2005) reported, information concerning the role of tactile cues in traditional musical performance and instrument evaluation is still scarce in the literature. Nevertheless, in digital musical instrument literature, many researchers have shown the benefits of providing vibrotactile feedback to performers of computer-based bowed-string instrument so that the "feel" of traditional instruments can be mimicked, especially in the complex interaction characterizing the bowing action (Nichols, 2002; Florens, 2004; Sinclair et al., 2011).

### 3.1.2 Aim and research questions

The present paper explores the respective role of auditory and tactile (left hand) modalities involved in violin playing and evaluation. Since visual cues such as the color of varnish or the type of wood can influence musicians' evaluations of instrument quality, and therefore constitute important cues for the recognition of violins, the current study was conducted under near-blind conditions.

As a first step, the goal of this project was to investigate the respective contribution of two sensory modalities to the evaluation of the sound and the "feel" of a violin by exploring how much auditory masking and tactile masking, respectively, affect the violinists' evaluation of violin quality. Indeed, sensory masking is a way to uncouple the two modalities and so to study each sensory modality separately : with auditory feedback removal, tactile feedback is still available to the player and similarly, with tactile feedback deprivation, auditory feedback is unaltered.

Although it has been shown that musicians can play even without hearing themselves, would this still be the case without tactile feedback from the instrument? And more interestingly, can violinists not only play but evaluate violins without one or the other of these sources of sensory feedback? The perceptual experiment presented in this paper thus aims to investigate whether violinists still have enough cues to evaluate violins under playing conditions with sensory masking and if so to determine on which cues they rely to compensate for either type of sensory masking. Furthermore, the paper explores whether these cues lead to consistent evaluation. A list of evaluation criteria related to common specific attributes of violin playing and sound characteristics was chosen for the evaluation process. The investigation was designed to address the relation of these specific criteria to overall quality and preference by directly asking violinists to rate the magnitude, relevance and importance of each criterion in their evaluation. Considering that violinists' choices are based on a compromise — players search for a violin until they find the instrument that reaches an optimal trade-off between the various attributes a good violin should possess — an important question is to know whether the relevance and importance of the criteria change from violin to violin. Moreover, the experimental design intends to assess how these standard criteria relate to each sensory modality to better understand their relative significance for professional violinists. Finally, this study attempts to construct a hierarchy of evaluation criteria that are perceptually relevant to violinists.

Three specific hypotheses are addressed in this study. Anecdotal evidence suggests that

auditory feedback is of crucial importance in the assessment of violin quality — as audition seems to be the most important sensory modality in music performance — and is the most important source of sensory feedback for violin players in an evaluation process. Thus, although previous studies have reported that players are not much impaired by the removal of auditory information when performing, the effect of auditory masking should be very disruptive in quality rating and preference ranking tasks. The first hypothesis of this study proposes that auditory masking should be more disruptive than tactile masking in the left hand.

The second hypothesis derives from the comments of professional musicians about what characteristics a violin should possess for them to like it and buy it. These comments seem to be focused on the sound on the violin, but for apparently opposing reasons. Some violinists report that they would not choose a violin if they do not like its sound, whereas other violinists claim that they do not care much about the sound (unless it is really too “bad”, for instance too nasal) as they can usually “shape” the sound the way they want. Our hypothesis thus predicts that in the preference ranking task, some of the participants will be minimally affected by the auditory masking as regards their choice of the preferred violin while some others will.

A third hypothesis is based on an assumption made by Marshall (1986), which suggests that the sensation of “feel” mainly relies upon the evaluation of how “lively” the violin is. The more the violin vibrates in the left hand, the more “alive” it feels. And the more “alive”, the better. As such, the sensation of “feel” should thus be based on the sensation of the tactile modality. Consequently, the “liveliness” of a violin should be assessable under auditory masking conditions, but not under tactile masking conditions.

To test these hypotheses, it is necessary to investigate the extent to which auditory and tactile feedback can be eliminated without impairing violinists’ playing. The first part of the paper addresses this methodological issue. In the second part of the paper, we address the different hypotheses reported above by testing the effects of playing conditions with different sources of sensory feedback on the answers given by violinists to a set of questions related to quality evaluation and to preference rating.

## 3.2 Method

### 3.2.1 Participants

Twenty classical professional or semi-professional violinists took part in the experiment : eleven females and nine males with a mean age of 28 years old (range : 18-54). They had all achieved a high level of expertise in violin playing (they had at least 14 years of violin experience). None of them reported having auditory or tactile deficits. The violinists were paid for their participation.

### 3.2.2 Violins

A set of five violins of different make and age, ranging from \$20,000 to \$30,000 and made between the early 18th and early 21st centuries, was assembled for this study. The violins

were chosen by a luthier for their different playing and sound characteristics. Also, because we wanted violinists to evaluate violins according to the selected criteria only (see below), the five instruments were chosen to be as equal and standard as possible in size so that no violin could be clearly differentiated from the others on this basis. In the same way, identical shoulder rests (Kun Original model) were used for all five violins. The five violins will be referred to as VA, VB, VC, VD, and VE. Thus, the violin is treated as a fixed effect in our experimental design. Consequently, all the conclusions drawn here are restricted to this particular set of five violins. As in Saitis et al.'s (2012) experiment, each participant performed with her/his personal bow, which through constant use have become, in effect, extensions of their bow arms. Moreover, this is how it works in real life : when trying out instruments, violinists typically use their own bows. We are aware that the bow can change the quality perceived but this is beyond the scope of this paper. We are indeed not interested in the quality of the violins as evaluated by players but in the difference in quality evaluation by players in different conditions. What is thus important is to have the same player, using the same bow, evaluating the five instruments in each condition.

### 3.2.3 Procedure

The experiment employs a blind evaluation task in which the violinists played and rated violins based on criteria related to violin attributes and according to their overall preference. The experimental session was divided into four playing conditions with different combinations of sensory feedback. Each violinist participated in all four conditions, and was free to play whatever he or she liked. The experiment took place in a room specifically designed for musical performance and recording at the Centre for Interdisciplinary Research in Music Media and Technology at McGill University (floor surface = 26.7 m<sup>2</sup>, volume = 90.7 m<sup>3</sup>).

In the first condition (“Holding Only”), participants were asked to order a set of violins by preference just by holding the instruments, without bowing or plucking. This specific task was intended to provide information about violin haptic perception (e.g. weight, center of gravity, thickness of the neck) uncoupled from auditory perception. It also intended to uncouple the effects of both types of touch with regard to violin preference as it involves active touch only. Note that, in this study, we distinguish the two types of touch presented previously, because we mainly intend to mask the violinists’ tactile sensation while playing. Hence, except in this first condition where we investigate active touch only, throughout the rest of the article “tactile modality” refers to the cutaneous receptors that transduce passive vibrotactile feedback of the instrument.

Consequently, this preliminary condition is not a real playing condition, as violinists were not allowed to play the instruments. The participants were presented with one violin at a time, and the order of presentation of violins was randomized within participants. They were asked to hold the instruments as for normal playing, positioning their left hand on the neck of the instrument and their chin and shoulder on the body of the violin ; they could finger notes and even put the bow on the strings, but were not allowed to make any sound. The task was to order the violins by preference just by feeling them. The main point was to study whether a violin of a set can stand out in a preference ranking task based on haptic cues alone.

Apart from the initial holding condition, the order of the three other conditions was counterbalanced across participants. They were asked to play and evaluate the set of violins, under normal playing conditions (N), with auditory masking (noA) and with vibrotactile masking (noT). There were no time constraints. Within each playing condition, the order of presentation of violins was randomized and the participants were instructed to complete a series of evaluation tasks for one violin at a time. All answers were entered directly into a Matlab interface designed for the experiment by means of on-screen sliders. The evaluation procedure involved three main components :

1. For each violin, participants were first presented with eight different perceptual descriptors of violin playing and sound characteristics (see below), appearing one at a time in random order. They were asked to assess the magnitude, relevance and importance of each criterion, which was presented in the form “the violin is X”. The magnitude of each criterion was assessed by moving an on-screen slider along a continuous scale labeled “strongly disagree” on the left and “totally agree” on the right. They then had to answer the question : “Is this criterion relevant to you?” and explain their choice. If “yes”, then they had to assess the importance of the criterion in their evaluation of the violin by moving an on-screen slider along a “not important” / “very important” scale. If “no”, then they could indicate the reasons by ticking as many boxes as appropriate, namely, “I cannot evaluate this criterion on *this violin*”, “I cannot evaluate this criterion in this *playing condition*”, “I cannot evaluate this criterion because it *does not mean anything to me*”.
2. Then, ratings of the overall quality of each violin were made by moving an on-screen slider along a “bad quality” / “good quality” scale.
3. Finally, when the first two components were completed for all five violins, participants were asked to rank the five violins by preference and were able to replay all of them. Equal ranking between violins was permitted. Preference ranking was performed by moving five on-screen sliders, whose colors represented the different violins, along the same “least-preferred”/ “most preferred” scale. The violinists were instructed to use the entire slider range in their ranking, placing the most preferred and least preferred violins at the extremes of the scale and positioning the others in terms of relative preference along the scale. The positions of the five sliders along the preference axis thus constitute scores between 0 and 1 regarding violin preference.

Obviously, to be able to rate the different violins according to the different criteria, violinists needed to know the range covered by the five violins. Thus, between the first condition (“Holding Only”) and the three other conditions, violinists were given 20 min to play and freely explore the five violins under normal conditions to familiarize themselves with the violins. During this time, they were told they should get an approximate idea of the range of variation along each of the criteria within the set of violins. Also, participants had 10 min before each condition to familiarize themselves with the experimental playing situation by performing on their own violin taken as a reference.

No constraints were imposed on the musical style and repertoire used by the violinists during the experiment. Upon completing the session, participants filled out a questionnaire concerning

their musical practice and details about the violin they own or play on regularly, including the maker’s name, the year, and the origin. The experiment lasted approximately two and a half hours.

***Evaluation criteria.*** The selection of criteria used in the experiment was based on previous studies investigating violin quality (Fritz et al., 2012b; Saitis et al., 2012). The criteria were assumed a priori to be evaluatable through one or both sensory modalities under study, so that all criteria were presented under all sensory feedback conditions.

As in Saitis et al.’s experiment (2012), we decided to present the criteria in the form of a short sentence followed by a short explanation to ensure a common interpretation of each descriptor. Since one purpose of this study is to test our third hypothesis that the evaluation of the descriptor “Liveliness” relies upon tactile information only, no detailed explanation was given for this criterion in order to not orient violinists towards one particular modality. The eight criteria included :

- **EASE OF PLAYING** : the violin is easy to play, speaks easily = the violin requires minimal effort to produce sound, easy to avoid wolf tones, easy to “get around” the instrument.
- **LIVELINESS** : the violin is lively.
- **RESPONSIVENESS** : the violin is responsive, speaks quickly = the violin has an immediate response to pressure and speed, there is no delay in response (almost no time between touching the string and the desired sound being produced).
- **SOUND RICHNESS** : the violin has a rich and full sound = the violin produces a sound that is rich in harmonics and overtones.
- **DYNAMIC** : the violin has a broad dynamic range, from piano to forte
- **LOUDNESS/POWER** : the violin is loud and powerful.
- **EVENNESS** : the violin is well-balanced across the strings.
- **SOUND PALETTE** : the violin has a broad sound palette with different colors.

### **3.2.4 Apparatus – Control of sensory loss**

#### **3.2.4.1 Visual feedback control**

The experiment took place under low lighting conditions, and dark sunglasses were worn by the violinists to prevent detailed visual feedback. Indeed, running the experiment in a dark environment guarantees that participants are not able to visually recognize the instruments because of the color and texture of their wood and varnish. Nevertheless, they could see enough to comfortably play and complete the evaluation task on the computer screen.

#### **3.2.4.2 Auditory feedback masking**

To investigate the extent to which auditory feedback could be eliminated, a preliminary study was carried out. The combination of attenuating earmuffs in addition to in-ear monitors playing white noise was chosen to prevent the musician from hearing the airborne sound produced by the violin. We decided to use an auditory masking noise with a bandwidth of 20-20,000 Hz that has been shown to be effective in eliminating one’s own auditory feedback at all levels without



exceeding tolerance levels (Schliesser and Coleman, 1968)).

The masking noise level for violin auditory feedback was determined in two steps. First, a volunteer violinist was recruited to record sound levels that typically exist in violin playing. He was equipped with head-microphones (Soundman OKM II Classic/Studio A3) and earmuffs (Bilsom Lightning L3, SNR 34 dB). He was asked to play forte on the G-string of a violin considered as the most powerful string. The sound level was recorded in the violinist's ear canals after a first attenuation from the earmuffs. Unsurprisingly, it was found that the earmuffs did not sufficiently attenuate the sound level to make it inaudible and that the sound level measured at the left ear was stronger than the one at the right ear, due to the side on which the violin is held. The level of the masking noise was chosen to correspond to 6 dB above the violin sound level recorded at the left ear. In addition, due to their design, the in-ear monitors used to play the masking noise contributed to further reduce the sound level. As a second step, the masking noise level was calibrated using a B&K Sound Level Calibrator (type 4231) placed at a distance of 2 cm from the left earphone through a tube mimicking the external ear canal. In the end, it was found that the combination of earmuffs and in-ear monitors playing white noise at 90 dB SPL masked the violinists' auditory feedback. Finally, passive anti-vibration material (Vibra Block® Sound Deadening Material) was added to the chin rest to damp the sound that could be perceived via bone conduction through the jaw.

During the experiment, participants reported not being able to recognize the pitch of the notes being played, but were able to slightly detect that they were playing, ensuring a minimum playing comfort. One can infer that this feeling probably relates to bone-conducted feedback at the jaw and shoulder. However, it was impossible to eliminate completely the "sound" transmitted through bones for several reasons. One solution would be to add a huge and massive block that cut the vibrations at the chin and shoulder. But this could not be achieved without damping the violin itself. Another solution was to anaesthetize the body region of interest in each participant. Because the goal of the study was to let violinists play as comfortably as possible, and not only under auditory masking condition but under different playing conditions, this solution was not considered.

It should be noted that all violinists but one could evaluate violins under the auditory masking condition. Although the one exception had "naturally" performed on all five violins during the familiarization phase, she considered during the evaluation phase that no criterion was relevant to her because of the playing condition and thus decided to skip this particular condition.

### 3.2.4.3 Tactile feedback masking

As discussed previously, different contact points exist between the violinist's body and the violin in a playing situation. Since the bow is the first mechanical link in the chain that produces sound, it is impossible to disturb the right hand holding the bow without impairing the playing. We thus decided to primarily mask the vibrations that can be felt by violinists through the left hand, which has been claimed to be an important cue to the perception of how a violin feels (Marshall, 1985; Hutchins, 1985; Woodhouse, 1998), and to simply attenuate the vibrations that

can be perceived through the jaw and shoulder.



FIGURE 3.1 – Vibrating rings worn by the violinists during the experiment

Three vibrating rings to be worn on the thumb, index and ring fingers of the violinist's left hand were constructed (see Fig. 3.1). Each ring consisted of a small vibrator (Dayton Audio DAEX13 Mini Exciter Pair 13mm) held tightly between the finger and an elastic band so that the vibrating surface was in direct contact with the skin of the finger. When vibrating, the rings transmitted the vibrations to the finger flesh and bone. It has been shown that skin sensitivity to vibratory stimuli is dependent on stimulus frequency in the range from near 0 Hz to approximately 1000 Hz (Verrillo, 1962). The maximal sensitivity of the hand has been found to be in the region around 300 Hz (Verrillo and Gescheider, 1992). The most sensitive frequency range for the skin of the hand is thus within the register of the violin, whose four open strings have fundamental frequencies at 196 Hz, 293 Hz, 440 Hz, and 659 Hz, the lowest note being G3 (196 Hz) (Askenfelt and Jansson, 1992). We thus decided to use a tactile masking noise with a bandwidth of 10-1,000 Hz to feed the three vibrating rings.

To investigate whether and to what degree the vibrotactile feedback that reaches the left hand might be affected by tactile masking noise, a preliminary experiment was carried out prior to the present experiment. The goal was to determine approximately the masking threshold corresponding to the experimental set-up. Subsequently, a gain of 6 dBV (voltage relative to 1V) was added to this masking signal. Fourteen violinists with regular violin practice took part in the study. Participants were equipped with the three vibrating rings worn on the left hand at the beginning of the experiment and had to wear them during the whole session. However, the rings vibrated only during the tactile masking condition. Violinists were invited to play a scale at a dynamic of *forte* on their own violin and on a student violin available in the lab, in order to select two notes on each violin that they felt conveyed the strongest vibration to the left hand. The masking threshold was determined for each violin and for each note selected, employing a psychophysical adaptive staircase procedure. While continuously playing the selected note at a dynamic of *forte*, the 10-1,000 Hz vibrating stimulus was changed in level by the experimenter in successive, discrete steps, and the observer's response to each stimulus presentation was either

“violin felt” or “violin not felt”. The vibrating stimulus was initially too weak to mask the violin neck’s vibrations, so that the answer was “violin felt”; the level was then increased in steps until the violin neck’s vibration became imperceptible (ascending series). Five reversals in intensity (i.e., five turn-points corresponding to three “violin not felt” and two “violin felt” answers) were taken to estimate the masking threshold. Then, a sinusoidal signal was recorded as an RMS voltage value to calibrate the experimental set-up at the threshold level. The procedure was repeated twice for each note. There was little difference in the threshold level between two repetitions, but, unsurprisingly, the masking threshold was found to be dependent on the violin and the note played on it. The level of tactile masking noise was thus selected to correspond to the maximum masking threshold collected, converted to dBV units and then augmented by 6 dBV. In the end, the tactile masking noise level was set to 9.5 dBV in the rings, and vibrotactile attenuation at the jaw and shoulder was achieved by adding the same passive anti-vibration materials as described in the previous section to the chin and shoulder rests.

### 3.3 Results

#### 3.3.1 Violin preference task through active touch perception only

Figure 3.2 presents the mean preference ratings for each violin in the “Holding Only” condition. In this condition, violins VA and VC seem to be broadly liked, based on haptic comfort (i.e., comfort in manipulating the instrument) only, whereas VB seems not to be liked.

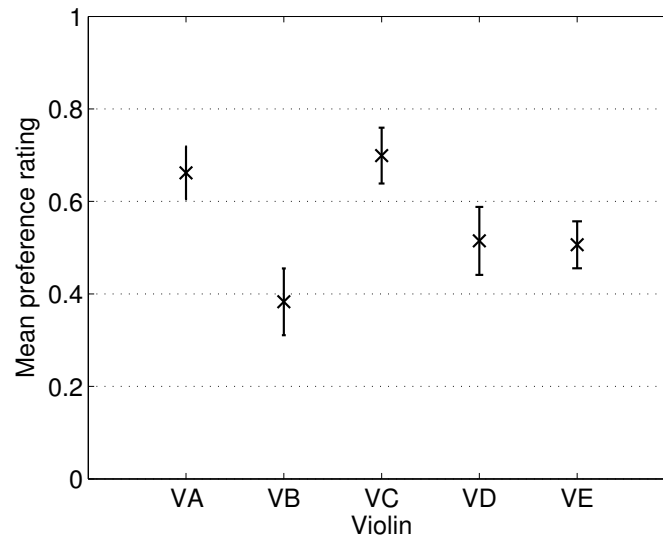


FIGURE 3.2 – Means of between-subjects preference ratings in the “Holding Only” condition. The vertical bars represent the standard errors of the mean

The overall raw effect of violin, measured as the Root Mean Square (RMS) of the pairwise mean differences, is  $RMS = 0.18$ , a rather limited value on the scale [0-1]. A repeated-measures analysis of variance (ANOVA) on the ratings with Huynh-Feldt correction for sphericity shows a significant effect of violin,  $F(3.80, 72.17) = 3.79, \epsilon = 0.78, p = 0.009$ , but of relatively moderate magnitude. Following suggestions and recommendations by Wilkinson and Task Force on Statistical Inference 1999, Bayesian statistical procedures were adopted in this study (Rouanet et al., 1998), using PAC software (Lecoutre and Poitevineau, 1992). Assuming an uninformative prior distribution<sup>2</sup>, a Bayesian credibility interval indicates that given the data, there is a 95% probability that the population **RMS** is higher than 0.13 and lower than 0.27 (notated  $Pr^*[0.13 < \text{population } \mathbf{RMS} < 0.27] = 0.95$ <sup>3</sup>).

2. An uninformative prior expresses an initial "state of ignorance" about the parameter. No information is used other than what is contained in the data, no particular hypothesis is favored a priori. Otherwise stated, uninformative means "Let the data speak for themselves."

3. Throughout the rest of the article, Bayesian statements will be denoted by  $Pr^*$ ; naturally they are conditional on the data at hand, but, for sake of brevity, the conditional notation is omitted.

Participant n°	N and noA	N and noT	Participant n°	N and noA	N and noT
1	0.2	0.4	12	0.3	0.6
2	0.6	0.9	13	0.8	0.1
3	0.1	0.5	14	0.0	0.5
4	0.7	0.1	15	-0.4	0.6
5	1.0	1.0	16	1.0	0.9
7	0.3	-0.6	17	0.6	0.5
8	0.7	0.9	18	0.2	0.6
9	0.3	0.4	19	-0.3	0.3
10	0.5	0.8	20	0.2	0.9
11	0.2	-0.2	<b>Mean (SD)</b>	<b>0.4 (0.4)</b>	<b>0.5 (0.4)</b>

TABLE 3.1 – Pearson correlation coefficients (df=3) between preference ratings made under the normal condition and each sensory masking condition by participant <sup>5</sup>

### 3.3.2 Violin preference under different sensory feedback conditions

Saitis et al. 2012 showed that violinists are self-consistent in a preference ranking task under normal feedback playing conditions. For this reason, the normal condition is considered as the baseline situation in the following analyses. Therefore, in this section, the preference ratings and rankings made under the sensory masking playing conditions are discussed in relation to those made under the normal feedback playing condition.

#### 3.3.2.1 General variability between conditions

We use the Pearson correlation coefficient as an index of the impact of sensory masking on the preference ratings made in the normal condition. Table 3.1 presents the coefficients of correlation between the preference ratings under the normal condition and each sensory masking condition. The data are presented by participant.

Table 3.1 does not show any overall trend across participants as regards the levels of correlation between preference ratings made under the normal condition and each sensory masking condition. Indeed, it can be seen that some participants have higher correlation between N and noA than between N and noT, whereas it is the opposite for some others. And for still others, other trends are observed : high correlation between N and noA *and* N and noT, or no correlation either between N and noA *or* N and noT

It was hypothesized that auditory masking is more disruptive in the preference ranking task than tactile masking, i.e., correlation between N and noA is lower than correlation between N and noT. With our data, the mean difference between N vs. noA and N vs. noT is  $-0.12$ , 95% CI  $[0.37; 0.13]$ ,  $t(18) = -1.02$ ,  $p = 0.16$  (one-sided),  $Pr^*[\text{true difference} < 0] = 0.84$ . So, although the observed difference is negative as expected, the possibility of a positive (or null)

5. Violinist # 6 did not complete the auditory masking condition.

population difference cannot be ruled out with sufficient confidence to infer the same conclusion at the population level (we would stated 0.95 as our minimal guarantee). Consequently, our first hypothesis cannot be statistically confirmed in the preference ranking task.

It is interesting to compare our results with those of Saitis et al.'s experiment (2012) in which 20 violinists performed two exact repetitions of the preference ranking task under normal feedback conditions. With their findings, the mean of across-participant Spearman correlation coefficients was quite high :  $\rho$ -mean = 0.62 (SD=0.36). In the present experiment, after converting the ratings into rankings, the mean Spearman rank correlations between rankings made under normal and each sensory masking condition (N vs. noA, 19 participants / N vs. noT, 20 participants) are both equal to 0.35 (SD=0.39 and 0.41, respectively). If we compare Saitis et al.'s results to our N vs. noA results, on the one hand, and to our N vs. noT results, on the other hand, the two differences are similar : mean difference = 0.27, 95% CI [0.02 ; 0.51],  $t(37 \text{ or } 38) = 2.21$ ,  $p = 0.02$  (one-sided), and there is a 71.1% probability  $Pr^*$  that it is higher than 0.20, considered as a substantial difference value. This result suggests that, as could be expected, violinists tend to show less variation when repeating the ranking task twice under the same normal feedback condition than when repeating the task with sensory masking. It is therefore likely that the differences observed in the preference ratings and rankings of the sensory masking conditions regarding the normal playing condition result from the deprivation of either auditory or vibrotactile feedback or both sources of feedback and not from a lack of consistency in the musicians' ratings.

To test our second hypothesis that the most preferred violin of the set in the preference ranking task is affected by the auditory feedback for some violinists and not others, we counted the number of times the instrument kept its ranking across conditions. In what follows, for each participant we define the so-called "most preferred" violin as the one that occupies the first position in the ranking made in the normal condition, and we consider that if this most preferred violin is the same in both conditions N and noA (resp. N and noT), the violinist is not affected by auditory (resp. tactile) masking. We thus found ten violinists affected by auditory masking and nine violinists not affected (in the noA set one violinist was omitted). The 95% CI for the proportion of violinists who are not affected by auditory masking in the total population of violinists is [0.24 ; 0.71]. Incidentally, there are 14 violinists affected by tactile masking and six not affected by tactile masking. This finding would be in line with the previous result showing that neither type of sensory masking was clearly more disruptive in the preference ranking task than the other and suggests that the importance of the sensory feedback from a given modality to the preference judgment depends on the violinist. With these findings, our second hypothesis is verified : the fact that the most preferred violin of the set remains the same over the different sensory feedback conditions appears to be critically dependent on the violinist.

### 3.3.2.2 Auditory vs. tactile feedback involved in violin preference

Figure 3.3 shows the mean preference ratings of the five violins under the three playing conditions. As a complement, Tables 3.2 (a) and (b) show the number of times each violin was most preferred (first in the ranking) and least preferred (fifth in the ranking) by condition, respectively.

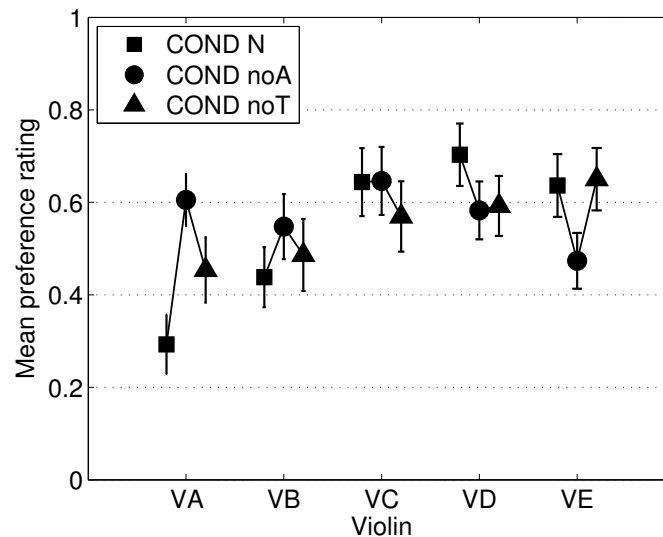


FIGURE 3.3 – Mean preference ratings under the three playing conditions. The vertical bars represent the standard errors of the mean

There is no clear consensus on the most preferred or least preferred violins in any of the three playing conditions. In other words, there is neither a violin with a mean rating close to 1 nor a violin with a mean rating close to 0, which would be the most preferred and least preferred violins by consensus, respectively. These results confirm that violin preference is highly individual (Saitis et al., 2012), which orients further analysis towards within-participant analyses. The variability of preference ratings across participants does not depend on the violin, because the bars representing the standard errors of the mean are of relatively equal magnitude across the five violins (Figure 3.3).

Under the normal playing condition (squares in Figure 3.3), the violins can be divided into two groups. The first group would be violins VC, VD, VE with a high mean preference ratings above 0.6. These violins were chosen about equally often, by between one quarter and one third of the participants (Table 3.2 (a)). By contrast, violins VA and VB differentiate themselves as the least-preferred ones on average (Figure 3.3 and Table 3.2 (b)) and were preferred only once each (Table 3.2 (a)). These violins constitute the second group, having a mean preference rating below 0.5.

For violins VA, VB, VD and VE the mean preference ratings of condition noT are closer to the mean preference ratings of condition N (triangles and squares in Figure 3.3) than those of the noA condition (circles in Figure 3.3). More similarities thus seem to be observed between the mean ratings under the normal playing and tactile masking conditions than between those

(a)						
	Violin					no answer
	VA	VB	VC	VD	VE	
COND N	1	1	7	6	5	0
COND noA	3	5	8	2	1	1
COND noT	2	4	5	3	6	0

(b)						
	Violin					no answer
	VA	VB	VC	VD	VE	
COND N	12	4	2	1	1	0
COND noA	2	4	5	3	5	1
COND noT	6	6	4	2	2	0

TABLE 3.2 – Number of times each violin was most (a) or least (b) preferred by condition

under normal and auditory masking conditions. This could suggest that on average auditory masking has a greater effect on preference than does vibrotactile masking, although this is not necessarily the case at an individual level, as previously pointed out.

Inspection of Figure 3.3 shows that under conditions of sensory masking (circles and triangles), the mean preference ratings are of relatively equal magnitude within the five violins (range noA : 0.47-0.65 ; range noT : 0.45-0.65), and are less different among themselves than in the normal reference condition (range N : 0.29-0.70). No violin stands out in the set of instruments, and it is harder to divide violins into groups. This means that there is less of a perceptual difference among the instruments when eliminating not only auditory cues, but also, more interestingly, the vibrotactile information.

Furthermore, Figure 3.3 provides important new data on the role of auditory feedback. Under the auditory masking condition, the mean ratings of violins VA and VE fluctuate relative to the normal-feedback condition, whereas the ratings barely change for violin VC. Moreover, the direction of variation of the ratings between the normal and auditory masking conditions depends on the violin. For VA the mean rating is indeed higher when not heard, whereas the opposite happens for VE. From this observation, it can be hypothesized that there are three types of violins. Violins of the first type are preferred for their sound, becoming more ordinary, thus less preferred when they are not heard (i.e., "sound good" violins with no particular good feel). Violins of the second type are not preferred for their sound and are thus more preferred when not heard (i.e., "feel good" violins with no particular good sound). Lastly, some violins have something special that does not relate to their sound characteristics. These observations suggest that the contribution of audition to the evaluation of violins with respect to preference depends on the violin.

The preference ratings in the normal condition were subtracted from the ones in the noA condition for the 19 participants who completed the task. The overall raw effect of violin,



measured as Root Mean Square (RMS) of the pairwise mean differences, is  $RMS = 0.26$ . A repeated-measures ANOVA on the difference between ratings shows a significant effect of violin,  $F(3.66, 65.95) = 5.42$ ,  $\epsilon = 0.75$ ,  $p < 0.01$ , which means that the effect of auditory masking on preference ratings depends on the violin ( $Pr^*[\text{population } RMS > 0.18] = 0.95$ ). Post-hoc analyses (with Bonferroni correction) show that violin VA is significantly different from violins VC ( $p = 0.03$ ), VD ( $p = 0.01$ ) and VE ( $p = 0.02$ ).

### 3.3.2.3 Auditory + tactile feedback vs. haptic comfort

Comparisons between means of preference ratings for each violin while holding only (Figure 3.2) and while playing under the normal-feedback condition (squares in Figure 3.3) show that a violin can be highly rated with regards to tactile comfort and poorly rated when played. Therefore, haptic-only information does not seem to play such an important role. As could be expected, violinists seem to rely more on auditory and vibrotactile cues, at least to reject a violin. However, it is important to note that the violins were chosen to be geometrically similar so it was not easy to differentiate them by only holding them and with seriously reduced visual information.

## 3.3.3 Criteria evaluation and overall quality rating

### 3.3.3.1 Within-participant coherence

Not only did the participants have to rate the magnitude of the criteria and their importance in their evaluations, but they were also asked to rate the overall quality of the violins on a “bad to good” rating scale (coded 0-1). Note that each time a criterion was reported not to be relevant, the corresponding importance was set to zero.

For each condition, violin and participant, the weighted sum of criteria was calculated as the sum of the products of each criterion’s magnitude rating and its importance rating, divided by the total sum of those importance ratings. The weighted sum of the ratings is thus another way to give a violin a score for a given condition and participant. We then correlated the violin scores with the overall quality rating for each participant in each condition. The mean correlation coefficients averaged over participants are shown in Table 3.3, which reveals a moderate to strong association between the way participants rated the criteria and the way they rated the overall quality of the violins under each playing condition. The participants thus appear to be very coherent in their evaluation. Given that higher values on the criteria are considered to reflect more desirable qualities of a violin, it would appear that the criteria taken together are relevant to the global quality.

	Mean correlation coefficient	Standard error of the mean (sample size)	95% Confidence Interval
COND N	0.85	0.05 (20)	[0.73 ; 0.96]
COND noA	0.67	0.11 (17* )	[0.43 ; 0.91]
COND noT	0.89	0.04 (20)	[0.81 ; 0.97]

TABLE 3.3 – Mean (averaged over participants) Pearson correlation between the weighted sum of the criteria ratings and the overall quality ratings for the five violins under the three playing conditions

\*Three participants had missing data for at least three violins in the noA condition (in addition to violinist # 6, two violinists considered that none of the eight criteria were relevant to them when evaluating three and four violins, respectively) so that the correlation was not computed.

Giving the same weight to all criteria of the list (i.e., calculating the sum of the importance ratings divided by the total number of relevant criteria) gives very similar correlation coefficients, although they are slightly smaller. The error in estimation of a participant is measured as the absolute difference between his/her overall quality rating and the estimated quality (whether weighted or unweighted) averaged over the five violins. It is interesting to see whether the weighting reduces this error of estimation. The differences between the error with weighting and the error without are rather similar in N, noA and noT conditions : mean difference =  $-0.01$  in N and noT conditions and  $0.0$  in noA condition. In all conditions it can be asserted that the true (population) difference between the two methods is negligible, because the larger limit (defined as  $Pr^* [ |\text{population difference}| < \text{limit} ] = 0.95$ ) is only  $0.01$  (1% of the full rating scale). This will be discussed in the next section.

### 3.3.3.2 Towards a hierarchy of criteria in normal playing condition

Figure 3.4 shows the mean importance and magnitude ratings, averaged over the five violins. The data are plotted as a function of the eight criteria, and the error bars represent the standard errors.

Averaged over the violins, the means of the importance ratings are fairly high for all criteria, ranging from  $0.62$  (Liveliness) to  $0.88$  (Richness). The dependence of observed criterion importance on the violins is not strong; the  $p$ 's — corresponding to a repeated measures ANOVA conducted on the importance ratings — range from  $0.17$  to  $0.99$  for all criteria but Richness for which  $p < 0.01$ . We can conclude that differences among violins are small for the whole population of participants and for all criteria, because the highest RMS limit, obtained for Liveliness, is only  $0.08$  on a scale of  $[0-1]$ . (Although the effect of violins on the importance ratings of the “Sound Richness” criterion is significant, its RMS limit is only  $0.07$ ).

The means of the magnitude ratings over the violins range from  $0.58$  (Palette) to  $0.69$  (Even-

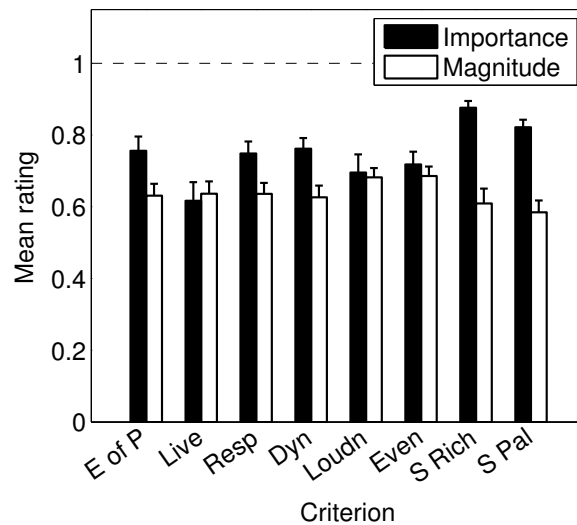


FIGURE 3.4 – Means of the importance and magnitude ratings under normal playing conditions, averaged over the five violins, under the normal condition. The vertical bars represent the standard errors

ness) (Fig. 3.4). Although the differences among the violins seem to be more pronounced than for the importance ratings, no significant effect of violin is found for any of the criteria ( $p$ 's — corresponding to a repeated measures ANOVA on the magnitude ratings — ranging from 0.36 to 0.97, and the maximum RMS limit at 95% is 0.17). This results from the large inter-variability and the fact that in average, the violins are rather similar.

The fact that both magnitude and importance ratings were collected during the experiment enables us to test whether violinists agree on the importance of each selected attribute more than on the actual evaluation of those criteria in the normal feedback condition. This investigation intended to assess whether the inter-participant variability of the ratings of each criterion's importance was smaller than the magnitude ratings of each criterion. Figure 3.5 shows the arithmetic means over the five violins of the standard deviations of the importance and magnitude ratings.

As seen in Figure 3.5, the mean standard deviations with regard to criteria magnitude are relatively equal among criteria (between 0.23 and 0.26). This suggests that, as expected, the large inter-participant variability does not exist in violin preference only but in the evaluation of specific attributes of violin playing and sound characteristics as well.

The average standard deviations with regard to criterion importance vary a great deal across the rating criteria (Fig. 3.5). Less inter-individual variability is observed for importance than for magnitude, because for all but two criteria, the average standard deviations of the importance ratings are lower than those of the magnitude ratings. At least for some criteria, violinists thus seem to agree more on their importance than on the magnitude of those criteria for different violins. Note that both criteria directly related to the sound of the instrument, namely “Sound

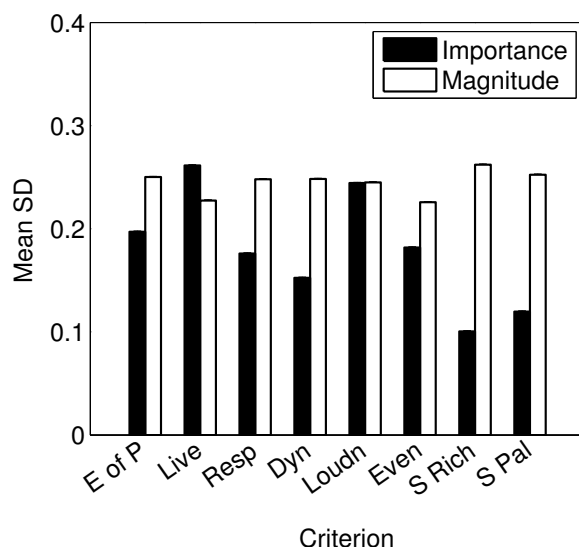


FIGURE 3.5 – Arithmetic means over the five violins of the standard deviations of the importance and magnitude ratings, under normal playing conditions

Richness” and “Sound Palette”, were most commonly rated as important in the violinists’ evaluations as expressed by their high mean importance rating (Fig. 3.4) and by low values of their standard deviations (Fig. 3.5), around 0.10. By contrast, the largest variabilities are found in the ratings of the importance of “Liveliness”, “Loudness”, “Evenness” and “Ease of Playing” (average standard deviations greater than 0.2). The fact that the variances are lower for importance than for magnitude is confirmed, using the Pitman-Morgan test for differences between correlated variances, for “Sound Richness”, “Sound Palette” and “Dynamics” : for the first two criteria,  $p \leq 0.02$  for all violins, while for the third,  $p \leq 0.05$  for all violins but VB for which  $p = 0.06$ . For the other criteria, there is no clear trend with variations from one violin to one another (and  $p$ ’s ranging from 0.01 to 0.64). These observations support the view that criteria related *a priori* more directly to violin sound are of major importance in violinists’ perceptual evaluations, whereas violinists agree less on the importance of criteria related *a priori* to both violin playing and sound characteristics.

### 3.3.3.3 Effect of auditory and tactile masking on criteria evaluation

Because the instructions allowed violinists to decide whether a given criterion was relevant or not, the ratings are consistent neither across violins nor across conditions. The results contained many empty cells. Therefore, the data on criterion assessments were not subjected to inferential statistical analyses. The ranges of the number of times each criterion was found to be relevant to the violinists across violins are given in Table 3.4. The data are presented by criterion and condition.

For the total number of times a criterion was found to be irrelevant, the “playing condition” was primarily responsible at 90.7%. The “violin” accounted for 8.7%. Finally, “because the cri-

	COND N	COND noA	COND noT
<i>Sample size</i>	<i>20</i>	<i>19</i>	<i>20</i>
Ease of Playing	[20 - 20]	[16 - 18]	[18 - 19]
Liveliness	[18 - 20]	[11 - 13]	[18 - 19]
Responsiveness	[20 - 20]	[15 - 17]	[19 - 20]
Dynamics	[20 - 20]	[10 - 12]	[20 - 20]
Loudness	[19 - 20]	[12 - 13]	[19 - 20]
Evenness	[20 - 20]	[11 - 13]	[19 - 20]
Sound Richness	[20 - 20]	[9 - 11]	[20 - 20]
Sound Palette	[20 - 20]	[6 - 9]	[20 - 20]

TABLE 3.4 – Range of number of times each criterion was found to be relevant across violins in each condition

COND	Ease of Playing	Live- -liness	Respon- -siveness	Dynamics	Loudness	Evenness	Sound Richness	Sound Palette
N	20	18	20	20	20	20	20	20
noA	17	12	15	10	11	8	8	6
noT	19	18	20	20	20	20	20	20

TABLE 3.5 – Number of times each criterion was found to be fully relevant by criterion and condition.

terion did not mean anything” accounted for only 0.6%. Hence, the list of selected criteria is validated by this latter result, that is to say, the list makes sense to the violinists. This finding is coherent from another viewpoint with the previous observation that in all playing conditions the criterion assessments accurately predicted the overall quality ratings. We assume that under a certain sensory feedback playing condition a criterion was considered “fully” relevant to the violinists’ criterion evaluations if for at least four violins of the set, the question “Is this criterion relevant to you?” was answered positively. The number of times each criterion was found to be “fully” relevant to the violinists is given in Table 3.5. The data are presented by criterion for each condition.

Under the normal conditions of feedback, almost all violinists evaluated almost all criteria, and all but one or two violinists found the criteria relevant with a loss of tactile sensation. Under the auditory masking condition however, on average only half of the violinists assessed the criteria, the exact number depending on the criterion. The fact that a much greater number of violinists found some criteria more relevant in the tactile masking condition than in the auditory masking condition again suggests that, on average, an absence of auditory feedback affects the evaluation of these particular criteria more than does the absence of vibrotactile feedback. Nevertheless, considering that under the noA condition, all criteria were each still

	Mean correlation coefficient	Standard error of the mean (sample size)	95% Confidence Interval
COND N	0.11	0.12 (20)	[-0.14 ; 0.36]
COND noA	0.12	0.13 (19)	[-0.15 ; 0.39]
COND noT	0.32	0.12 (20)	[0.07 ; 0.57]

TABLE 3.6 – Mean (averaged over subjects) Pearson correlation (df=3) between the preference ratings and the overall quality ratings for the five violins under the three playing conditions

relevant to about one third of the violinists, one could argue that the auditory masking is not necessarily more disruptive at an individual level. This is in line with what was obtained for the preference ratings regarding the level of correlation between normal and each sensory masking condition.

Inspection of Tables 3.4 and 3.5 provides information on the respective contribution of each sensory modality to the evaluation process of the criterion in question. The absence of vibrotactile feedback primarily affects the relevance of “Ease of Playing”, “Responsiveness”, although the effect is slight. The absence of auditory feedback has a strong effect on the relevance of “Sound Richness” and “Sound Palette” and a moderate effect on the relevance of “Ease of Playing”, “Liveliness”, and “Responsiveness”. There is thus evidence of three separate groups of criteria within the list, concerning the sensory modality to which each criterion is related. One group consists of criteria mainly related to audition, namely “Sound Richness” and “Sound Palette”. A second group consists of four criteria that relate to both auditory and tactile modalities. These are “Liveliness”, “Dynamics”, “Loudness/Power” and “Evenness”. Incidentally, one could infer that “Dynamics” and “Evenness” are more associated with auditory cues than the other two considering the number of violinists who have difficulty assessing them in the absence of auditory feedback. Finally, the group consisting of “Responsiveness” and “Ease of Playing” includes criteria that depend to a large extent on tactile cues. Incidentally, the relevance of “tactile” and “bimodal” cues is not strongly affected by the absence of tactile cues because, as previously observed, violinists tend to primarily rely on auditory information to assess the evaluation criteria.

### 3.3.4 Overall quality vs. preference

Table 3.6 shows the mean correlations between preference ratings and overall quality ratings by condition, which reveal some interesting facts concerning the violinists’ ratings given the nature of the three playing conditions.

Preference ratings are poorly or weakly correlated with the overall quality in all of the conditions. In other words, one can give a strong, even the best, rating to a violin in an “objectivized” evaluation task — overall quality rating — and then poorly rate that same violin when it comes to preference. What is also remarkable is that the same phenomenon occurs under all conditions,

Participant n°	N and noA	N and noT	Participant n°	N and noA	N and noT
1	-0.2	0.9	12	-0.2	0.3
2	0.3	0.1	13	0.5	-0.3
3	0.6	0.4	14	0.9	0.5
4	0.3	0.2	15	0.6	0.7
5	-0.3	0.1	16	0.9	0.5
7	-0.6	-0.2	17	0.5	0.3
8	-0.8	-0.2	18	-0.2	0.2
9	-0.6	0.0	19	0.6	-0.4
10	-0.8	-0.8	20	0.9	0.2
11	-0.4	-0.02	<b>Mean (SD)</b>	<b>0.1 (0.6)</b>	<b>0.1 (0.4)</b>

TABLE 3.7 – Pearson correlation coefficients (df=3) between the overall quality ratings made under the normal condition and each sensory masking condition by participant <sup>6</sup>

suggesting that violin preference judgments are commonly unrelated to violin “value” judgments. Incidentally, multiple regression did not find any significant relationship between preference and the eight criteria. In addition, as for the preference ratings, the individual Pearson correlation coefficients were computed between overall quality ratings made under the normal condition and each sensory masking condition (Table 3.7). In this case too, no clear difference between the noA and the noT conditions are observed.

### 3.4 Discussion and conclusions

The present paper has investigated the role of auditory and tactile feedback in the left hand in violin quality evaluation and preference rating. One question raised in the introduction was to know whether violinists could play on and evaluate violins without feedback from one of these sensory systems. In this experiment, all 20 violinists were able to carry out the evaluation task under the condition with tactile masking in the left hand (noT) and all but one under the auditory masking condition (noA). This means that violinists can play and evaluate violins without feeling violin vibrations in the left hand or without hearing themselves. So in both cases, they appear to have sufficient cues from the other sources of sensory information to overcome the impairment induced by masking to some extent. This study can be interpreted as tentative support for Finney’s (1997) observations that the absence of auditory feedback does not cause severe playing impairment (otherwise violinists would not have been able to carry out the task) and extends these findings to stringed instrument playing. It furthermore provides new data on the effect of vibrotactile masking on violin evaluation.

Differences among violins in the preference ratings are fairly small, although significantly different, in the condition in which they merely held the violins. Comparisons between means of

6. Violinist # 6 did not complete the auditory masking condition.

preference ratings for each violin while holding only and while playing under normal conditions lead us to conclude that haptic-only information does not seem to play such an important role in preference judgment compared to auditory and vibrotactile cues, in this particular experiment where the violins were chosen geometrically close, not to be easily recognizable.

The first hypothesis made in this study was that auditory feedback is more important than vibrotactile feedback in the left hand in a quality rating task as well as in a preference rating task. It was assumed that the more a given type of sensory masking was disruptive in the evaluation task compared to the normal feedback condition, the more this sensory modality would be important in violin playing and evaluation. As we cannot dissociate the change in individuals' response strategies and the change in the violinists' actual ability to perceive/evaluate the violins, the term disruptive includes both factors. The trend of criterion evaluation being harder was apparent in the auditory masking condition compared to the tactile masking condition given that the number of violinists who found some criteria relevant was much smaller in the auditory masking condition than in the tactile masking condition (see Tables 3.4 and 3.5). Therefore, the strong asymmetry of the effect of sensory masking on the relevance of evaluation criteria (very slight effect for noT, moderate to strong effect for noA) gives tentative support to our first hypothesis, in terms of quality evaluation. Nevertheless, it must be noted that this result cannot be easily generalized at the individual level because all criteria were still relevant to a third of the participants in the noA condition. Considering the preference ratings, on average across participants, auditory masking seemed to have a greater effect on preference than did tactile masking (mean preference ratings in N closer to those in noT than in noA, Figure 3.2). Nevertheless, it was not necessarily the case at an individual level because there was no overall trend across violinists concerning correlations between preference ratings made under the normal condition and each sensory masking condition. Indeed, no greater correlation was consistently found between ratings under N and noT than between ratings under N and noA. Moreover, comparison of N vs. noA and N vs. noT rank correlations with repeated ratings in Saitis et al.'s experiment (2012) show greater variability in our case, suggesting that the sensory perturbation reduces correlation, but to a similar degree for noA and noT. Therefore, despite a trend for auditory feedback being more important than tactile feedback in the violin criteria evaluation and in preference ratings, its relative importance compared to tactile feedback was shown to differ between violinists in both types of ratings.

With our second hypothesis, we expected for some violinists that their most preferred violin in condition N would keep its ranking in the noA conditions. With our data, the preferred violin stayed the same from N to noA for 47% of violinists and changed for 53%. This result shows that what violinists say about the importance of the auditory modality in violin evaluation are not exaggerated claims. It seems clear that there are two groups of violinists as regards their preference : those who rely on auditory cues more than on tactile cues (their most preferred violin did not keep its ranking between normal and auditory masking conditions) and, conversely, those who rely on tactile cues more than auditory cues (their most preferred violin kept its ranking between normal and auditory masking conditions).

Eventually, with these two first hypotheses, the relative importance of audition and the tac-



tile sense was shown to depend on the violinist. But this does not seem to be attributable to simple considerations concerning the background of the participants. Although no constraints were imposed on the musical style and repertoire used during the experiment, it is interesting to note that all violinists played classical music, ranging from simple scales to short excerpts from the most famous violin concertos. The inter-individual differences thus cannot be explained by the type of music they played to evaluate the instruments. Moreover, responses to questionnaires on the music education of the participants do not provide information about the different strategies used in the experiment because they indicate that all participants have the same background in music, play essentially classical music, and almost all of them play a second instrument. We are unable to push this analysis further with this experiment. Given the strong inter-individual differences that are revealed in most studies of violin evaluation, future research could perhaps examine in greater detail, and on a larger population of violinists, whether any relation exists between aspects of musical training and violin evaluation.

Remember that in the noA condition, the tactile information not only consisted of the vibrotactile feedback at the left hand, but also consisted of tactile feedback at the bow hand. Since there was no masking of the right hand, we cannot exclude the possibility that it did play a role. The way the string is excited by the bow and vibrates depending on the interaction between the bow, the string and the violin body can be perceived through the bow and thus provides tactile cues that may be essential for the evaluation of some criteria (for instance “Responsiveness” and “Ease of playing”). Moreover, although we can observe that something passes through the tactile sense because evaluation was not completely disrupted by auditory masking, we cannot quantify the extent to which the tactile information is used in real life. Therefore, it cannot be ruled out that participants changed their evaluation strategy in the sensory masking conditions compared to the normal condition considered as the baseline situation, close to what is done in practice. For instance, we cannot exclude that the masking equipment diverted violinists’ attention from the evaluation task. Nevertheless, considering the complexity of the task, it seems highly unlikely that participants were able to learn the task so quickly and to be so consistent in their ratings if they did not use tactile information, even without being conscious of it, in actual practice.

A list of evaluation criteria drawn from the literature and related to common specific attributes of violin playing and sound characteristics was chosen for the evaluation process. Participants were asked to assess the magnitude and importance of each criterion in the evaluation of each violin. Under all sensory feedback conditions, a moderate to strong correlation between criterion ratings and overall quality ratings was found, demonstrating an impressive coherence in the way violinists carried out the evaluation task. It can thus be argued that violinists relied on cues that led to consistent evaluation of the violins.

The weights of each criterion’s contribution to the evaluation of the violin, estimated from the importance ratings, were shown to be of limited value by the fact that similar correlations were found with equal weights. Further, rating the importance of each criterion in the evaluation

is time consuming. As a consequence of these two findings, we would not recommend asking participants to rate criterion importance in future studies investigating instrument quality.

The criterion evaluation data show less inter-participant variability for ratings of criterion importance than for the magnitude ratings of each criterion. This result completes Saitis et al.'s (2012) observations that violin quality evaluation probably differs between performers “not because different performers prefer violins with largely different qualities, but because the perceptual evaluation of violin attributes widely considered to be important for a good violin vary across individuals” (p. 4011). Our study furthermore demonstrates that the importance of the criteria to the overall evaluation depends little on the violins played, suggesting that violinists have their own list of criteria ordered in terms of significance. Incidentally, our results show that violinists agree on the importance of criteria directly relating to violin *sound* more than on those relating to *playing characteristics* in their criterion evaluations under normal feedback conditions. As a first step, it can be argued that criteria based on auditory cues are taken as the major criteria used by violinists. This result is in line with the fact that the effect of sensory masking on the relevance of evaluation criteria was moderate to strong for noA and very slight for noT. Nevertheless, this finding has to be balanced because criteria associated with the tactile sense (in the noA condition for instance) proved to be relevant enough for violin evaluation. In particular, considering the preference ratings, the contribution of auditory feedback to violin preference depends on the violin. Indeed, auditory masking was found to affect some violin ratings positively, some others negatively, and had no effect on one violin.

The investigation intended to establish a correspondence between the different attributes of a violin and the sensory modality they appear to be associated with. Three separate groups of criteria were suggested. One group consisted of criteria associated nearly exclusively with the auditory modality (“Sound Richness” and “Sound Palette”), another group included criteria associated to a large extent with the tactile modality (“Responsiveness” and “Ease of Playing”), and a third group included criteria associated with both auditory and tactile modalities in a more balanced proportion (“Liveliness”, “Dynamics”, “Evenness”, “Loudness”). Interestingly, the criterion “Liveliness” seems to belong to the last group involving both modalities, which makes it a multimodal feature of a violin, deriving from sensations arriving not only through the tactile sense, but also through the auditory sense. Thus, our third hypothesis based on Marshall’s (1986) assumption needs to be extended. If the feel of a violin actually relies upon the evaluation of its “Liveliness”, then feel may be a multisensory experience as well. Future studies are now needed to further investigate the cross-modal integration process that gives rise to the sensation of feel of a violin.

Similarly, the fact that the criteria “Sound Richness” and “Sound Palette” were evaluated by about a third of the participants under auditory masking conditions could suggest that these terms do not relate unequivocally to sound properties but could be based on multisensory information processing as well. If “Sound Richness” and “Palette” can be evaluated without hearing the sound of the violin, how can acoustic signal properties alone — such as spectral centroid — account for the perceptual criterion ratings? This may explain why correlating physical properties with perceptual properties has been challenging so far.

Last but not least, and very surprisingly, weak correlations were found between how violinists objectively assessed the overall quality of the violin and how they rated and ranked the violins in terms of preference, under any of the sensory feedback playing conditions. While a simple combination of criteria — assigning them equal weight — was found to be well correlated with the overall quality rating, no consistent association between preference and the eight criteria was found across violins. One might suppose that in this experiment, what drove the participants' overall quality ratings came from the stages through which the evaluation proceeded. Although the order of presentation of criteria was randomized across conditions, we cannot exclude the possibility that the participants unconsciously based the overall quality rating on an overall mean of criterion ratings. Nevertheless, considering the complexity of the task, it is more likely that, in fact, the two types of ratings are almost unrelated for the musicians at a psychological level. Preference would thus be based on criteria other than those used in this and other studies. The components of preference have not been identified at this stage. The pleasure of playing could be an important aspect of preference, but its inherent complexity may not easily lend itself to quantitative and analytic measures.

The results of the present experiment indicate that the type of rating — overall quality vs. preference — should be carefully considered in designing an experiment that aims to study instrument evaluation by players. It can be hypothesized that acousticians probably care more about absolute ratings of instruments in their attempt to correlate physical and mechanical properties of instruments with perceptual instrument quality, whereas instrument makers may find that preference rating is of crucial importance.

Despite the fact that musicians and acousticians agree that the “feel” of traditional instruments — as opposed to their sound — is important, no study had been conducted so far to investigate how the “feel” is important for the evaluation of instruments. This study clearly shows that tactile information does play a role in instrument evaluation as violinists' evaluations were not completely disrupted by auditory masking. It also points to the possible multisensory processes that are likely to occur during evaluation and which constitute important questions to gain more scientific information on.



# Caractérisation vibratoire des violons, et étude d'un cas particulier (comparaison VD/VE)

## 4.1 Introduction

Quatre instruments « physiquement distincts » ont été utilisés dans l'étude perceptive présentée au Chapitre 3, l'un de ces quatre instruments étant monté avec un cordier spécial. Ce cordier a été développé par le luthier T.B. White (Victoria, Canada). Initialement conçu pour atténuer et corriger les notes de loup sur le violoncelle, ce cordier a par la suite été adapté au violon. Ce cordier a la particularité de comporter en son dos une petite masse de 3g pouvant être déplacée sur toute sa longueur le long d'un petit rail prévu à cet effet (pièce métallique dorée sur la figure 4.1). On parlera donc par la suite de cordier « ajustable ». Nous avons considéré le violon équipé de ce cordier ajustable comme deux violons différents, selon l'une ou l'autre des positions retenues pour la masse sur le rail. Ainsi, cinq instruments — différents mais non nécessairement « physiquement distincts » — ont été présentés aux violonistes dans les 3 conditions de jeu (voir tableau 4.1).

	VA	VB	VC	VD	VE
Origine	Allemagne ?	Suisse	Allemagne	Danemark	Danemark
Luthier	inconnu	Girardin	Ficker	Emil Hjorth et Sonner	Emil Hjorth et Sonner
Année fabrication	inconnu	2009	1737	1932	1932
Prix (\$)	inconnu	30000	22000	20000	20000
Poids (g)	443,5	444	430,5	436	436
“Préférence” moyenne <sup>a</sup>	0.29	0.44	0.64	0.70	0.64

TABLE 4.1 – Violons de l'étude

*a.* note en Cond N, sur un axe [0-1]

L'expérience perceptive présentée au Chapitre 3 a mis en évidence que la préférence pour un violon est individuelle (le violon préféré d'un sujet correspondait au violon pour lequel, en



FIGURE 4.1 – Cordier avec masse ajustable monté sur un violon de l’expérience

condition de jeu normal, il avait attribué la note de préférence la plus élevée). Si aucun consensus n’est véritablement ressorti sur la préférence pour un des cinq violons en condition normale, rappelons toutefois que trois violons ont obtenus des notes assez élevées (violons VC, VD, VE), tandis que les deux autres se sont en moyenne positionnés en bas du classement (voir tableau 4.1). Il est intéressant d’étudier si ces différences dans les jugements de préférence peuvent s’expliquer par des descripteurs extraits des mesures vibratoires effectuées sur les instruments. La première partie de ce chapitre présente donc la campagne de mesures — admittances au chevalet et fonctions de transfert chevalet/manche — effectuée sur les cinq instruments de l’étude.

Dans la seconde partie de ce chapitre, nous nous attardons sur la comparaison des deux violons VD et VE obtenus à partir du violon équipé du cordier ajustable. C’est au cours d’un test préliminaire que nous avons déterminé les deux configurations dans lesquelles ce violon apparaissait le plus différent au violoniste qui le jouait (nous avons considéré l’impression globale du violoniste sans faire de distinction entre les ressentis tactile et sonore). Elles correspondent aux positions extrêmes de la masse sur le cordier. Sur le violon VD, la masse est positionnée au plus près du chevalet ; sur le violon VE, la masse est positionnée au plus près du bouton d’attache. La comparaison des violons VD et VE se fait sur la base des résultats de l’expérience perceptive et du point de vue du comportement vibratoire de l’instrument dans les deux configurations.

## 4.2 Caractérisation vibratoire des cinq violons

De la même façon qu’au Chapitre 2, les comportements dynamiques des caisses de résonance (mesures d’admittance au chevalet), ainsi que les niveaux de vibration au manche (obtenus à partir des fonctions de réponse en fréquence au manche) ont été analysés sur les cinq violons de l’étude.

Deux types de dispositifs expérimentaux ont été adoptés pour réaliser les mesures, tous deux basés sur une méthode de type réponse impulsionnelle mais différant sur les conditions aux limites imposées par le dispositif de fixation utilisé. La première procédure expérimentale suivie correspond exactement à celle décrite au Chapitre 2. Une plaque de fixation comportant un système de serrage au niveau de la mentonnière est employée pour maintenir les instruments fixes. Les violons reposent en appui simple sur un morceau de mousse placé sous le manche au niveau de la première position. On parlera par la suite de ce type de mesure comme « mesures sur plaque de fixation ». Ce dispositif de mesure a initialement été mis en place pour acquérir

des signaux propres à l'aide du vibromètre laser, mais il est à noter que ce système de fixation n'est pas complètement neutre vis-à-vis de la structure à mesurer.

La seconde procédure expérimentale correspond à un type de mesure « libre-libre » car l'instrument est suspendu par des fils élastiques. Ce dispositif expérimental nous permet ainsi d'étudier l'influence potentielle de la plaque de fixation. La réponse en fréquence mesurée étant ici celle du système couplé « violon + suspension », il est par conséquent important de choisir une méthode de suspension à la fois non-invasive (c'est-à-dire qui ne modifie pas la structure du système étudié) et dont la réponse propre est en dehors de la gamme de fréquences d'intérêt. Suivant Marshall (1985) et Woodhouse (1998), nous avons suspendu le violon par la tête avec des fils élastiques dont les modes de vibrations sont à des fréquences basses (de l'ordre du Hertz) pour ne pas perturber nos mesures (au-delà de 50 Hz). La Figure 4.2 illustre les dispositifs expérimentaux utilisés pour les mesures.

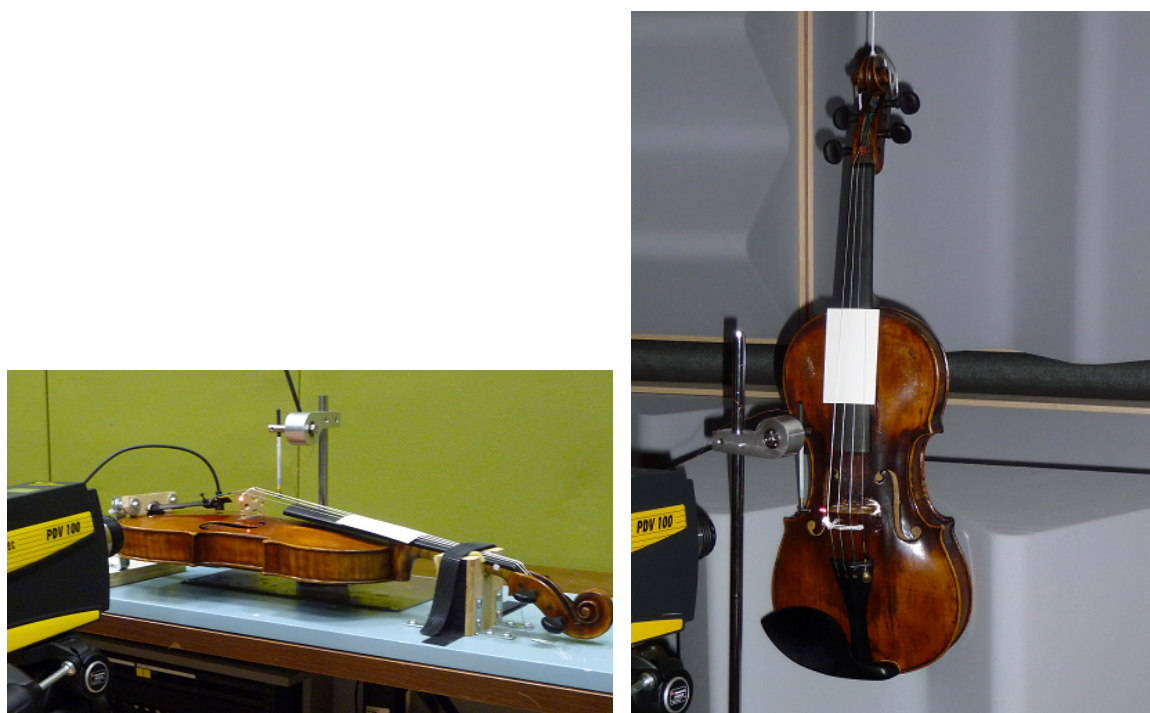


FIGURE 4.2 – Dispositif de mesures (à gauche) sur « plaque de fixation », (à droite) en libre-libre

Dans les deux cas, l'impulsion de force est donnée par un marteau PCB (Modèle 086E80, similaire à celui utilisé au Chapitre 2), et mesurée par un transducteur de force embarqué dans le marteau. Le marteau étant monté sur un système de pendule, ce système assure une bonne reproductibilité des impacts. Les signaux de vitesse sont enregistrés à l'aide d'un vibromètre laser (Polytech, PDV 100). De la même façon qu'au Chapitre 2, les signaux analysés correspondent à ceux mesurés avec les cordes étouffées, c'est-à-dire l'admittance de la caisse et la réponse en fréquence du manche sans les effets des cordes.

Avec les deux types de dispositifs, les mesures admittances au chevalet et fonctions de transfert au niveau du manche ont été effectuées selon les quatre directions suivantes :

1. excitation horizontale | mesure horizontale (noté HH par la suite) → horizontale
2. excitation horizontale | mesure verticale (noté HV) → croisée
3. excitation verticale | mesure horizontale (noté VH) → croisée
4. excitation verticale | mesure verticale (noté VV) → verticale

Nous ne présentons ici que, d'une part, les mesures d'admittance « HH » et d'autre part, les mesures de déplacement au manche sous la forme de la norme des signaux dans les directions « HH » et « HV ». L'ensemble des mesures est présenté à l'Annexe C.

La figure 4.3 présente les courbes d'admittance « HH » (en norme) au chevalet superposées pour les cinq violons de l'étude.

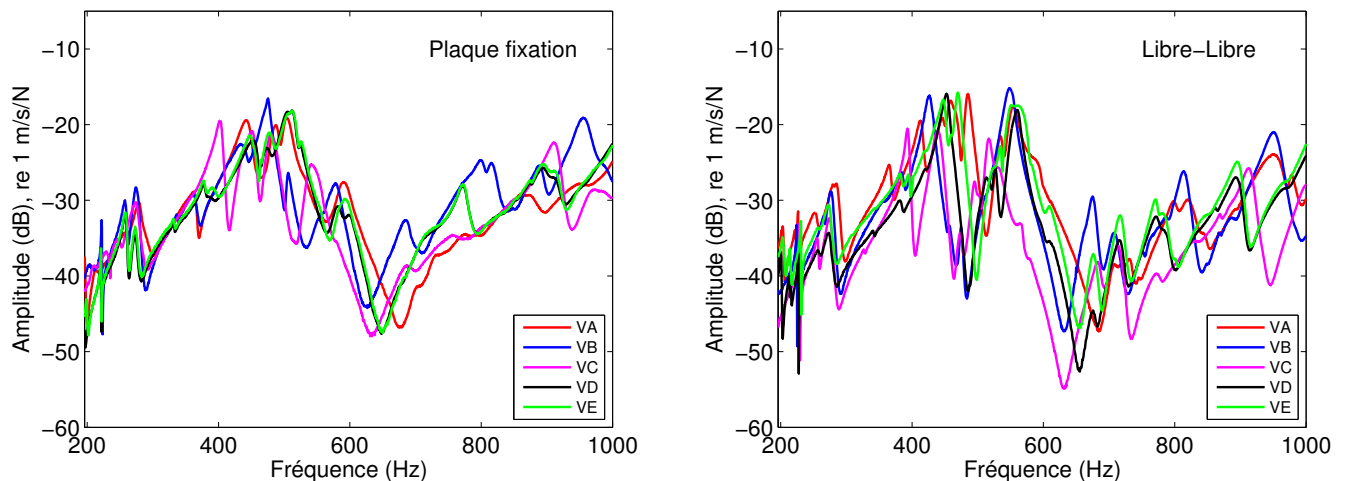


FIGURE 4.3 – Admittances « HH » au chevalet des cinq violons de l'étude (à gauche) sur « plaque de fixation », (à droite) en libre-libre

Les réponses en fréquence des cinq violons concordent assez bien lorsque l'on compare les mesures issues des deux types de dispositifs expérimentaux, en particulier les amplitudes moyennes et fréquences des pics des violons sont similaires d'un dispositif à l'autre. La différence principale entre les deux dispositifs réside dans l'amortissement associé aux pics de résonance : les amortissements des modes dans le cas du violon tenu sur la plaque de fixation sont plus élevés qu'ils ne le sont en condition libre-libre.

On note également que l'allure des courbes est assez semblable sur les cinq violons ; la distinction entre les violons n'est cette fois encore pas immédiate. Le tableau 4.2 suivant répertorie les fréquences des cinq modes « signature » des violons.

Le violon VA (rouge) se distingue légèrement des 4 autres violons car il possède les modes les plus haut en fréquence. La courbe d'admittance de ce violon montre que ses modes dans la



	A0	A1	CBR	B1-	B1+
VA	284	-	365 & 412	485	554
VB	276	474	355 & 384	426	549
VC	255 & 274	473	393	439	517
VD	256 & 272	487?	382 & 419	452	526 & 559
VE	256 & 272	460?	384 & 396 & 422	447 & 470	547

TABLE 4.2 – Fréquences des cinq « modes signature »

région [350 – 450] sont assez éclatés, probablement dû au dédoublement du mode CBR à un effet de couplage des modes CBR et B1-. Le mode A1 n'est pas observable sur le courbe d'admittance de VA.

Le violon VC (rose) a la courbe d'admittance la plus classique et la mieux définie. C'est le seul violon de cet ensemble présentant des résonances associées aux modes de corps CBR et B1- très clairs. Le mode B1+ est un peu couplé.

Les allures des courbes des violons VB, VD et VE sont assez similaires ; en particulier, le mode CBR est difficilement observable, et paraît éclaté pour les trois instruments. Le mode A1 est difficilement visible sur les courbes des violons VD et VE.

Les niveaux de vibration au manche sont calculés en prenant la norme des signaux dans les directions HH et HV, sous l'hypothèse que l'excitation du manche par la vibration de la corde se fait principalement dans la direction horizontale.

La figure 4.4 présente les niveaux de vibrations (en norme) au manche des cinq violons de l'étude superposés à la courbe de seuil de sensibilité de la main gauche mesurée au Chapitre 1.

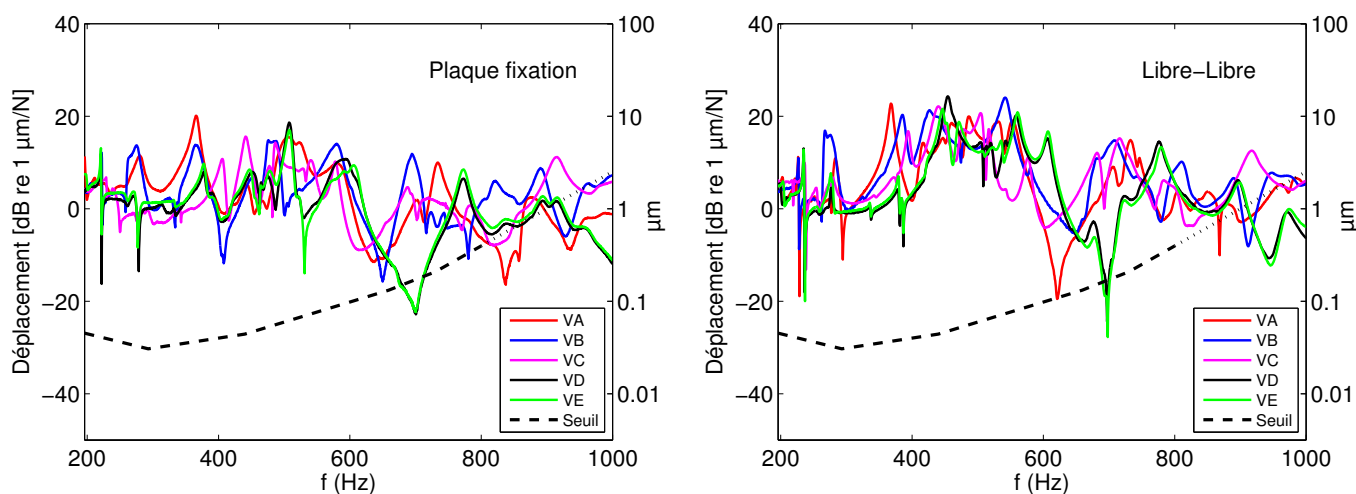


FIGURE 4.4 – Niveaux de déplacement (en norme) au manche des cinq violons de l'étude

	VA	VB	VC	VD	VE
Note moyenne (écart type)					
“Preference”	0.29 (0.28)	0.44 (0.33)	0.64 (0.32)	0.70 (0.29)	0.64 (0.29)
“Ease of Playing”	0.62 (0.21)	0.54 (0.26)	0.63 (0.25)	0.60 (0.25)	0.67 (0.28)
“Liveliness”	0.45 (0.51)	0.62 (0.22)	0.57 (0.41)	0.56 (0.42)	0.49 (0.53)
“Responsiveness”	0.65 (0.21)	0.54 (0.29)	0.62 (0.23)	0.65 (0.23)	0.65 (0.27)

TABLE 4.3 – Préférences et notes moyennes des critères liés à la modalité tactile (et écart-types), par violon, en condition normale

De même que pour les admittances, les courbes obtenues d’après les mesures en condition « libre-libre » sont moins amorties que celles obtenues par mesures sur « plaque de fixation ».

Quel que soit le type de dispositif expérimental, le violon VC (rose) présente la courbe la plus régulière par rapport à la courbe de seuil de sensibilité reportée en traits pointillés noirs ; en dessous de 400 Hz, les violons VA et VB (rouge et bleu) présentent des niveaux de vibrations un peu plus importants que les autres. Les courbes des violons VD et VE (noir et vert) sont les seules à passer en dessous du seuil de sensibilité autour de 700 Hz, avant de remonter abruptement avant 800 Hz. Mais, malgré ces petites différences locales, les niveaux de déplacement au manche des cinq violons présentent une allure générale assez semblable dans l’intervalle de fréquences considéré, et ce pour les deux types de dispositifs expérimentaux testés. Cette constatation rejoint celle effectuée pour les courbes d’admittance au chevalet. Finalement, contrairement au Chapitre 4, la position des courbes de vibrations par rapport à courbe de seuil de sensibilité n’apparaît pas être un facteur discriminant pour caractériser cet ensemble de violons.

Suivant Alonso Moral et Jansson (1982), Hutchins (1989) et Bissinger et Gregorian (2003) pour ne citer qu’eux, il est intéressant de s’interroger sur les particularités des comportements vibratoires des violons de l’étude (e.g. les modes) à l’origine des différences de préférence mises en évidence au Chapitre 3 précédent (voir tableau 4.3). Il est également intéressant de voir si ces comportements vibratoires mesurés pourraient être mis en relation avec les notations des deux critères identifiés comme étant principalement liés aux sensations tactiles en condition normale, à savoir la facilité de jeu (« Ease of Playing ») et la réponse du violon (« Responsiveness »).

Les notes de préférences montrent que les violons VA et VB étaient en moyenne moins aimés que les violons VC, VD et VE. Si le fait que les fréquences associées aux modes de signature du violon VA soient un peu plus élevées que pour les autres violons pourraient être avancé pour expliquer la position du violon VA en bas du classement de préférence, il n’en est cependant pas de même pour le violon VB. Aucune caractéristique modale ne semble expliquer la note de préférence de ce violon dont la courbe d’admittance est d’allure très similaire à celles des violons préférés VD et VE. L’observation des courbes d’admittance n’est donc ici pas suffisante pour expliquer pleinement les jugements de préférence. Les mesures réalisées sur cet ensemble de violons ne permettent pas non plus de retrouver les résultats des précédentes études portant sur

la qualité des violons. Les résultats de Hutchins (1989) sur la séparation fréquentielle entre les modes (voir Introduction générale) sont en particulier difficiles à vérifier car le mode de cavité A1 n'est pas visible sur toutes les courbes.

Contrairement aux notes de préférence, les notes moyennes des deux critères perceptifs liés à la modalité tactile ne sont en moyenne pas très différentes d'un violon à l'autre (notons tout de même que le violon VB présente des notes moyennes légèrement plus basses que les autres violons sur ces deux critères mais que cette fois le violon VA ne se distingue pas des autres instruments).

Ainsi, si violons sont évalués de façon similaire en moyenne sur les critères perceptifs directement liés aux sensations tactiles, cela pourrait donc expliquer pourquoi les mesures vibratoires n'ont mis en évidence aucune différence notable entre les violons.

### 4.3 Comparaison violons VD et VE

Dans l'expérience perceptive présentée au Chapitre 3, les violons VD et VE sont obtenus à partir du violon équipé du cordier. La question à laquelle nous tentons de répondre ici est de savoir s'il y a eu autant de différences perceptives entre VD et VE qu'entre tous les violons de l'ensemble d'instruments dans la situation normale de jeu, et si ces différences peuvent être reliées à des différences vibratoires mesurées.

#### 4.3.1 Expérience perceptive : comparaison en condition normale (Cond N)

Dans cette partie, nous cherchons à savoir si les violonistes ont noté les violons VD et VE en terme de préférence, de qualité globale et sur les 8 critères d'évaluation (on considère ici les notes d'intensité), aussi différemment qu'ils l'ont fait entre deux violons physiquement distincts de l'ensemble des cinq violons choisis pour l'expérience. Autrement dit, nous comparons ici l'effet du facteur « violon » dans la paire VD/VE et dans l'ensemble des paires possibles parmi les cinq instruments. Nous limitons cette étude aux résultats de la condition de référence, soit la condition normale (Cond N). On considère les résultats de 17 sujets (3 sujets sur les 20 avaient jugé un critère sur un violon non pertinent en Cond N, ce qui a constitué une donnée manquante. Ces trois sujets ont été retirés de l'analyse).

Le tableau 4.4 compare les effets observés moyens du facteur « violon » (1) entre VD et VE (effet noté  $e_1$ ) et (2) entre l'ensemble des paires de violons « physiquement distincts » de l'étude (effet noté  $e_2$ ). Ceci est établi pour chacun des huit critères, et chacune des notes de qualité globale et de préférence. Pour chaque individu, et chaque critère, l'effet observé du facteur « violon » entre VD et VE est calculé comme la valeur absolue de la différence des notes accordées à VD et VE (on s'intéresse donc ici à la distance entre les violons, et non au sens de l'effet). On moyenne ensuite sur l'ensemble des sujets pour avoir l'effet observé moyen  $e_1$  sur ce critère. De façon similaire, pour un critère donné,  $e_2$  (effet observé moyen du violon dans l'ensemble des violons « physiquement distincts ») représente la moyenne quadratique des différences des

	$e_1$ (D/E)	$e_2$ (A/B/C/D/E)	$e = e_1 - e_2$ (SEM)	$Pr^*[x_1 < \epsilon < x_2] = 0.95$	$Pr^*[ \epsilon  < x] = 0.95$
Liv	0.19	0.23	-0.04 (0.03)	[-0.11 ; 0.03]	0.09
Resp	0.19	0.26	-0.07 (0.04)	[-0.15 ; 0.005]	0.14
Dyna	0.18	0.30	-0.12 (0.04)	[-0.21 ; -0.02]	0.20
Loud	0.25	0.30	-0.04 (0.04)	[-0.13 ; 0.04]	0.11
Even	0.23	0.26	-0.03 (0.04)	[-0.12 ; 0.06]	0.11
E of P	0.25	0.26	-0.004 (0.06)	[-0.13 ; 0.12]	0.12
S Rich	0.28	0.29	-0.008 (0.04)	[-0.10 ; 0.09]	0.10
S Pal	0.27	0.30	-0.02 (0.06)	[-0.14 ; 0.09]	0.12
Ov Qual	0.27	0.30	-0.03 (0.06)	[-0.14 ; 0.09]	0.13
Pref	0.25	0.51	-0.26 (0.06)	[-0.38 ; -0.14]	0.36

TABLE 4.4 – Comparaison VD/VE par rapport à toutes les autres paires

moyennes deux à deux. Dans ce dernier cas, on compare tous les violons deux à deux, sauf la paire VD / VE.

Finalement, la différence  $e = e_1 - e_2$  (4ème colonne du tableau 4.4) nous renseigne sur l’effet de la paire VD/VE par rapport à toutes les autres paires possibles.  $\epsilon$  représente la vraie différence entre les deux valeurs d’effet. Ainsi, pour un critère donné, plus la différence  $e$  est proche de 0, plus la différence perçue entre VD et VE est de même ampleur qu’entre deux violons « physiquement distincts ». L’intervalle de crédibilité Bayésien (5ème colonne du tableau 3) permet de dire que, étant données nos mesures (et une distribution initiale non-informative), il y a 95% de chance que la vraie différence  $\epsilon$  soit dans l’intervalle  $[x_1 ; x_2]$ . La dernière colonne du tableau 4.4 donne l’intervalle symétrique (autour de 0). Si la borne est jugée faible, cela signifie que l’écart  $\epsilon$  l’est aussi.

#### 4.3.1.1 Huit critères

Les violons VD et VE ont en moyenne été bien distingués dans les notations des critères, et l’effet observé entre VD et VE est relativement similaire pour tous les critères (min = 0.18, max = 0.28 (sur une échelle de [0 1])). En comparaison avec les autres paires de violons, il y a globalement autant de différences observées entre VD et VE qu’entre toutes les autres paires pour l’ensemble des critères d’évaluation, à en juger par les valeurs de différence des effets ( $e = e_1 - e_2$ ) très proches de 0. Le critère « Dynamics » se démarque un peu des autres, car l’effet du violon semble plus faible entre VD et VE qu’entre les autres violons (ie VD et VE jugés plus équivalents entre eux qu’avec les autres violons),  $e_1 - e_2$  étant égal à -0.12. Notons que les plus grandes différences observées entre VD et VE sont sur les critères « Sound Richness » et « Sound Palette ». C’est également sur ces critères que la différence des effets ( $e_1 - e_2$ ) est la plus faible ; la paire VD/VE est donc perçue aussi différente que les autres paires de violons de l’étude en matière de sonorité. Ces résultats, bien que très exploratoires, pourraient suggérer

que la position (haute/basse) de la masse sur le cordier ajustable agit principalement sur des critères perceptifs directement liés au son.

#### 4.3.1.2 Qualité globale

Les notes de qualité globale accordées à VD et VE sont en moyenne très différentes et aussi différentes qu'entre toutes les autres paires de violons de l'étude.

#### 4.3.1.3 Préférence

C'est sur le plan de la préférence que l'effet du violon est le plus fort ( $e_2 = 0.5$ ). Concernant les violons VD et VE, bien que différemment appréciés (la différence entre les notes de VD et VE est en moyenne de 0.25 sur une échelle [0 1]), c'est néanmoins sur les notations de préférence que VD et VE semblent se distinguer des autres violons : ils sont en effet quand même notés plus semblables entre eux que les autres paires de violons, pour qui l'effet du violon est doublé (la moyenne quadratique  $e_2$  étant de 0.5). Ceci pourrait être expliqué par la consigne donnée aux participants dans cette tâche (utiliser tout l'axe pour les notes de préférence relatives), qui aurait eu pour conséquence de renforcer les différences.

Finalement, la comparaison des intervalles de crédibilité à 95% de tous les critères, des notes de qualité globale et préférence, nous permet de conclure que les violons VD et VE se distinguent moins entre eux que des autres violons sur le plan de la préférence plus que sur n'importe quel autre critère (la limite supérieure de l'intervalle pour la préférence correspondant à la limite inférieure des intervalles de tous les autres critères réunis).

On peut donc conclure que dans cette expérience d'évaluation de violons, les violons VD et VE ne sont pas jugés absolument identiques en termes de propriétés acoustiques et mécaniques ou de qualité globale même si l'on ne peut pas exclure qu'ils soient proches (4.3.1.1 et 4.3.1.2). Néanmoins, ces deux violons se distinguent moins que deux violons « physiquement distincts » dans une tâche de classement par préférence (4.3.1.3).

### 4.3.2 Comparaisons des mesures vibratoires

Nous disposons ainsi d'un violon, évalué comme *deux* violons dans une expérience de perception et dont les structures sont quasiment totalement identiques car seul un paramètre de facture change entre les deux : la position de la masse sur le cordier. Il est intéressant d'essayer de corréler les différences perceptives avec des différences vibratoires. Rappelons que le violon VD était en moyenne très légèrement préféré au violon VE (voir tableau 4.3), mais jugé légèrement moins « facile à jouer ». Les deux violons ont obtenus la même note moyenne sur le critère de « réponse ».

#### 4.3.2.1 Admittances

Les figures 4.5 et 4.6 présentent les courbes d'admittance superposées des violons VD et VE, selon quatre configurations correspondant aux quatre couples possibles 'direction d'excita-

tion/direction de mesure', pour chacun des deux systèmes de fixation. Le tableau 4.5 répertorie les principaux modes propres des deux violons compris dans l'intervalle [0 - 1000] Hz, tels qu'ils ont été identifiés sur les courbes d'admittance.

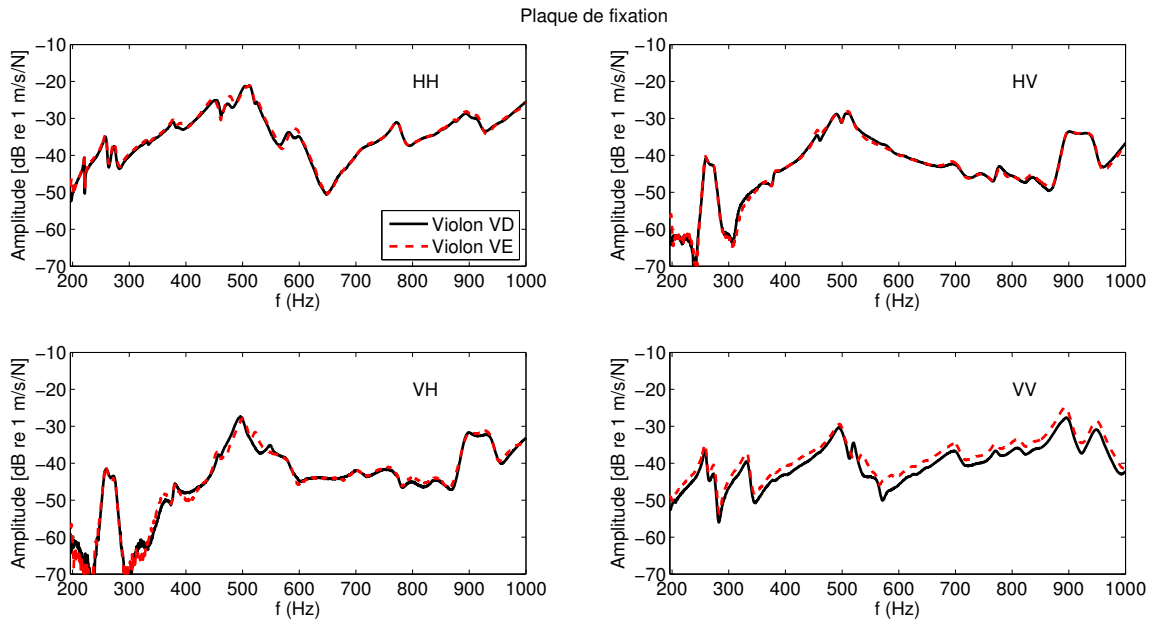


FIGURE 4.5 – Admittances au chevalet pour les violons fixés

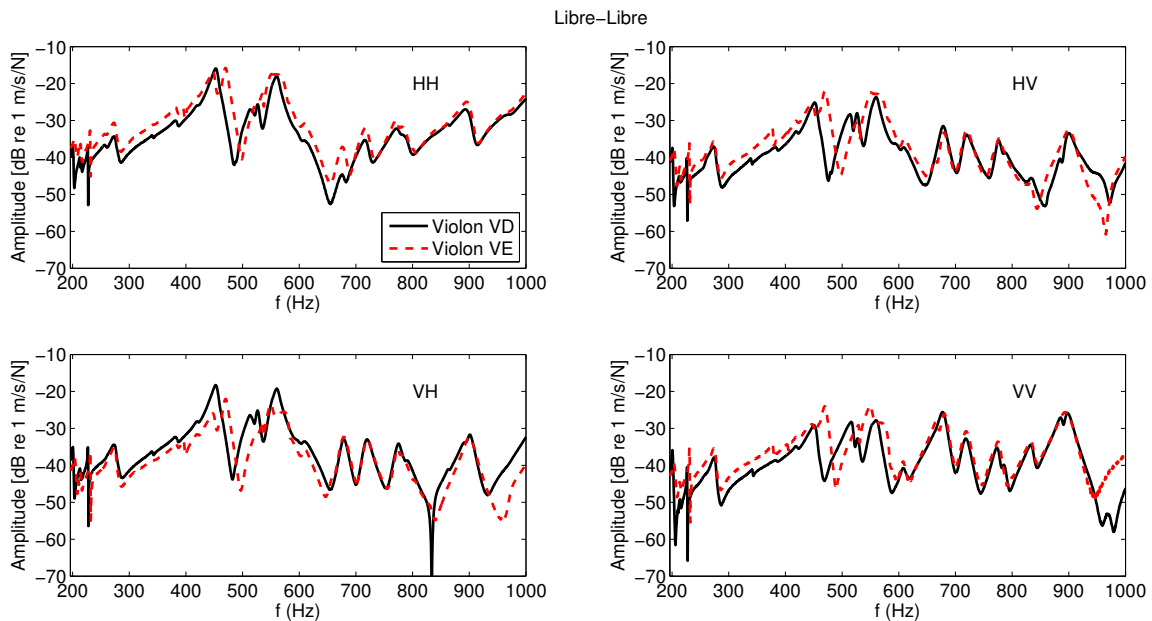


FIGURE 4.6 – Admittances au chevalet pour les violons en condition libre-libre

La comparaison des figures 4.5 et 4.6 montrent que quelle que soit la direction considérée,

	A0	A1	CBR	B1-	B1+
VD	256 & 272	487 ?	382 & 419	452	526 & 559
VE	256 & 272	460 ?	384 & 396 & 422	447 & 470	547

TABLE 4.5 – Principaux modes propres dans [0 -1000] Hz pour les violons VD et VE

les courbes issues des mesures en libre-libre paraissent plus discriminantes que celles issues des mesures sur la plaque de fixation, même si la distinction qui peut être faite entre les deux instruments est limitée, car les modes sont mieux marqués.

Sur la figure 4.6, on remarque que le violon VE présente un petit dédoublement du mode B1- alors que ce n'est pas le cas du violon VD. De la même façon, le violon VD présente un dédoublement du mode B1+, non visible sur la courbe du violon VE. Les autres modes semblent se superposer pour les deux violons. Cette observation est en accord avec un résultat de l'étude du cordier de violoncelle de (Fouilhe et al., 2011) montrant que l'ajout d'une petite masse de 30g pouvait provoquer le dédoublement d'un mode (en l'occurrence le mode 6), en fonction de la position de la masse sur le cordier. Le dédoublement du mode est en accord avec la fonction première de ce cordier ajustable, qui est de supprimer les notes de loup (en agissant généralement sur le mode B1+ dans le cas du violon). On remarque également que la courbe d'admittance du violon VE (masse au plus près du bouton d'attache) est très légèrement au-dessus de la courbe du violon VD (masse au plus près du chevalet) sur les mesures en condition Libre-Libre. Cette observation va dans le sens d'un résultat déjà observé par le fabricant du cordier ajustable, Ted White, sur les effets de la position de la masse sur les admittances.

Le cordier agit grâce à un couplage au niveau de la partie basse de la caisse (proche du bouton). Or cette partie du violon est encastree dans le dispositif « plaque de fixation ». L'effet du cordier est donc négligeable dans cette configuration ; cela explique le fait que l'on ne voit que très peu (voire aucune) différences entre les deux violons avec ce dispositif.

#### 4.3.2.2 Fonctions de transfert chevalet/manche

Les figures 4.7 et 4.8 présentent les 4 fonctions de transfert chevalet/manche correspondant aux quatre couples possibles 'direction d'excitation/direction de mesure' des deux violons avec les deux systèmes de fixation employés.

De la même façon que sur les courbes d'admittances au chevalet, les courbes présentent des différences plus nettes entre les violons lorsque les violons sont mesurés en condition libre-libre (comparés à lorsqu'ils sont fixés).

Avec ce dispositif de mesure, la plupart des modes observés sont au moins partiellement couplés, et contaminés, par les modes alentour (probablement les modes du manche). En particulier le mode B1+ apparaît couplé au second mode de flexion du manche (aux alentours de 620 Hz) pour les deux instruments dans directions « HH » et « VH ». Comme pour les mesures d'admittance, les fonctions de transfert chevalet/manche montrent que le mode B1- est dédoublé

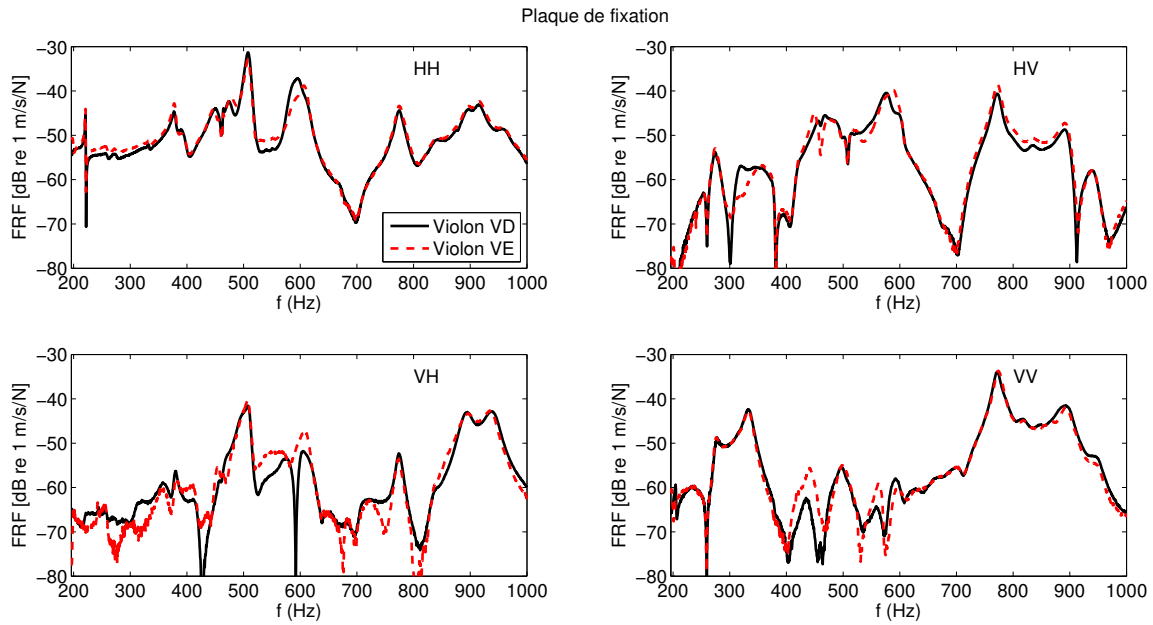


FIGURE 4.7 – Fonctions de transfert chevalet/manche avec plaque de fixation

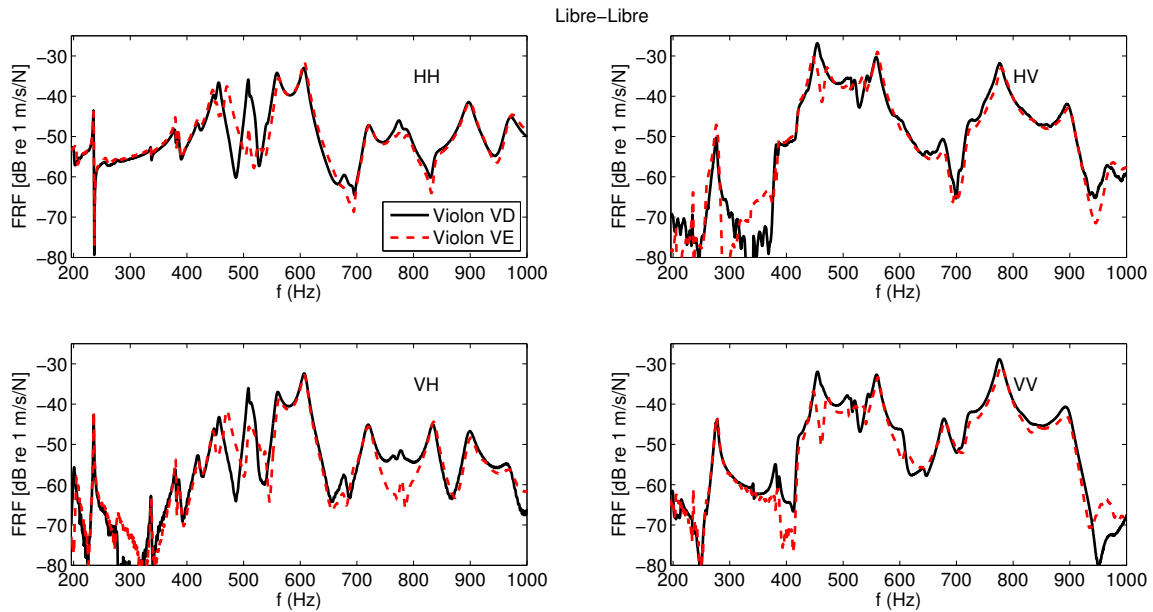


FIGURE 4.8 – Fonctions de transfert chevalet/manche avec violons en libre-libre

pour le violon VE. Ce violon possède un pic de résonance à 510 Hz plus petit que le violon VD. Les différences principales entre VD et VE se trouvent donc dans la même gamme de fréquences [450 – 550] Hz que sur les courbes d'admittance, mais les informations extraites des fonctions de transfert ne permettent pas d'expliquer davantage les différences perceptives observées entre VD et VE dans l'expérience perceptive.



## 4.4 Discussion et conclusion

Les mesures d'admittance et de niveaux de vibration au manche effectuées sur les cinq violons n'ont pas permis pas de mettre les signatures modales des instruments en corrélation simple ni avec les jugements de préférence, ni avec les notations des critères liés au sens tactile. En particulier, on remarque que la comparaison des courbes de vibration (en norme) des manches avec la courbe de seuil de sensibilité de la main gauche mesurée au Chapitre 1 n'est pas discriminante pour cet ensemble d'instrument. Ainsi, soit les violons n'étaient en fait pas assez différents, soit la perception des différences entre les instruments est si subtile chez les violonistes que les mesures réalisées sur les violons mériteraient d'être beaucoup plus affinées. C'est finalement cette dernière hypothèse qui semble prévaloir suite à l'étude approfondie conduite sur les violons VD et VE.

En effet, les données recueillies au cours de l'expérience perceptive démontrent que les deux configurations du cordier ont donné naissance à deux violons aux attributs physiques (critères d'évaluation dans l'expérience perceptive) en moyenne aussi différents que ceux de deux violons « physiquement distincts » (à l'exception du critère « Dynamics »), pour les 17 violonistes qui les ont évalués. Cependant, les mesures effectuées sur les violons VD et VE (Figures 4.5, 4.6, 4.7 et 4.8) ne permettent pas de distinguer aisément les violons du point de vue de leur comportement vibratoire. Un dédoublement du mode B1- pour le violon VE et un dédoublement du mode B1+ pour le violon VD sont les seules différences observées.

Ces résultats suggèrent donc qu'il suffit de vraiment peu de différences en termes d'action sur le chevalet (apparaissant sur les mesures vibratoires classiques) pour que le violon soit considéré comme différent par des violonistes experts. Aussi surprenant que cela puisse paraître, cela implique que les violonistes seraient extrêmement sensibles à cette très subtile différence de mesures. Ces observations soulignent ainsi la potentielle importance des modes B1- et B1+ dans la détermination des attributs physiques et leur perception par des violonistes experts. On ne peut cependant pas exclure que les points de mesures (concernant admittances au chevalet et fonctions de transfert chevalet/manche) ne sont pas encore suffisamment pertinents pour expliquer des différences perceptives — donc les qualités perçues d'un violon — et les jugements de préférence. D'autres types de mesures devraient alors être envisagées et testées sur les violons. Par ailleurs, il est important de remarquer que le petit dédoublement des modes B1- et B1+ lors du déplacement de la masse n'est visible que sur les mesures réalisées en conditions libre-libre. Ceci peut être expliqué par le fait que le système d'accroche du dispositif « plaque de fixation » impose une condition aux limites fixe au niveau du bas du corps du violon, à l'endroit même où les deux modes de flexion du corps B1- et B1+ présentent a priori de larges amplitudes de déplacement. Ces résultats nous amènent à la conclusion que le système de mesure sur « plaque de fixation » n'est pas une méthode de mesure « non-invasive », c'est-à-dire que la plaque modifie la structure à mesurer. De ce fait, ce type de dispositif expérimental fait perdre des informations utiles pour caractériser les violons. On privilégiera donc par la suite des dispositifs expérimentaux n'imposant aucune fixation.

L'expérience perceptive montre que bien que les deux violons VD et VE aient en moyenne été perçus aussi différents que deux violons « physiquement distincts » en termes de propriétés acoustiques et mécaniques ou de qualité globale, ils se sont moins distingués que deux violons « physiquement distincts » dans une tâche de classement par préférence. Deux pistes peuvent être avancées pour expliquer ce résultat. Au chapitre précédent, nous avons vu que les notes de préférence ne sont pas simplement expliquées par les notes des critères et leurs importances respectives attribuées lors de jugements analytiques. On pourrait donc légitimement penser que dans un jugement de préférence, les poids perceptifs — qui seraient donc différents des notes d'importance — accordés à chacun des huit critères (à supposer qu'il n'en manque pas) sont dépendants du violon (en plus d'être dépendant du violoniste). De la sorte, si les huit critères ont reçus des notes différentes sur les violons VD et VE, on ne peut pas exclure que toutes ces notes se compensent (de façon différente sur VD et VE), résultant en une note de préférence similaire sur les deux violons. Deuxièmement, la seule caractéristique du violon que l'on peut assurer être véritablement inchangée par le déplacement de la masse sur le cordier ajustable est l'ergonomie de l'instrument. On ne peut donc pas non plus exclure que l'ergonomie de l'instrument soit un des critères perceptifs régissant la préférence. La contribution des indices purement tactiles à l'évaluation des violons pourrait, cette fois encore, être mise en avant.

## Quatrième partie

# Intégration bimodale dans l'évaluation des violons



# Avant-propos

L'expérience perceptive présentée dans la Partie 3 a mis en avant la complexité des notions telles le ressenti (par l'intermédiaire du critère « Liveliness ») ou encore la richesse et la palette sonores auxquelles les violonistes font appel lors de l'évaluation des qualités d'un violon. La question de l'existence de processus multisensoriels, notamment dans le cas de l'évaluation de critères *a priori* purement auditifs, a été soulevée. Cette nouvelle section vise à apporter des éléments de réponse à cette possibilité. Cette section s'attache ainsi à mieux comprendre la perception et l'évaluation des violonistes face à des entrées sensorielles *bimodales* – auditive et tactile –.

Une expérience d'évaluation de violon par des violonistes professionnels a ainsi été mise en place pour permettre, cette fois, de découpler le retour tactile du retour auditif, sans avoir à supprimer l'un ou l'autre. Dans la littérature sur la perception multisensorielle, les données comportementales indiquent en effet qu'un objet bimodal – comme c'est le cas du violon – est mieux et plus rapidement traité que le même objet défini par une seule de ses composantes quelle que soit la tâche à effectuer (Giard and Peronnet, 1999). Il est toutefois important de rappeler que l'expérience décrite dans la partie précédente basée sur le masquage sensoriel était une étape nécessaire pour débiter une étude sur le rôle du tactile dans l'évaluation des qualités d'un violon. L'expérience reportée dans la présente partie contraste cependant avec les études portant sur les interactions audiotactiles auxquelles nous faisons référence dans l'introduction de cette thèse, puisque, cette fois encore, nous avons fait le choix de conduire une expérience perceptive en situation de jeu musical. Nous n'utilisons donc pas de stimuli sonores ou tactiles artificiels (comme c'est classiquement le cas dans les expériences d'intégration bimodale conduites en laboratoire), mais de courts extraits du répertoire pour violon, car il nous semble crucial de conserver le contexte général dans lequel les musiciens sont en pratique amenés à évaluer des instruments.

Le Chapitre 5 se présente sous la forme de l'article *Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violins*, I Wollman, C. Fritz, J. Poitevineau (soumis pour publication). L'expérience présentée dans cet article se base sur l'installation d'un dispositif permettant de tester une situation d'écoute « augmentée ». Ce dernier repose sur la captation et l'envoi contrôlé de signaux vibratoires, entre le manche d'un violon réel joué par un musicien professionnel et un manche de violon, isolé, tenu par les participants de l'expérience, eux-mêmes violonistes. Le dispositif ainsi mis en place nous permet de manipuler les niveaux de vibration envoyés dans le manche de violon isolé pour étudier l'influence du retour vibrotactile sur la perception du son du violon. Comme nous l'avons évoqué dans l'introduction de cette thèse, cette expérience constitue, à notre connaissance, la première tentative de mise en évidence de l'influence d'une stimulation tactile sur le jugement auditif par manipulation de signaux tactiles. La sélection des critères d'évaluation nous permet de tester différentes hypothèses issues des résultats obtenus au Chapitre 3, de la littérature sur l'intégration bimodale et d'hypothèses formulées par des

acousticiens.

Dans ce chapitre, nous nous demandons tout d'abord si la perception et l'évaluation des critères liés au son du violon changent en fonction du niveau de vibration dans le manche ; puis si le même comportement est observé pour tous les participants violonistes, pour tous les critères d'évaluation choisis, et pour tous les violons de l'étude.

Comme précédemment discuté, la congruence fréquentielle, la concomitance temporelle et la contiguïté spatiale inhérentes aux signaux auditifs et vibrotactiles générés lors du jeu violon sont autant de raisons de penser que si des changements sont observés dans les évaluations de critères liés au son du violon entre les différentes conditions expérimentales de notre expérience, ces changements pourraient être induits par un processus d'intégration bimodale. Nous sommes conscients que, contrairement à l'expérience présentée au Chapitre 3, l'on peut toujours se demander si les réponses données par les sujets au cours d'une expérience étudiant des interactions multimodales témoignent d'un réel changement de sensation du participant (dû à la modulation du signal vibratoire dans notre cas) ou si elles reflètent simplement un changement de critère utilisé pour répondre (notation du violon dans notre cas), pouvant être la conséquence d'un biais méthodologique (Choe et al., 1975). Il s'agira donc dans cette partie de clarifier et distinguer la contribution de la perception sensorielle de la stratégie décisionnelle individuelle pour garantir l'observation d'un phénomène d'intégration. Le lecteur pourra se référer à l'Annexe A pour une présentation des traitements statistiques effectués.

Le Chapitre 6 complète l'étude présentée dans l'article du Chapitre 5 en se basant sur les réponses des violonistes participants à un questionnaire portant sur leur perception du violon, en lien avec les problématiques de notre expérience. Deux questions concernant explicitement leur rapport aux vibrations leur ont été posées<sup>1</sup>. Les participants de l'étude sont séparés en deux groupes de sujets à partir de leurs réponses à la question « Faites-vous attention aux vibrations lorsque vous jouez/évaluez un violon ? ». Une analyse des résultats de l'expérience par groupes séparés y est proposée. Certains résultats sont reportés en Annexe F. Pour finir, une tentative de rapprochement des résultats perceptifs avec les mesures vibratoires réalisées sur les instruments est présentée en fin de chapitre.

---

1. L'intégralité des réponses à ces deux questions se trouve à l'Annexe E.

# Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violins<sup>1</sup>

---

## *Abstract*

We investigated how auditory and vibrotactile feedback information is integrated within the context of violin quality evaluation. 15 violinists evaluated three violins on four criteria — "Rich sound", "Loud and powerful", "Alive and responsive" and "Pleasure"— during a perceptual experiment. Violinists first evaluated the violins one at a time under three experimental conditions : (1) playing, (2) listening to it (played by a professional player) in an active way by fingering the score on an isolated neck, (3) same as (2) with vibrotactile feedback provided at the isolated neck. Violinists were then asked to evaluate the violins through pairwise comparisons under condition (3) : each violin was paired with itself while the level of vibrations of the isolated neck was either the original one or divided by two. The first part of the experiment demonstrated that "Loud and powerful" judgments were affected by the presence of vibrations given that violins were rated louder in condition (3) than in (2). In the second part, violins were rated more positively with original vibration level at the isolated neck than with half the level, for all criteria but "Alive and Responsive". Consistently with sensory interaction, the magnitude of the enhancement remained relatively constant across violins.

---

1. I. Wollman, C. Fritz, J. Poitevineau, "Influence of vibrotactile feedback on some perceptual features of violins" (soumis)

## 5.1 Introduction

Violin playing is multimodal in nature. In addition to the resulting sound, violinists receive visual feedback from their performances as well as vibrotactile feedback, which should be related to the sound produced, through different contact points with the instrument. All these sensory feedbacks enable violinists to exert control over the instrument. We assume that in a playing context, the existence of these complex interactions between the musician and the violin are the basis for the perception of the sound and the "feel" of the instrument. In this regard, as reported by Marshall (1985), "to be accepted by an artist, an instrument must not only sound correct but it must also "feel" correct" (p. 705). It is still not clear to what the notion of "feel" refers to. Acousticians who invoked the notion of "feel" in violin acoustics literature highly suggested it to be a feeling of vibrations through the left hand (Marshall, 1986; Hutchins, 1985; Woodhouse, 1998). But when violinists are asked what they think about the vibrations of the neck of their violin, their responses are scattered. Most of the time, in first place, they do not understand what the question means. One possible explanation to this confusing reaction is that violinists' attention is focused on violin sound more than on what happens at their left hand, considering the variety of sensory information violinists receive while playing and considering that their ultimate goal is to make music be heard. However, their nervous system tends to merge together the available sensory pieces of information — even if the observer is not fully aware of them — in unique events. This process is commonly known as 'multisensory integration' (see Calvert et al. 2004 for a review). Thus, the potential audio-tactile interaction in violin playing and perception probably goes mostly unnoticed for violinists.

In 1959, von Békésy highlighted the physiological and functional analogies featuring the relationship between hearing and touch, in particular in terms of vibratory information processing (both senses conveying oscillatory patterns), although he pointed out as well some discrepancies between auditory and tactile systems (e.g. absolute thresholds or frequency ranges of sensitivity associated to each modality). These similarities allow the existence of crossmodal interactions at multiple levels along the functional architecture of the sensory systems. In particular, further research showed the potential for the auditory cortex to process vibrotactile information (e.g. Kayser et al. 2005). Literature addressing audio-tactile interaction has shown that auditory intensity ratings systematically increased when tones were accompanied by synchronous tactile stimuli compared to when they were presented in isolation (e.g. Gillmeister and Eimer 2007; Yau et al. 2010). Like for any other sensory integration, audio-tactile integration is stronger for temporally coincident stimuli, stronger for stimuli closer in space, and obeys to the principle of inverse effectiveness - greater enhancement for less effective stimuli - (see Stein and Meredith 1993).

However, it should be noted that research on multisensory integration has chiefly focused on the perception of spatial and temporal characteristics of multimodal events in laboratory context. The ecological validity of those findings has not received extensive study (Giordano et al. 2010) and only few studies have tried to address more realistic situations. For instance it was shown that the perception of the pleasantness and roughness of an electric toothbrush



(Zampini et al. 2003) or the crispness and staleness of potato chips (Zampini and Spence 2004) could be affected by the sound of, respectively, the brushing action or the biting action. Despite Musacchia et al. (2008) pointing out that “musical instruments provide a wide range of naturally occurring complexities to test theories of multisensory interaction”, such a musical context has only been rarely used. In the particular case of the perceptual evaluation of instruments, which is our primary interest, Keane and Dodd (2011) investigated a possible improvement of upright pianos by reducing key vibrations. Pianists were invited to play and complete a comparison evaluation task. It was found that pianists felt there were larger changes in tones or loudness between two pianos whose only difference concerned their key vibration level (sounds were measured to be unchanged by the modifications). This result highlights the existence of multimodal interaction in piano playing and evaluation with auditory and tactile feedbacks being combined during their evaluation process.

In the present study, we investigated the role of vibrotactile cues in the perceptual evaluation of violins from both the player’s perspective and from the listener’s perspective. In the latter case, the listener (violinist) could be provided with vibrotactile information of the violin being heard. One aspect of our experiment was indeed specifically designed to test an “augmented listening” condition, where the listener could receive a vibrotactile feedback of the playing. To this end, we constructed an experimental set-up based on the use of an isolated vibrating neck, directly connected to a real violin, which provided the listener with the actual vibration of the neck of the violin being played live by a professional violinist in real time. The isolated neck maximizes ecological validity because the listener has enough cues to mimic a normal playing situation. This set-up allows for modulating the level based on a carefully controlled procedure. That way, the two types of signals (audio and tactile) are uncoupled, although they are generated by a common event : the professional violinist drawing his bow across the strings. The use of an isolated neck prevents the excitation of the violin body by the neck and thus the generation of sound which would interfere with the actual evaluation and guarantees that the violinists feel the vibrations through the left hand only.

The perceptual experiment presented in this paper primary aims to explore the role of the level of vibrotactile feedback in modulating the perception of the sound of a violin (maximizing ecologically valid condition). We examined whether the actual experience of sound, expressed by the ratings of *a priori* auditory-based evaluation criteria, can change as a function of vibrational input, at the left hand. In particular, considering the results of previous studies on auditory perceived intensity, it was hypothesized that we should observe an enhancement of the “Loudness and Power” ratings of violins when the vibrotactile feedback is provided compared to when it is not, and compared to when it is lower.

Moreover, like Askenfelt and Jansson (1992), we found it interesting to ask whether the vibrations can contribute to the “excitement of playing”. We investigated this issue by testing the effect of the vibration displayed along with the sound on the ratings of the “Pleasure” listeners would have to play the violin being heard. It was hypothesized that increasing the

strength of the vibration in the neck would lead to an improvement in subjective pleasure.

Therefore, the violins were evaluated on the criteria “Loudness and Power” and “Pleasure”. Two other criteria were chosen. The criterion “Sound Richness” was selected based on the results of our previous experiment (Wollman et al., 2013) where this criterion appeared to be relevant to about a third of the twenty participants while carrying out a violin evaluation task under auditory masking conditions. This criterion was thus suggested not to relate unequivocally to sound properties but to be potentially based on multisensory information processing as well. The last criterion selected was “Alive & Responsive”. We initially wanted to test the criterion “Alive” because it was stated by Marshall (1986), an acoustician, that violinists prefer instruments that feel “alive” in the sense of vibrating. However, informal discussions with violinists led us to add the term “Responsive” in order to orient the many and ambiguous definitions of “Alive” towards the tactile sense. We predicted that if vibrotactile cues affect the perception and evaluation of those two criteria, then our participants should perceive the violin features to vary as the level of vibration feedback was manipulated, whatever the direction of the effect is.

Finally, one open question is to know whether violinists evaluate violins in a different manner when they are successively in the role of the player (i.e. with the natural vibrotactile feedback of the instrument), in the role of a simple listener (i.e. no vibrotactile feedback), or in the role of an “augmented listener” (i.e. vibrotactile information provided).

We investigated the above questions by asking violinists to rate the selected criteria under the different experimental conditions. The violins used in this experiment were chosen to be sufficiently different in terms of vibratory behavior to see whether the effect of vibrotactile feedback can depend on the violin.

## 5.2 Method

### 5.2.1 Participants

Fifteen classical professional or semi-professional violinists took part in the experiment : six females and nine males, all were naïve about the purpose of the study. They ranged in age from 20 to 59 years old (average age = 35 yrs, SD = 10), had played violin for 13–46 years (average years of violin practice = 27 yrs, SD = 10), played around 30 hours per week on average. Participants reported mainly playing in various contexts (chamber ensembles (80%), orchestras (33%), orchestras as soloist (20%) violin classes as professors (20%), violin classes as student (20%)). None of them reported having auditory or tactile deficits. The violinists were paid for their participation.

### 5.2.2 Violins

A set of twelve violins of different make and age — made between the early 17th and 21st centuries — was initially assembled for this study.

To minimize fatigue for the participants, given that several experimental conditions were to be tested, only three violins were included in the experiment. Thus, a preselection test was carried out prior to the experiment. A professional violinist was invited to play freely the set of twelve violins, blindfolded, for evaluation purposes. He was encouraged to comment out loud about the evaluation process and to report orally his feelings regarding the sound and the “feel” of each violin. His comments about how the violins sounded and "felt" and especially, all that was related to the “touch” and his tactile sensations, led us to restrict the study to three instruments that were perceived as the most different in terms of vibratory behaviour. However, with three violins only, it cannot be ruled out that participants would focus their attention on identifying the three violins and try to be consistent over conditions, which would distract the participants from the actual task. Consequently, we proceeded as follow : the professional violinist selected three more violins among the remaining ones, chosen to be of similar overall quality to that of the others so that none of these three new violins could stand out and affect the range covered by the previously selected violins. These six violins were presented to the participants during the familiarization phases. To further ensure that participants made judgments using only sensory information, they were specifically instructed that some of those violins would be randomly presented in each condition, whereas, in fact, the same three violins were presented to all participants. These three violins will be referred to as V1, V2 and V3.

The fact that some violins may have been less optimally set up or had strings of varying quality was not a concern because it should not have influenced the consistency of the ratings across conditions. Identical shoulder rests (Kun Original model) were used for all six violins. As in Saitis et al.'s (2012) experiment, participants performed with their personal bows, which through constant use can in fact be considered as an extension of their arm.

### 5.2.3 Procedure

The experiment employed a near-blind evaluation task in which participants rated the three violins according to three criteria related to violin attributes and according to the pleasure they have/would have to play the violin. The combination of low lighting conditions and dark sunglasses worn by the participants throughout the conditions was chosen to prevent detailed visual feedback which could constitute irrelevant cue as regards to our research question. The experiment took place in a room of about 30 m<sup>2</sup>, of relatively dry acoustics. The room was divided into two areas by means of an acoustically transparent curtain. The violinist experimenter was seated on one side of the curtain ; the participants occupied the other side of the curtain (see Figure 5.1)



FIGURE 5.1 – Experimental room : violinist experimenter on one side of the curtain (on the left), participant holding the isolated neck on the other side of the curtain (on the right)

Prior to the experiment, participants were informed they would evaluate a number of violins in two distinct situations : a playing situation (Situation P) and an *active* listening situation (Situation L).

#### 5.2.3.1 Experimental design

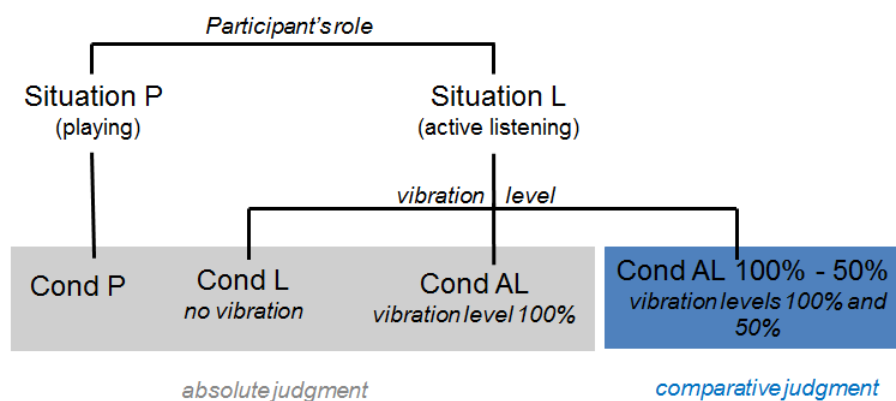


FIGURE 5.2 – Experimental design

As shown in Figure 5.2, there were two experimental factors :

- the ‘situation’, describing the participant’s role : either player (Situation P) or listener (Situation L)
- the ‘vibration level’ in the isolated neck : either normal, like in the violin neck being played (hereafter, ‘100%’), attenuated, half the level (hereafter, ‘50%’), or null (hereafter, ‘0%’)

The second experimental factor applies to the second modality of the first factor only.

Thus, there were four experimental conditions :

- Playing (Cond P)
- Augmented Listening 0%, also called Listening (hereafter, Cond L)
- Augmented Listening 100% (hereafter, Cond AL)
- Augmented Listening 100% and 50% (hereafter, Cond AL 100%-50%)

As illustrated in Figure 5.2 with the shades of grey, there were two types of evaluation tasks, either absolute judgment (first three experimental conditions) or comparative judgment (last experimental condition).

All participants completed the evaluation task under the four experimental conditions.

In Situation P, participants were invited to play and rate the violins. No constraints were imposed on the repertoire. Imposing violinists to play the same musical excerpts as in the other (listening) conditions (see below) may have appeared as a more controlled situation but it would have been too far from violinists’ actual practice, when they test violins (in order to buy one). Consequently, we chose to let them play the instruments freely to maximize ecological validity. In this situation, the participants could choose to play standing up or sitting down.

In Situation L, participants were seated on a chair and held the isolated neck. They were asked to evaluate the violin being played by the violinist-experimenter while *actively* listening to it. *Actively* means that they were instructed they should hold the isolated neck, and finger on it following the music played by the violinist experimenter, as if they were playing it themselves. One particular musical excerpt (see below) was chosen for each criterion for two main reasons. First, in terms of feasibility, it was necessary for the participants to have a musical score to be able to follow the violinist experimenter in real time. A score compiling the different excerpts was thus placed in front of them. Second, this is close to violinists’ actual practice as they usually have to rely on short excerpts when evaluating a violin just by listening to it (for instance when they are asked to advise a friend). In Situation L, the experimental conditions L and AL were mixed. The participants thus proceeded with six presentations : the three violins at 0% and the three violins at 100%. The order of presentation was randomized across participants.

For practical reasons, all participants started with Situation P so we had to mount the violins with the accelerometers only once (for the rest of the experiment).

There were two types of evaluation tasks :

- In the Situation P and Situation L / Cond L and Cond AL, participants were instructed to complete a series of evaluation task for one violin at a time. For each violin, participants were presented with the evaluation criteria appearing one at a time in random order.

They were asked to assess the magnitude of each criterion by placing a marker along a continuous 10 cm-long rating scale labeled “not at all” on the left and “a lot” on the right, drawn on a note book prepared for the experiment. The position of the marker constitutes score between 0 and 10.

- In Situation L / Cond AL 100%-50%, participants were instructed to evaluate the violins based on paired comparisons. Three pairs of violin were presented to the participants. Each violin was paired with itself as the level of vibrations set at the isolated neck is either the normal one (100%) or divided by two (50%). In this way, one pair for violin 1 corresponds to V1\_100% versus V1\_50%. The same applies for the two other pairs, with V2 and V3. For each pair, participants were presented with the evaluation criteria appearing one at a time in random order. For each criterion  $X$ , the participant answered to the question “which violin is more  $X$ ” by placing a marker along a continuous 10 cm-long rating scale ranging from “The first violin is much more  $X$  than the second violin” to “The second violin is much more  $X$  than the first violin”; the central position thus corresponding to «The first violin is as  $X$  as the second violin».

The position of the marker constitutes score between -5 and +5. Although the order VL\_50 %/VL\_100% was randomized across pairs and participants, hereafter the results are systematically reported so that a positive rating means that the violin with VL\_100% has the attribute  $X$  more than the one with VL\_50%.

All participants performed the two tasks in the order listed above.

Participants were specifically instructed not to try to identify the violins because the instruments would be presented randomly. Thus, the actual number involved in the different situations was disclosed. Participants had 15 min before Situation P to play and freely explore the six violins including the three violins of the actual experiment (see previous subsection) to get an idea of the range covered by the violins under study. In the same way, they had 10 min before Situation L to familiarize themselves with the experimental situation by listening to the violinist-experimenter performing on the six violins and on their own violin if they wanted to have a reference. No vibrations were sent to the isolated neck in the familiarization phase. The individual session lasted approximately one hour and a half.

### 5.2.3.2 Evaluation criteria and musical excerpts

The four evaluation criteria chosen were presented in the form of a short sentence, as follows :

- This violin has a rich sound (in overtones)
- This violin is loud and powerful
- This violin is alive and responsive
- Degree of pleasure to play (in situation P)/would have to play (in situation L) the violin

As already mentioned, the criteria were selected on the basis of the results of previous experiments investigating violin quality evaluation. Criteria “Rich Sound” and “Loud and Powerful” *a priori* mainly relate to audition, criterion “Alive and Responsive” *a priori* mainly relates to the tactile sense, and criterion “Pleasure” is more related to the overall impression of violinists. Only four criteria were selected to minimize fatigue for the participants, considering the number of experimental conditions to be tested. These terms being all commonly used by violinists when evaluating instruments, they were thus left undefined. At the end of the experiment, participants filled out a questionnaire to provide a precise definition of the three criteria related to violin attributes.

The musical excerpts chosen for the criteria evaluation are well-known musical passages of violin repertoire<sup>2</sup> (see appendix), of duration less than 1min. They are playable in first position, (see technical constraints introduced by the experiment set up in the next section).

- “Rich Sound (in overtones)” : G Major Scale in thirds

As the “Richness” relates to the spectral content of the sound produced, the scale offers the possibility to hear the sound over the register of the violin, across all strings.

- “Loud and Powerful” : Bruch’s Violin Concerto No. 1 in G minor, Op. 26, *Allegro moderato* (second theme)

As the experiment took place in a relatively small room, we assumed it would have been too hard to distinguish the violins with a too loud musical excerpt. The excerpt was thus specifically chosen because of its dynamics *mf* (not *f*).

- “Alive and Responsive” : Bruch’s Violin Concerto No. 1 in G minor, Op. 26, *Allegro moderato* (first theme)

The excerpt was chosen because it goes through all strings and it is not too fast (i.e. not to orient listener particularly towards articulation).

- “Degree of Pleasure” : Bach Sonata For Violin Solo No 1 in G minor BWV 1001, *Adagio* (first bars)

The excerpt was chosen because it enables the listener to hear and feel the behavior of this violin across all strings.

---

2. Les partitions des extraits musicaux sont présentées à l’Annexe D

### 5.2.3.3 Violinist-experimenter

One professional violinist (hereafter called FM) was recruited to play the violins for the participants in Situation L. Being concertmaster of various orchestras, his playing is reliable enough to ensure small variability on the same excerpts over the length of the experiment. Perceived differences were thus likely due to differences between instruments rather than to variability in his playing technique (which would have been impossible to compensate by repetitions, as it would have led to too much fatigue, nor obviously by the use of bowing machine). In addition, FM is consultant for a luthier, which means that he is used to test all kinds of violins and to adjust quickly so the violins sound “good”, regardless of his personal taste. This means that he is used to adapt to a violin to the extent of making it sound nice but not to the extent of getting his “own” sound (the sound he would try to obtain if he had to play that violin in a concert) in order not to erase subtle differences between instruments.

### 5.2.4 Apparatus and materials - experimental set-up in the AL condition

In Situation L, the experimental setup basically consisted of two parts (see Figure 5.2) :

- the excitation system : a real violin played by the violinist-experimenter
- the retransmitting system : an isolated neck bonded by the neck wedge to a massive block of pine wood in arch form that the participants were asked to hold. Two lead weights of 10kg each laid on top of the wooden arch, on both sides of the neck and the arch feet were standing in sand to ensure that the structure remains completely still and was uncoupled from the table on which it was positioned.

The violinist-experimenter played a violin to generate the vibrating signals, audio and tactile. As the participants were seated right in front of the violinist-experimenter — behind the curtain — the sound of the violin was heard live. As regards the tactile signals, the vibrations of the violin were picked up at the violin scroll by means of a small accelerometer held tightly at the back of the scroll with an elastic band and then sent to the isolated neck through a shaker system, in real time. The use of a shaker enabled to excite the structure at different vibration levels because the voltage was not limited. The stinger rod of the shaker was bonded to the scroll so that the energy of the signal was completely transmitted to the isolated neck. The accelerometer detected the vibrations in the vertical direction (along the  $z$  axis, i.e. normal to the fingerboard plane); the shaker excited the scroll of the isolated neck in the same direction (along the  $z$  axis).

Ideally, we would have liked to measure the vibrations on the real violins and retransmit them on the isolated neck as close as possible to the position of the hand. The first issue was that it was virtually impossible to set up an experimental device which could follow the hand of the violinist experimenter as well as follow the hand of the participant. One position on both the real violins (for recording the vibrations) and the isolated neck (for retransmitting them) had therefore to be chosen and as a consequence, it was not possible to recreate the dynamic properties of the real violin neck at all points along the isolated neck. We thus decided to ensure the same vibration level in both necks at a specific location only and we chose the first position. The second issue



is that we wanted the participant to hold the isolated neck and the violin-experimenter the real violins as normally as possible. Therefore the shaker and the accelerometer could not be positioned exactly where the hand is in first position, but at the scroll. This can however be compensated for, as explained below (in the section about the calibration of the system).

An amplification system was included in the setup (see Figure 5.3) : an intensity conditioning amplifier (Bruel & Kjaer 2692D NEXUS) for the accelerometer, a 33-band stereo graphic equalizer (Technics SH-8065) and an amplifier (Bruel & Kjaer type 2706) for the shaker. The apparatus was concealed behind a curtain.

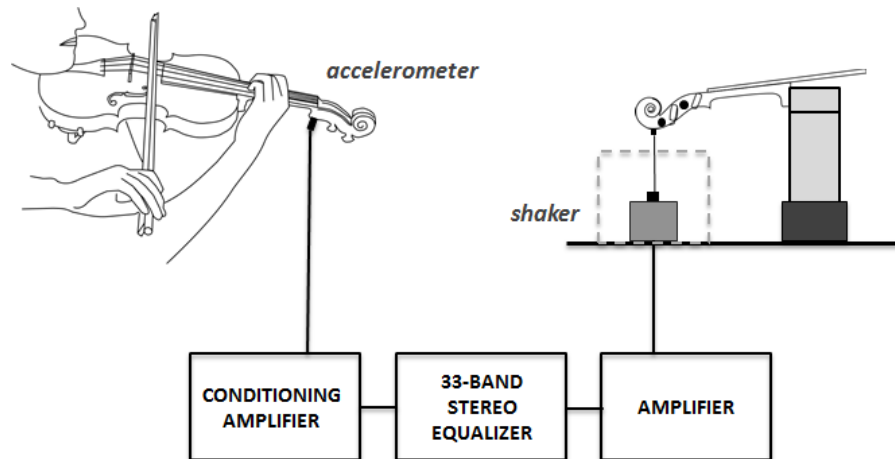


FIGURE 5.3 – Experimental setup

#### 5.2.4.1 Calibration of the system

We assumed that at frequencies higher than 50 Hz, which is clearly in the vibrotactile domain, people are not sensitive to the direction of the vibrations of the object in contact with their hands ; they feel the vibration as a whole. Although to our knowledge there is no behavioral study investigating this assumption, there is a physiological basis to support it. The Pacinian receptor population is likely to provide the bulk of the neural signaling in this frequency range (Lamoré et al., 1986), and this population is distributed in deeper tissues (Stark, 1998), where the effect of the boundary conditions can be expected to have vanished.

As a result, we decided to quantify the vibrating signal at both real and isolated necks through the energy of the 3D-recorded acceleration signals (namely the magnitude of the acceleration considered in the three directions : tangential to the neck, normal to the fingerboard and normal to the contact areas on the sides of the neck) rather than through the magnitude of its individual acceleration components. Considering this, our only concern was to equalize the energy of the vibrating signal at the isolated neck and the energy of the vibrational signal at the real neck. We could thus reformulate our problem to take into account this physiological assumption. We needed to compensate the excitation of the shaker so the norm of the resulting vibration in the isolated neck along the three dimensions was equal to what existed at the real neck.

To this end, it was necessary to calculate some relevant transfer functions, to estimate the overall effect of the chain. Since the input to the chain was provided by vertical vibration measured at the scroll and not directly by the 3-D vibration at the position of the hand, it was necessary to define the transfer function between the hand and the sensor in order to compensate

for this "shift" in position of the sensor as well as this reduction from 3-D to 1-D. The same applied to the isolated neck where we needed to compensate for the "shift" in position of the shaker, compared to the location of the participant's hand as well as to compensate for the fact that though the excitation was 1-D (vertical), vibrations along the x and y axes were produced as well at the position of the participant's hand.

We thus measured the relevant transfer functions between the scroll and the contact between the thumb of the violinist's left hand and the violin neck on both necks along the three dimensions — hereafter  $G_{zx}$ ,  $G_{zy}$  and  $G_{zz}$  on the real violin and  $H_{zx}$ ,  $H_{zy}$  and  $H_{zz}$  on the isolated neck — and combined them so we get a "transfer function in norm" (hereafter  $G_{norm}$  and  $H_{norm}$ ). On the real violin neck, at a given frequency  $\omega$ , for an applied force  $F(\omega)$  along the vertical direction ( $z$  axis), the displacement vector is  $F(\omega) \times |G_{zx}(\omega), G_{zy}(\omega), G_{zz}(\omega)|$ . Therefore, the transfer function in norm is simply given by  $G_{norm} = \sqrt{G_{zx}^2 + G_{zy}^2 + G_{zz}^2}$ . The same applies on the isolated neck :  $H_{norm} = \sqrt{H_{zx}^2 + H_{zy}^2 + H_{zz}^2}$ .

As the flesh of the hand can damp the vibrations, the measurements were conducted on the three violins held by the violinist experimenter in first position so the transfer function in norm  $G$  takes into account the damping caused by the hand during the playing : the measured vibrations will indeed be lower than the one felt by the player. So in practice, we measured the three transfer functions  $G$  by tapping the back of the scroll (at the exact position where the sensor was positioned during the experiment) with a mini-force hammer (PCB, Model 086E80), in the direction of the sensor's acting, and measured the response in the three directions by means of a 3D accelerometer mounted on the neck, next to the thumb of the violinist experimenter. For the other transfer function in norm  $H$ , there is no problem of damping by the flesh as what needs to be controlled is the vibration felt by the finger, i.e. the vibration of the neck without hand ("before" the finger acts as a damper). In practice, the 3 transfer functions  $H$  were measured by generating a sweep in the shaker and recording, along the three dimensions with a 3D accelerometer, the vibrations on the neck at the place where the participant's thumb would be in first position.

Let  $amp_{vib}$  be the vibrational energy at the violin neck that we would like to recreate at the position of the participant's hand on the isolated neck. On the real violin, the signal picked up by the accelerometer is :  $\frac{amp_{vib}}{G_{norm}}$ . In the end, the signal to "send" to the shaker (hereafter,  $B$ ) so that we get  $amp_{vib}$  at the position of the participant's hand on the isolated neck is :  $B = A \times G_{norm} \times \frac{1}{H_{norm}}$ . The quantity  $A$  represents the amplification introduced by the amplifier connected to the shaker.  $A$  could be 1 (in Cond AL 100% absolute and comparative judgment) or 0.5 (Cond AL 50% - comparative judgment).

An equalizer was thus used to amplify the recorded signal by  $B$ . Since the equalizer was based on a bank of filters covering the vibrotactile spectrum in eight frequency bands, each of which having a fixed center frequency and  $Q$  but an adjustable level, we could raise or lower each slider in order to visually approximate the graph of the intended frequency response. Our concern was thus to keep the same shape by averaging the signal per frequency band (because it could not be more optimally setup due to the fixed center frequency of the filters). Anyway,  $B$  presenting sharp peaks and troughs, it would have not been possible to recreate exactly  $B$  by

a more sophisticated digital equalizer without introducing delays.

Figure 5.4 presents, for each violin, the overall transfer function  $B$  superimposed with the response of the equalizer as set up to approximate optimally  $B$ .

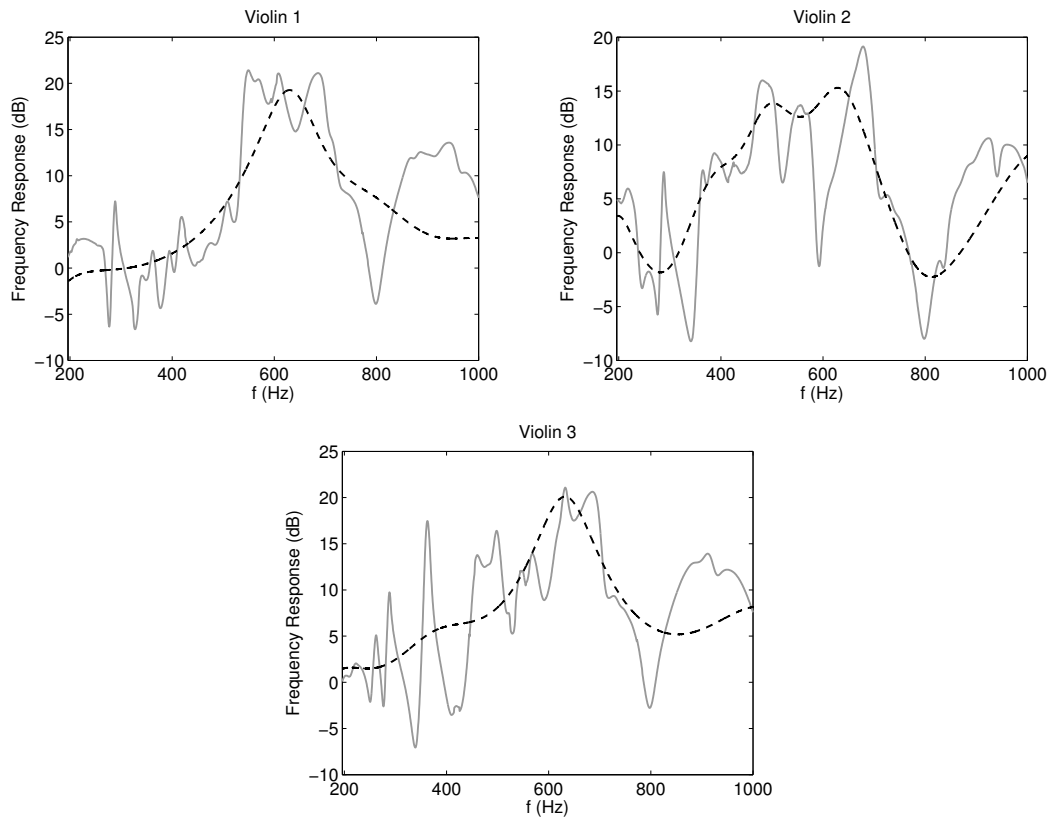


FIGURE 5.4 – Overall transfer function  $B$  superimposed with the response of the equalizer, for the three violins

The fact that the equalizer only approximated the overall transfer function was not a concern because we did not intend to characterize our violins; the violin is treated as a fixed effect in our experimental design. What was important however was to have realistic levels of vibrations over the range of sensitivity to vibrations.

#### 5.2.4.2 Perceptual validation of the soundproof box

The last issue we encountered was the noise generated by the shaker which acted as a loudspeaker. A soundproof box was specially designed to house the shaker in order to attenuate as much as possible the sound that could emanate from the device and may taint the results. The wooden attenuation box contained a very thin aperture through which the shaker rod could pass. Preliminary measurements with microphones displayed a very slight increase of the sound pressure level in the frequency band around 1100 Hz when the setup was switched on. Thus, in order to test the efficiency of the soundproof box on a perceptual level, i.e. whether or not a sound could be heard when the setup was switched on, a test employing a 3AFC procedure was

then carried out. Seven subjects participated in this preliminary test.

The violinist experimenter was asked to play a scale from G5 ( $f_0=784$  Hz) to G6 (1568 Hz) at a dynamic forte, on one of the three violins of the experiment. The vibration transmission setup could be switched on or off. The subjects were seated where participants would sit during the experiment, so their ears were at the correct distance from the setup. As the subjects did not hold the isolated neck, no vibrotactile cues could be used.

Three scales were played to the subject on each trial, two of them with the setup off, one with the setup on. The subjects were instructed to identify aurally the different condition from each triplet presented. If they were not sure then they must guess. The test consisted of three trials.

The subjects did not receive any information other than the instructions and a specification of the sensory modality — audition — by which the difference should be perceived. No information were given about the composition of the three stimulus set with which a subject was presented in a certain trial.

None of the participants gave a single correct answer. Furthermore, all of them reported they picked one of the three options randomly. We thus assumed that noise emanating from the shaker could not be discerned by the participants.

## 5.3 Results

### 5.3.1 Absolute judgments

Figure 5.5 presents the mean criteria ratings (averaged over the three violins) by criterion and experimental condition, in the tasks requiring absolute judgments.

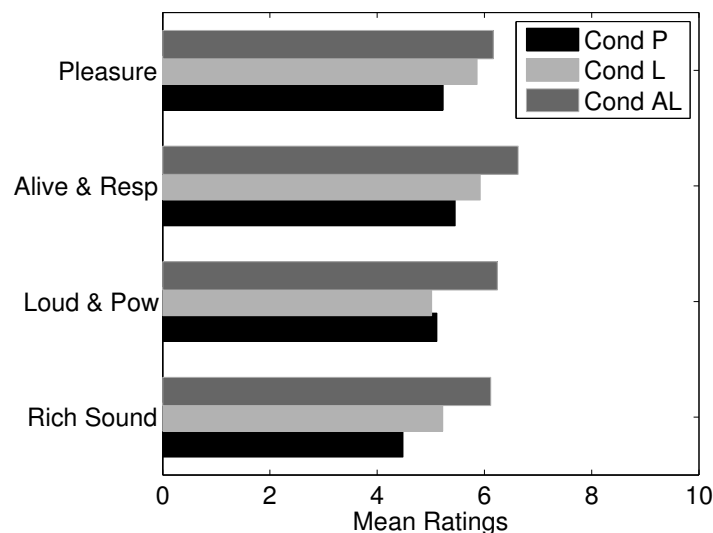


FIGURE 5.5 – Mean preference ratings under the three conditions requiring absolute judgments

The investigation tested the effect of two experimental factors, the participant's role and the

	e (SEM)	$t_{(14)}$	$p$	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$
Rich Sound	0.90 (0.52)	1.72	0.11**	[-0.22 ; 2.01]
Loud & Pow	1.23 (0.38)	3.20	0.003*	[0.40 ; 2.05]
Alive & Resp	0.71 (0.45)	1.56	0.14**	[-2.66 ; 1.68]
Pleasure	0.30 (0.50)	0.61	0.28*	[-0.76 ; 1.36]

TABLE 5.1 – Comparisons Cond AL – Cond L

vibration level at the neck. The same overall trend is observed on Figure 5.5 for all four criteria. Ratings are higher when participants are in the role of the listener (Cond L and Cond AL) than when they are in the role of the player (Cond P). Clear rating increases are indeed observed from the experimental condition Cond P to Cond L, and then to Cond AL. Mean ratings are around five in Cond P (on a 0-10 scale), between five and six in Cond L and slightly above six in Cond AL. The magnitude of the increase however seems to depend on the criterion (in particular, this has to be qualified for the criterion « Loud and Powerful »).

Figure 5.5 shows that when the participants were in the role of the listeners, the simultaneous presentation of vibrotactile information led to an increase in the mean criteria ratings, compared to when no vibrotactile feedback was provided. As a complement of Figure 5.5, Table 5.1 presents the difference between Cond AL and Cond L, by criterion. Hereafter observed one degree of freedom effect of a factor is notated  $e$  (e.g. for the main factor “vibration level” Cond AL - Cond L), while the corresponding true effect is notated  $\epsilon$ . Bayesian statistical procedures are adopted in this study (Rouanet et al., 1998), using PAC software (Lecoutre and Poitevineau, 1992), assuming an uninformative prior distribution (i.e. no information is used other than what is contained in the data, no particular hypothesis is favored a priori). Hereafter, Bayesian statements will be notated  $Pr^{*3}$ . For instance, in Table 5.1, the last column stands for the 95% credibility interval : given the data, there is a 95% probability that the true effect is between -0.22 and 2.01 for criterion “Rich Sound”.

The observed differences are all positive, and rather small for all criteria. The greatest effect, though limited, is observed for the criterion “Loud and Powerful”, for which the effect is significant ( $p = 0.003$ ). For this criterion, the same conclusion can be inferred at the population level with sufficient confidence : the upper  $\epsilon$  limit at a 95% level is only around 2 (compared to the scale [-10 ; 10]). This demonstrates that adding the vibrotactile feedback information to the listener (violinist) have a clear effect on the evaluation of the criterion “Loud and Powerful”, though this effect is small. This is in line with our hypothesis that our participants should perceive the violin more powerful with the vibration feedback than without, while listening.

3. Naturally they are conditional on the data at hand, but, for sake of brevity, the conditional notation is omitted.

\* one sided

\*\* two sided, according to hypotheses

	e (SEM)	$t_{(14)}$	two sided $p$	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$
Rich Sound	0.74 (0.53)	1.38	0.19	[-0.41 ; 1.89]
Loud & Pow	-0.10 (0.50)	-0.20	0.85	[-1.15 ; 0.96]
Alive & Resp	0.47 (0.40)	1.16	0.26	[-0.40 ; 1.33]
Pleasure	0.63 (0.61)	1.03	0.32	[-0.69 ; 1.95]

TABLE 5.2 – Comparisons Cond L – Cond P

	e (SEM)	$t_{(14)}$	two sided $p$	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$
Rich Sound	1.64 (0.48)	3.41	0.004	[0.61 ; 2.66]
Loud & Pow	1.13 (0.36)	3.13	0.007	[0.36 ; 1.90]
Alive & Resp	1.18 (0.37)	3.14	0.007	[0.37 ; 1.98]
Pleasure	0.94 (0.45)	2.07	0.06	[-0.03 ; 1.90]

TABLE 5.3 – Comparisons Cond AL – Cond P

Moreover, in this task requiring absolute judgments, our hypothesis concerning the rating of criterion “Pleasure” is not confirmed nor invalidated because of too much uncertainty, as illustrated by the credibility interval. Again, for the two other criteria, there is too much variability to make any conclusion. So the questions concerning whether or not the vibrations have an effect on their evaluation remain open.

To explore whether violinists evaluate violins in a different manner when they are in the role of the player, in the role of a simple listener, and in the role of an “augmented listener” (i.e. where Cond P is situated compared to Cond L and AL), we compared Cond P and Cond L (Table 5.2) and Cond P and Cond AL (Table 5.3)<sup>4</sup>, by criterion.

In Table 5.2, the observed differences are small for all criteria, and not significant. The null hypothesis that the mean population ratings in both conditions are identical cannot be rejected. Furthermore, all credibility intervals are rather small so it could be concluded with sufficient guarantee that if any of these effects exist, it is not large. In Table 5.3, the observed differences are rather small though quite significant, except for criterion “Pleasure” (for which  $Pr^*(\epsilon > 0) = 1 - p/2 = 0.97$ ).

Therefore, while it is not possible to draw conclusion as to the position of the ratings in Cond P compared to those in Cond L, we showed that with our set-up, ratings in Cond P are below those in Cond AL.

It is interesting to investigate whether the effect of vibrotactile feedback (i.e. the effect of the experimental conditions) is dependent on the violin. Table 5.4 presents the effects of interaction

4. Although Table 5.3 is deductible from the two preceding comparisons (Table 5.1 and Table 5.2), it is presented here for the convenience of the reader.

condition  $\times$  violin, by criterion (measured as the Root Mean Square of the effects of the four contrasts forming the interaction, and notated RMS for the observed effects and **RMS** for the true effects).

	RMS (SEM)	$F_{(4,56)}^a$	two sided $p$	$Pr^*[RMS < x]=0.95$
Rich Sound	1.18 (0.86)	1.86	0.13	$x = 2.08$
Loud & Pow	1.05 (1.02)	1.09	0.37	$x = 2.17$
Alive & Resp	0.38 (0.87)	0.19	0.94	$x=1.50$
Pleasure	0.95 (0.93)	1.04	0.39	$x=1.98$

TABLE 5.4 – Interaction effects (condition x violin)

*a.* Greenhouse - Geisser and Huynh - Feldt corrections for violation of sphericity are negligible

As can be seen from the table, there was no significant interaction between conditions and violins, so the null hypothesis that whatever the violin, the condition has the same effect cannot be rejected. Moreover, the highest observed interaction effect is 1.18 (criterion « Rich Sound »), and the highest limit of the negligibility interval being 2.17 considered as a small value compared to the scale [0 - 20], we can conclude that the interaction effects, if they exist, are limited.

Hence, even though the violins were chosen to be as different as possible in terms of vibratory behavior, it is still possible the effect of vibrotactile feedback is independent of the violin.

### 5.3.2 Comparative judgments

With the paired comparison evaluation we test the hypotheses that, in the augmented listening condition, increasing the vibration level at the neck leads to an increase of the “Sound Richness” and “Pleasure” ratings. We also explored whether the ratings of criteria “Sound Richness” and “Alive and Responsive” varied as the level of vibration feedback was manipulated.

We first study the effect of the factor ‘level of vibration’, violin by violin. Because each pair consisted of the same violin with two different levels of vibration, in the following analyses, we will talk about ‘effect of violin’ rather than ‘effect of pair’. Figure 5.6 shows the mean comparison ratings for each violin and criterion (a positive score indicates that the violin VL\_100% has the attribute X more than the one with VL\_50%).

Excepted two violins for the criterion« Alive and Responsive », the effect of the level of vibration at the neck is clear and quite large on all violins and criteria : the ratings being positive for three criteria, participants tended to rate the violin with 100% vibrations higher than when the vibration level was 50%.

Table 5.5 presents the main effect of the factor “vibration level” (directly given by the mean difference ratings),  $e$  is the observed effect and  $\epsilon$  the true effect.



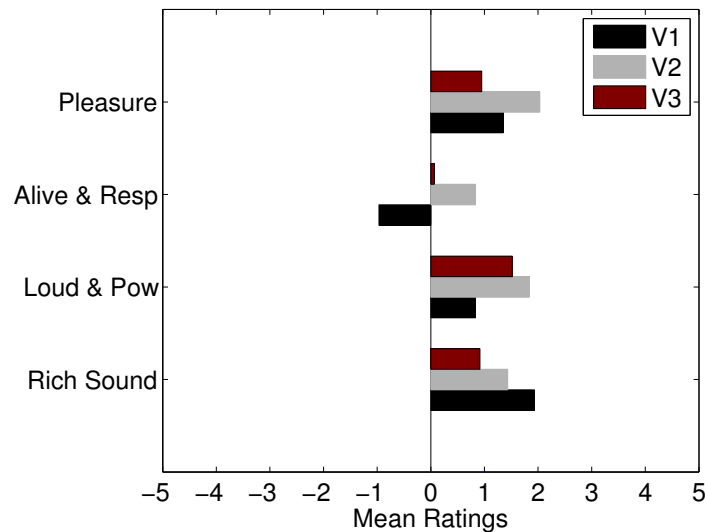


FIGURE 5.6 – Mean comparison ratings (VL\_100% - VL\_50%) of the three violins, by criterion

	e (SEM)	$t_{(14)}$	$p$	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$	$Pr^*[\epsilon > 0]=0.95$	$Pr^*[\epsilon > 1]=0.95$
Rich Sound	1.42 (0.22)	6.40	< 0.0001**	[0.94 ; 1.89]	> 0.9999	0.96
Loud & Pow	1.25 (0.22)	5.79	< 0.0001*	[0.79 ; 1.71]	> 0.9999	0.87
Alive & Resp	0.30 (0.29)	1.05	0.31**	[-0.31 ; 0.92]	0.85	-
Pleasure	1.26 (0.20)	6.31	< 0.0001*	[0.83 ; 1.69]	> 0.9999	0.90

TABLE 5.5 – Effect of the factor “vibration level”

\*one sided or \*\*two sided, according to hypotheses

The effect of the vibration level on the ratings of criteria “Rich Sound”, “Loud and Powerful” and “Pleasure” is highly significant ( $p < 0.0001$ ). For these three criteria, the effect is of high magnitude (compared to a  $[-5 ; 5]$  scale), and it is the greatest for criterion “Rich Sound” (1.42). Given the data, the probability that the true (population) effect will be positive - i.e. the higher the vibration amplitude, the better the rating - is extremely high for these three criteria, and, moreover, still very high for an effect higher than 1, that we consider as a quite substantial difference value on a  $[-5 ; 5]$  scale.

As regards the criterion “Alive and Responsive”, the effect is small and non significant. Although positive, the possibility of a negative (or null) population difference cannot be ruled out with sufficient confidence to infer the same conclusion at the population level, so our judgment will be suspended.

Again, we tested whether the effect of the level of vibrotactile feedback is dependent on the violin. As can be seen from Figure 5.6, the same overall trend is observed for all three violins. Table 5.6 presents the effect of the factor violin, measured as the Root Mean Square (RMS) of the pairwise mean differences (to be compared to a scale [0; 10]).

	RMS (SEM)	$F_{(2,28)}^a$	two sided $p$	$Pr^*[RMS < x]=0.95$
Rich Sound	0.30 (0.57)	0.28	0.76	x = 1.14
Loud & Pow	0.32 (0.63)	0.26	0.78	x = 1.26
Alive & Resp	0.81 (0.60)	1.83	0.18	x=1.62
Pleasure	0.70 (0.43)	2.65	0.09	x=1.27

TABLE 5.6 – Effect of the factor “violin”

*a.* Greenhouse - Geisser and Huynh - Feldt corrections for violation of sphericity are negligible

The observed effect of the factor violin is of limited magnitude for all four criteria (0.81 at a maximum compared to the scale [0; 10]) and non-significant. The same conclusion can be inferred at the population level with sufficient confidence as the highest upper **RMS** limit (at a 95% level) is 1.62 (obtained for the criterion “Alive and Responsive”). Consequently, the effect of the vibration level does not appear to depend too much on the violin, i.e. the type of sound.

## 5.4 Discussion and Conclusions

This research has investigated the effect of vibrotactile feedback in the left hand of violinist on the perception and evaluation of violin, taking as a starting point some hypotheses generated by researchers in violin acoustics literature and in the field of multimodal perception. On the one hand, in the acoustics domain, the few studies invoking the notion of “feel” of a violin share a focus primarily on violin necks’ vibrations, suggesting that when perceived through the left hand of violinists these vibrations become the basis for the perception of how a violin “feels”. On the other hand, in the perceptual domain, there are several laboratory demonstrations of tactile influence on the perception of sound. Besides, results of our previous study investigating the role of auditory and tactile modalities in violin quality evaluation (Wollman et al., 2013) pointed to the possible multisensory processes that are likely to occur during the evaluation process of both the feel and the sound of a violin. The present contribution investigated whether vibrations can modulate the auditory perception of a violin in approaching realistic conditions. It furthermore constitutes new data on the role of vibrotactile feedback in violin evaluation. We conducted an empirical study in which 15 professional violinists evaluated three violins either by playing them or by actively listening to them while holding and fingering on a real violin neck, to mimic normal conditions. The first part of this perceptual experiment was dedicated to absolute judgments. The last part of the experiment investigated the effect of the level of vibration on the comparative

evaluation of two violins of similar sound quality, given that it was the same physical instrument.

Our first hypothesis was about the perception and evaluation of the criterion “Loud and Powerful” in the listening situation. We predicted that the ratings should be higher when violins are evaluated with higher vibrations. In the first part of the experiment (dedicated to absolute judgments), we found that the presence of vibration accompanying the sound of violins had a positive and clear — though small — effect on the evaluation of criterion “Loud and Powerful” compared to when no vibrotactile feedback was provided. Since there was at most limited interaction between violin and condition, these results stand for all three violins under study. In the second part of the experiment (dedicated to comparison judgments), we found that a given violin was rated louder and more powerful when accompanied by the actual level of vibrations than when presented with half the vibration level. Again, no effect of violin was found, suggesting that the phenomenon could be independent of the violin. Our results thus confirm our first hypothesis. They provide as well quantitative and perceptual support to previous reports concerning the influence of vibration on auditory intensity perception in laboratory context and, more importantly, extend those findings to the perception and evaluation of musical instrument, in more natural context.

In the task requiring absolute judgments, despite the observations, the effect of the presence/absence of the vibration at the neck failed to reach significance for criterion “Rich Sound”. Nevertheless, in the comparison task where participants were always provided with a vibrotactile feedback, the level of vibration (full/half) had a strong effect on the ratings of this criterion, namely the higher the vibration amplitude, the richer the sound. Furthermore, the vibrotactile modulation of auditory perception proved to be rather robust because the enhancement is more or less uniform across the three violins. This result is another example of vibrotactile influence on the perception of sound and can be interpreted as support for the existence of crossmodal interaction in violin evaluation.

As regards these two criteria *a priori* related to auditory-only cues, results in the paired comparison evaluation task show that even though the sound of the violin did not actually change, violinists could not ignore the tactile information. Data quite clearly show cross-modal enhancement, in that participants on average rated the violins as louder and their sounds as richer, when presented with higher vibration than when they were presented with half the level, and this, irrespective of the violin and thus the type of sound.

A similar trend seen for “Rich Sound” ratings was observed for the ratings of criterion “Pleasure”. Our hypothesis concerning this criterion could not be confirmed, nor invalidated, in the task requiring absolute judgments. It was however totally confirmed in the paired comparison task as expressed by the extremely high probability that the difference VL\_100% - VL\_50% is higher than 1 on a [-5 ; 5] axis. Eventually, our study gives tentative supports to the view that increasing the strength of vibration increases the subjective pleasure. The difference of results in the two parts of the experiment may be explained by the fact that the two types of tasks were extremely different to the participants. The second task being a more direct way of comparing

the violins, it may have emphasized small differences (otherwise difficult to evaluate in an absolute way) and thus led to a larger influence of the vibration level (Hsee et al. 1999).

Interestingly, we did not observe any significant effect of the level of vibrotactile feedback on the ratings of criterion “Alive and Responsive”, neither in absolute judgments, nor comparative judgments. Participants were not instructed before the experiment as to what was meant by “Alive and Responsive” but were asked to give a definition for each criterion at the end of the experiment and explain how they evaluated the criterion during the session. Participants’ responses give a plausible explanation to the non-significance of the effect on this criterion. One frequent report was indeed that an “Alive and Responsive” violin is one on which the action of the bow is easy. Now, cues related to bow pressure and articulation, essential for the evaluation of how a violin responds, are not related to the vibration level at the left hand but more to the response of the bow when touching the string as felt in the right hand. Thus, while we added “Responsive” to orient players towards the most tactile meaning of “Alive”, with ‘tactile’ in the sense of ‘vibrotactile at the left hand’, it seems that it was interpreted as ‘tactile as felt in the right hand’ which can thus explain this non-significant effect of the vibrotactile feedback on this criterion. This actually proves to be useful for control purpose. Considering the participants’ definition of the criterion, the absence of an effect for this criterion is consistent with a sensory effect for the other criteria. If the ratings of “Alive and Responsive” had increased with increasing vibration level, we could have interpreted the responses of the experiment as the likely result of a decision process (e.g. because of a distraction effect produced by the set up that would result in a shift of attention away from audition and toward the tactile modality). As it is not the case, the positive effects observed in this part of the experiment and reported above are interpreted as truly reflect an audiotactile integration. We did not test whether simultaneity constitutes a necessary factor for an integration to occur — as it is classically done to rule out the alternative distraction account of the results — because violinists are used to combine those two sensory modalities even without being conscious of it, and so we did not want to distract participants towards vibrations. Naturally, it would be premature to conclude that the quality of a violin is necessarily highly correlated to the level of vibration and that large amplitudes of vibration would guarantee the quality of a violin in the violinist community. But these results show a trend for the evaluation to be better for three criteria when, for a given sound, the violin has higher vibrations.

One open question raised in the introduction was to investigate whether violinists evaluated violins in a different manner when they play and when they listen. This investigation concerns the first part of the experiment dedicated to absolute judgments. Criteria were observed to be more highly rated in the listening situation (Situation L – Cond L/Cond AL) than in the playing situation (Situation P – Cond P), even though no firm conclusion could be asserted for the increase between Cond P and Cond L. There are several possible explanations to account for this increase. One could argue that this is simply due to an adaptation/habituation effect to the instrument which makes that naturally, the more the violins are heard, the better they are

perceived. As all participants started with Situation P, ratings in Situation L are higher. It could be due as well to the difference of context in which violins were evaluated in those two situations. Participants could freely test the violins in the playing condition but they were constrained in the subsequent listening task. Players could thus use as many techniques as needed and explore as many aspects of violins as wanted to make their judgments in situation P while they could hear only one musical passage to make their evaluation of the corresponding criterion in situation L, which likely led to the violins being judged more severely in Situation P (lower marks in average). Incidentally, one could also argue that, in Cond AL, the vibrational reproduction was not accurate enough — the equalizer only approximated the intended frequency response per frequency band — to allow for comparisons between playing context and augmented listening context. (Note that if it was the case, the limitation of the technique was not a concern in the paired comparison task because we consider only relative judgments). However, the rather poor frequency discrimination of the tactile sense makes this explanation rather unlikely.

The few studies dealing with sensory integration in a relatively realistic context were always conducted the same way : the audio stimuli that result from an action generating simultaneously a tactile sensation (e.g. teeth brushing [Zampini et al. 2003]) were manipulated in real time to investigate the effect on that tactile sensation. It is therefore the first study, to the best authors' knowledge, that addresses the opposite effect, namely the effect of manipulation of vibrotactile stimuli on sound perception, and that illustrates sensory integration in a quite natural context.

However, this has imposed strong constraints on the violinists who thus lost control on the production of the auditory and vibrotactile stimuli that are perceived, even if we took great care to place them in the most possible active situation regarding this production. Therefore, it remains unclear to which extent our results would hold in the real playing situation which leads not only to sensory integration but to sensory-motor integration : violinists control the sound production and thus the generation of the auditory and vibrotactile feedbacks that they perceive and that can modify, in return, the control within a complex loop. This study is nevertheless interesting as it illustrates, even if only in the particular context of this experiment, the influence of the level of violin vibrotactile feedback at the left hand on the perception and evaluation of some perceptual features of a violin, especially criteria related a priori only to the sound of the instrument. It thus sheds light on why correlations between sound perceived qualities and acoustical properties have been so difficult to find and encourages researchers to extend their search to non-acoustical properties.



# Influence du retour vibratoire : une étude des différences inter-individuelles

---

## 6.1 Introduction

Dans le mois suivant l'expérience, les violonistes ayant pris part au test ont été invités à remplir un questionnaire<sup>1</sup>. En plus de nous renseigner sur la pratique courante des participants et sur le violon qu'ils possèdent, leurs réponses nous permettent d'approfondir notre étude sur le rôle du retour vibrotactile dans l'évaluation des violons. Les réponses à la question « Faites-vous attention aux vibrations de l'instrument quand vous jouez/évaluez un violon ? » nous permettent de séparer les participants en deux groupes de sujets : ceux qui pensent faire attention aux vibrations et ceux qui ne pensent pas y faire attention. On parlera par la suite du groupe « VibAtt » (violonistes faisant attention aux vibrations) par opposition au groupe « noVibAtt » (violonistes ne faisant pas attention aux vibrations). Puisque l'on a deux groupes de sujets clairement identifiés sur un critère spécifique — l'attention aux vibrations — il est intéressant d'explorer les différences qui pourraient exister dans les jugements de plaisir des deux groupes, en particulier si la variabilité interindividuelle est plus faible au sein d'un même groupe. Une étude séparée des réponses au sein de deux groupes ainsi établis fait l'objet de la première partie de ce chapitre. La seconde partie explore la relation qui pourrait lier les caractéristiques des violons à l'appartenance à un groupe de sujet.

## 6.2 Deux groupes de sujets « VibAtt » / « noVibAtt »

Parmi les quinze violonistes de l'étude, neuf ont répondu faire attention aux vibrations de l'instrument quand ils jouent/évaluent un violon (VibAtt), six ne pas y prêter attention (noVibAtt). La question avait déjà été posée de manière informelle à de nombreux violonistes au cours de ce projet de thèse et il en était ressorti qu'un beaucoup plus grand nombre de violonistes reportaient ne pas prêter attention aux vibrations pour évaluer les violons, certains rapportant même ne pas être conscients de l'existence de phénomène vibratoire perceptible par la main lors du jeu. Les résultats de la présente expérience montrent que l'intervalle de confiance à 95% pour la proportion de violonistes qui reporteraient faire attention aux vibrations dans la population

---

1. L'intégralité des réponses au questionnaire est présentée en Annexe E

totale des violonistes est  $[0.32; 0.84]$ . Deux pistes pourraient être avancées pour expliquer le fait que l'effectif du groupe VibAtt soit plus important que celui du groupe noVibAtt parmi les participants de notre expérience. Premièrement, les violonistes ayant répondu positivement à la question seraient des cas relativement rares mais la sélection des participants à l'expérience (que l'on assimile à un tirage au hasard parmi la population totale des violonistes) a privilégié le groupe VibAtt. On pourrait également se demander si le fait que le questionnaire ait été rempli par les participants après l'expérience n'a pas orienté les réponses de plusieurs violonistes dans le sens de l'attention générale aux vibrations. En effet, même si la question n'est pas explicitement tournée vers le ressenti des vibrations par la main gauche — objet d'étude dans l'expérience — ces mêmes violonistes auraient peut-être naturellement répondu que non, s'ils n'avaient pas été confrontés au système vibrant utilisé pendant l'expérience. L'étude séparée des réponses dans les deux groupes de sujets est donc nécessaire pour déterminer s'il y a effectivement adéquation entre ce que les violonistes ont affirmé et leur stratégie d'évaluation en cours d'expérience.

### 6.2.1 Origine des groupes

On peut se demander si des considérations simples sur les violonistes pourraient expliquer l'appartenance à un groupe. Le sexe, la pratique courante d'un autre instrument en plus du violon, et l'activité principale du violoniste (e.g. chambriste, violoniste d'orchestre, soliste etc), sont des données que l'on cherche à corrélérer avec l'attention. Ainsi, une de nos hypothèses est que les violonistes jouant également d'un instrument plus vibrant que le violon feraient davantage attention aux vibrations lors du jeu et de l'évaluation du violon. Une pratique régulière de cet autre instrument les aurait alors amenés à prendre conscience de la « nature vibratoire » du violon. La technique de l'alto se rapprochant de celle du violon, il est assez courant que les violonistes soient aussi, à l'occasion, altistes. Or l'alto est un peu plus grand qu'un violon, son manche un peu plus gros et plus long que celui du violon, sa caisse de résonance plus grande, sa tessiture plus grave. La perception des vibrations est donc a priori plus aisée pour l'alto. C'est pourquoi, nous avons demandé aux participants s'ils étaient également altistes. Enfin, on peut se demander si le fait de jouer en orchestre et de ne pas pouvoir s'entendre à tout moment (e.g. quand l'orchestre joue *forte*) ne pourrait pas expliquer l'attention particulière accordée aux vibrations, comme déjà suggéré par Askenfelt et Jansson (1992).

L'appartenance aux groupes VibAtt et noVibAtt en fonction des réponses au questionnaire est représentée sur la figure 6.1. Le code de représentation des données est le même que celui utilisé dans la partie précédente.



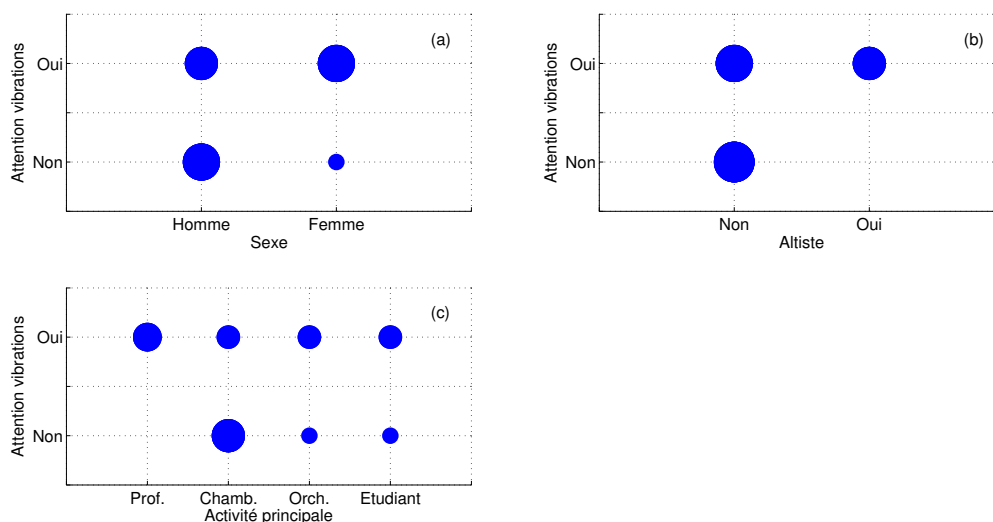


FIGURE 6.1 – Appartenance aux groupes VibAtt vs. noVibAtt en fonction des réponses au questionnaire. La surface du disque est proportionnelle au nombre de sujets

Les femmes violonistes ont reporté faire attention aux vibrations plus que les hommes violonistes d’après la figure 6.1 (a). La figure 6.1 (b) montre que les quatre violonistes ayant répondu pratiquer également régulièrement l’alto ont tous reporté faire attention aux vibrations. Notons  $\phi_1$  la proportion de violonistes également altistes dans la population VibAtt et  $\phi_2$  celle dans la population noVibAtt. Conditionnellement aux données et pour une distribution initiale bêta  $\frac{1}{2}, \frac{1}{2}$  (solution de Jeffreys) pour chacun des groupes, on obtient que  $Pr^*[\phi_1 - \phi_2 > 0] = 0.98$  (on obtient 0.90 pour une distribution initiale 0, 1 et 1, 0 respectivement pour les deux groupes, c’est à dire pour une distribution initiale très défavorable à l’hypothèse). Ce résultat donne du poids à notre hypothèse que la pratique d’un instrument plus vibrant pourrait encourager les violonistes à utiliser consciemment des indices tactiles en plus des repères auditifs classiques. La figure 6.1 (c) ne nous donne en revanche aucune information simple sur l’occupation principale des violonistes de chacun des groupes pour expliquer la différence d’attention portée aux vibrations. Seuls trois violonistes ont répondu être avant tout musiciens d’orchestre (et l’un d’entre eux reporte ne pas faire attention aux vibrations), ce qui ne nous permet pas de conclure définitivement quant à l’hypothèse que nous avons formulée. Il est tout de même intéressant de noter que les violonistes-professeurs ont systématiquement reporté porter attention à leur instrument comme corps vibrant.

### 6.2.2 Analyse des évaluations par groupe

Compte tenu de la nature des réponses des violonistes VibAtt<sup>2</sup>, on s’attend à un effet clair dans un sens positif de la présence des vibrations sur la notation des critères au sein du groupe VibAtt par rapport à la condition sans vibrations. En particulier, le degré de plaisir que les auditeurs du groupe VibAtt auraient à jouer le violon devrait sensiblement augmenter lorsque

2. Se référer à l’Annexe E pour une présentation détaillée des réponses individuelles.

le retour vibratoire du violon est fourni. De la même façon, lors de la tâche de comparaison par paires, on s’attend à un effet positif et marqué en faveur du niveau de vibration 100% par rapport au niveau 50% pour ce type d’auditeur. En revanche, il est difficile de se prononcer sur l’effet au sein du groupe noVibAtt. En effet, ce n’est pas parce que les violonistes disent ne pas prêter attention aux vibrations que le plaisir à jouer le violon n’est pas augmenté par la présence et/ou l’augmentation de la vibration, ou que l’intégration bimodale ne pourrait pas suivre le même processus que chez les autres violonistes. Nous faisons tout de même l’hypothèse que la présence des vibrations influe plus sur les violonistes du groupe VibAtt que sur les violonistes du groupe noVibAtt.

### 6.2.2.1 Evaluation en absolu

La figure 6.2 présente les notes moyennes accordées aux critères (également moyennées sur les 3 violons), par critère et condition expérimentale, dans la tâche demandant des jugements absolus, pour chaque groupe séparément.

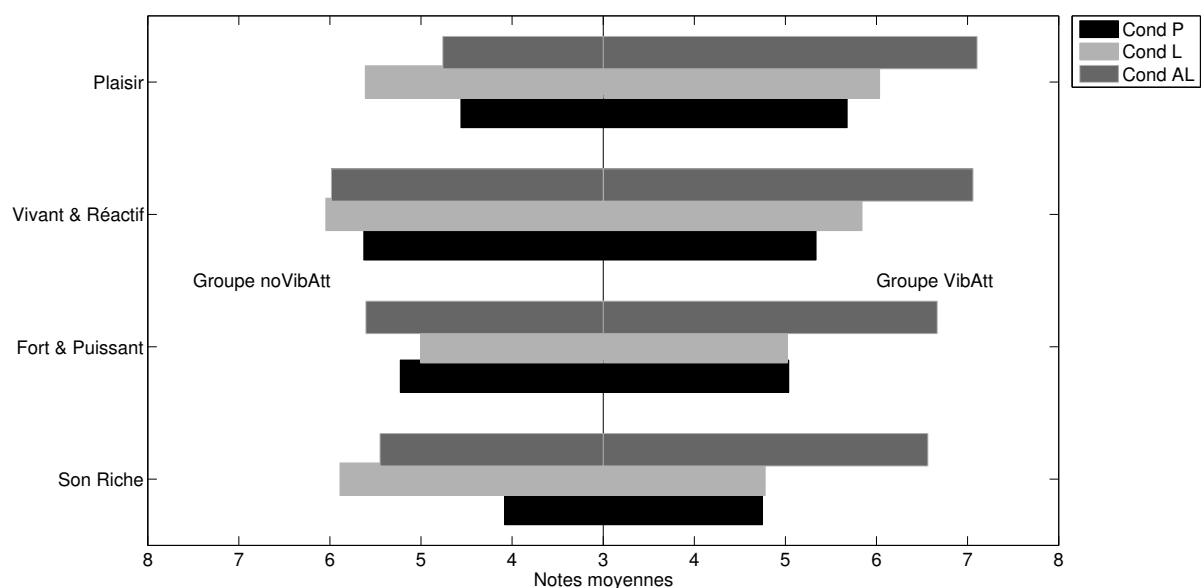


FIGURE 6.2 – Notes moyennes, par critère (en ordonnée), condition expérimentale (couleur), et groupe (vers la gauche : Groupe noVibAtt ; vers la droite : Groupe VibAtt)

La représentation des résultats par groupes séparés fait apparaître des différences d’effet des conditions expérimentales entre les groupes dépendant du critère considéré.

Si pour les deux groupes les notes semblent augmenter — ou du moins rester identiques entre Cond P et Cond L — la présence de la vibration dans la situation d’écoute active a un effet positif ou négatif dépendant du groupe considéré. Pour le groupe VibAtt, les notes des quatre critères augmentent fortement en moyenne entre Cond L et Cond AL. C’est globalement l’inverse, et beaucoup moins net, pour le groupe noVibAtt où les notes de trois critères sont plus

	RMS (SEM)		$F$		$p$	
	noVibAtt	VibAtt	noVibAtt (2,10)	VibAtt(2,16)	noVibAtt	VibAtt
Son Riche	1.33 (0.87)	1.47 (0.56)	2.36	6.92	0.14	0.01
Fort & Puissant	0.43 (0.54)	1.34 (0.58)	0.62	5.30	0.56	0.02
Vivant & Réact	0.32 (0.79)	1.25 (0.42)	0.16	8.94	0.85	0.003
Plaisir	0.79 (0.99)	1.05 (0.55)	0.63	3.66	0.55	0.049

TABLE 6.1 – Effets de la condition expérimentale par critère et par groupe

	e (SEM)	$t_{(14)}$	<i>unilatéral</i> $p$	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2] = 0.95$
Son Riche	0.22 (0.52)	0.42	0.34	[-0.91 ; 1.36]
Fort & Puiss	0.30 (0.50)	0.59	0.28	[-0.79 ; 1.38]
Vivant & Réact	0.19 (0.54)	0.36	0.36	[-0.96 ; 1.35]
Plaisir	1.29 (0.51)	2.53	0.01	[0.19 ; 2.40]

TABLE 6.2 – Effet du groupe (Groupe VibAtt – Groupe noVibAtt) en phase d'évaluation

basses en Cond AL qu'en Cond L. Au sein de ce groupe, le critère « Fort et Puissant » est le seul qui enregistre une petite hausse avec l'ajout du retour vibrotactile. La différence entre les deux groupes réside donc principalement sur les évaluations en situation d'écoute active.

Le tableau 6.1 présente les effets de la condition expérimentale (mesurée comme la moyenne quadratique des différences des moyennes deux à deux), par groupe et par critère.

Une analyse de variance par mesures répétées montre un effet significatif de la condition expérimentale sur les notations des critères pour le groupe VibAtt uniquement. Par conséquent, l'hypothèse nulle que les vraies notations des critères soient identiques dans toutes les conditions ne peut pas être rejetée au sein du groupe noVibAtt.

Le tableau 6.2 présente l'effet du groupe (dans le sens VibAtt–noVibAtt) sur la notation des critères lors de la phase d'évaluation en jugements absolus, lorsque l'on moyenne sur les conditions et les violons. ("e" désigne l'effet observé).

L'effet observé du groupe est faible sur les critères « Son Riche » et « Fort et Puissant » et « Vivant et Réactif ». A en juger par les intervalles de crédibilité, il existe une trop grande variabilité sur les trois premiers critères pour en ressortir des informations claires. En revanche, l'effet observé le plus grand se trouve sur le critère « Plaisir » et il est significatif pour ce critère uniquement. Au vu des données, et pour une distribution initiale non informative (solution de Jeffreys), il y a 99% de chance ( $1-p$ ) que l'effet vrai soit dans le sens « moyenne du plaisir dans la population totale des violonistes de "type VibAtt" > moyenne du plaisir dans la population totale des violonistes de "type noVibAtt" », en sommant sur les trois conditions expérimentales.

	e (SEM)		$t_{(ddl=5\text{ ou }8)}$		<i>unilatéral p</i>		$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$	
	noVibAtt	VibAtt	noVibAtt	VibAtt	noVibAtt	VibAtt	noVibAtt	VibAtt
Son Riche	-0.44 (0.62)	1.79 (0.61)	-0.71	2.91	0.26	0.010	[-2.03;1.16]	[0.37;3.20]
Fort & Puissant	0.6 (0.60)	1.64 (0.47)	1.00	3.47	0.18	0.004	[-0.94; 2.14]	[0.55; 2.74]
Vivant & Réact	-0.06 (0.97)	1.22 (0.35)	-0.06	3.45	0.48	0.004	[-2.56; 2.43]	[0.40; 2.03]
Plaisir	-0.85 (1.01)	1.07 (0.31)	-0.84	3.30	0.22	0.005	[-3.45; 1.75]	[0.32; 1.82]

TABLE 6.3 – Comparaison (Cond AL-Cond L) par critère et par groupe

Les différences observées entre les groupes sur la figure 6.2 ne sont donc généralisables avec suffisamment de garantie que pour le critère du « Plaisir ».

Nous avons précédemment fait l’hypothèse que la différence entre les deux types d’auditeurs se manifesterait dans la différence d’effet produit par la présence du retour vibratoire. Le tableau 6.3 compare les effets par groupe de la condition expérimentale en situation d’écoute.

Le comportement observé des deux groupes de sujets est très différent. Au sein du groupe VibAtt, l’effet de la présence des vibrations est positif (Cond AL > Cond L), net, assez fort (entre 1 et 2 sur une échelle [0 10]) et très significatif pour les quatre critères. Pour ce groupe, un effet vrai est garanti positif à 99% au moins.

Au sein du groupe noVibAtt, l’effet observé est positif seulement sur le critère « Fort et Puissant ». Pour les trois autres critères, la présence des vibrations a donc un effet contraire sur les notes : elles sont moins bonnes lorsque le retour vibratoire dans le manche accompagne la mélodie. Il est cependant important de noter que la dispersion des notes est beaucoup plus grande au sein du groupe noVibAtt qu’au sein du groupe VibAtt ; le très large intervalle de crédibilité à 95% du groupe noVibAtt ne nous permet donc pas de conclure quant au vrai signe des effets dans la population des violonistes.

L’effet observé de l’interaction (groupe VibAtt–noVibAtt)  $\times$  (Cond AL-Cond L) est, par critère : « Son Riche », 2.22 ; « Fort et Puissant », 1.04 ; « Vivant et Réactif », 1.28 ; « Plaisir », 1.92. L’effet est significatif pour les critères « Son Riche » ( $t(13) = 2.45, p = 0.01$ ), et « Plaisir » ( $t(13) = 2.13, p = 0.03$ ) ; pour les deux autres critères  $p = 0.09$ . Pour ces deux derniers critères, l’interaction, donnée par le contraste (VibAtt–noVibAtt)- (Cond AL-Cond L), est positive ; l’effet (Cond AL-Cond L) est ainsi plus grand pour le groupe VibAtt que pour groupe noVibAtt. Ce résultat montre donc que la présence des vibrations, probablement remarquée chez les violonistes VibAtt, augmente le degré de plaisir que ces violonistes auraient à jouer le violon ; c’est ce qui les différencie des violonistes du type noVibAtt.

L’ordre de présentation aléatoire des instruments en condition d’écoute active (les trois vio-

lons sans retour vibrotactile + les trois mêmes violons avec retour vibrotactile) n'a pas malencontreusement privilégié un certain ordre pour chacun des groupes ; l'ordre de présentation des violons ne peut donc pas être avancé comme facteur explicatif de la différence d'effet observé entre les groupes.

### 6.2.2.2 Evaluation en comparaison par paire

Les figures 6.3 (a) et (b) présentent les notes de comparaison moyennes par violon et critère. Comme dans le chapitre précédent, un score positif indique que le violon VL\_100% possède l'attribut plus que VL\_50%.

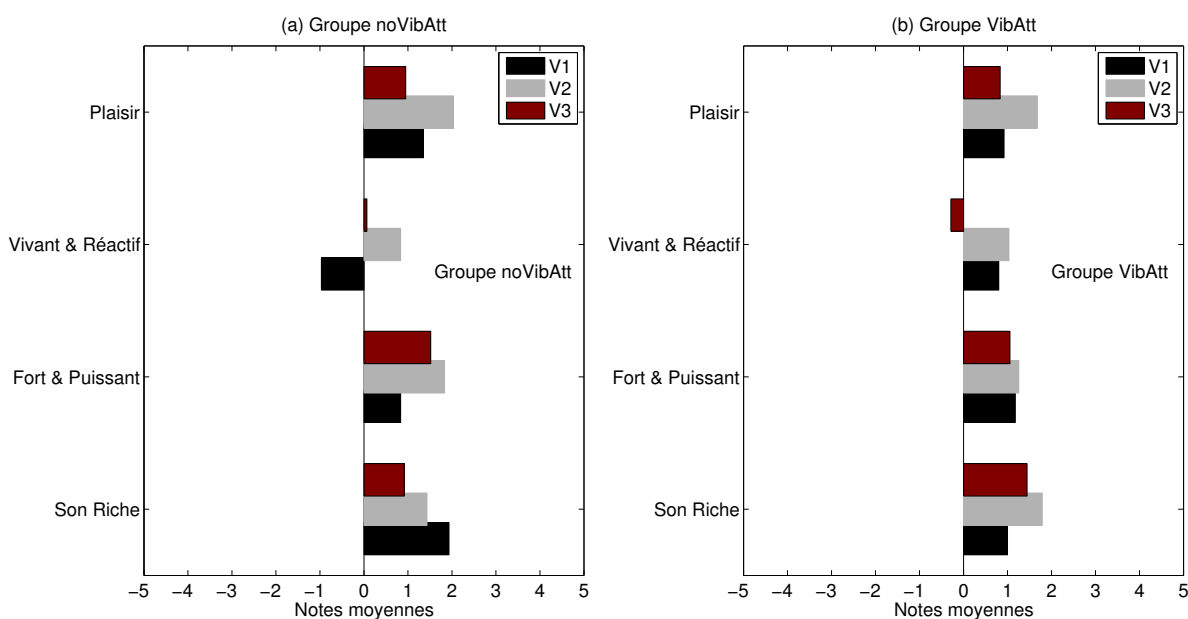


FIGURE 6.3 – Notes moyennes de comparaison (VL\_100% - VL\_50%) des trois violons, par critère : (a). Groupe noVibAtt (b). Groupe VibAtt

Dans cette partie dédiée à l'évaluation comparative, les deux groupes de sujets ne semblent pas se démarquer clairement. La même allure est observée pour les deux groupes de sujets : nette augmentation pour les critères « Son Riche », « Fort et Puissant » et « Plaisir », et sur les trois violons ; effet plus faible sur le critère « Vivant et Réactif », et dont le signe dépend du violon. On note tout de même que l'augmentation semble plus uniforme sur les trois violons pour le groupe VibAtt que pour le groupe noVibAtt.

Le tableau 6.4 présente l'effet du groupe sur la notation des critères lorsque l'on moyenne sur les violons.

Les effets observés les plus grands bien que limités sont sur les critères « Vivant et Réactif », « Plaisir » et « Fort et Puissant ». L'effet est quasi nul sur « Son Riche ». Les erreurs standard de la moyenne sont assez importantes ; ceci est dû à la forte dispersion des résultats au sein

	e (SEM)	$t_{(14)}$	<i>unilatéral p</i>	$Pr^*[x1 < \epsilon < x2]=0.95$
Son Riche	-0.02 (0.47)	0.04	0.49	[-1.03 ; 1.00]
Fort & Puiss	-0.24 (0.45)	-0.53	0.30	[-1.22 ; 0.74]
Vivant & Réact	0.54 (0.59)	0.92	0.19	[-0.74 ; 1.82]
Plaisir	-0.30 (0.42)	-0.72	0.24	[-1.20 ; 0.60]

TABLE 6.4 – Effet du groupe (Groupe VibAtt – Groupe noVibAtt) en phase de notation

du groupe noVibAtt. Ces effets sont non significatifs pour tous les critères. Les intervalles de crédibilité à 95% montrent une limite supérieure de l'effet vrai de 1.82 au maximum (pour le critère « Vivant et Réactif ») sur une échelle [-10,10], et ne nous permettent pas de conclure quant au vrai signe des effets dans la population des violonistes.

### 6.2.3 Notation du « Plaisir » en fonction du violon et du groupe

Dans la Partie 3 précédente, nous n'avions pas réussi à identifier les facteurs pouvant être à l'origine de la variabilité interindividuelle concernant la préférence ; nous avons suggéré que le plaisir pourrait être un des critères régissant la préférence. Puisque l'on a deux groupes de sujets clairement identifiés sur un critère spécifique — l'attention aux vibrations — il est intéressant d'explorer les différences qui pourraient exister dans les jugements de plaisir des deux groupes, en particulier s'il existe un accord plus grand sur le plaisir (que l'on suppose donc représenter la préférence) entre les violonistes d'un même groupe.

La figure 6.4 ainsi que le tableau 6.5 présentent la répartition des notes de « Plaisir » au cours des trois conditions expérimentales de la tâche de jugements en absolus, pour chaque groupe de sujets séparément<sup>3</sup>. Les résultats sont présentés par violon (une couleur par violon). Chaque figure représente le nombre de fois qu'un violon a reçu une note comprise dans l'un des dix intervalles définis pour le tracé.

	noVibAtt			VibAtt		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
COND P	2.7 (1.14)	7.0 (0.76)	3.98 (1.66)	7.08 (0.36)	5.11 (0.66)	4.84 (0.93)
COND L	6.58 (1.03)	6.27 (1.09)	3.98 (1.46)	6.97 (0.45)	5.07 (0.67)	6.07 (0.78)
COND AL	5.28 (1.16)	5.97 (0.8)	3.03 (0.99)	7.92 (0.39)	6.1 (0.46)	7.29 (0.57)

TABLE 6.5 – Moyenne des notes de « Plaisir » par condition, violon et groupe (erreurs standard de la moyenne)

Le violon qui donne(ra)it en moyenne le plus de plaisir au jeu n'est pas le même selon le groupe considéré. Le violon V2 (en gris) a donné le plus de plaisir au groupe noVibAtt. Les

3. La répartition des notes accordées aux trois autres critères en fonction du groupe de sujet est représentée en Annexe F

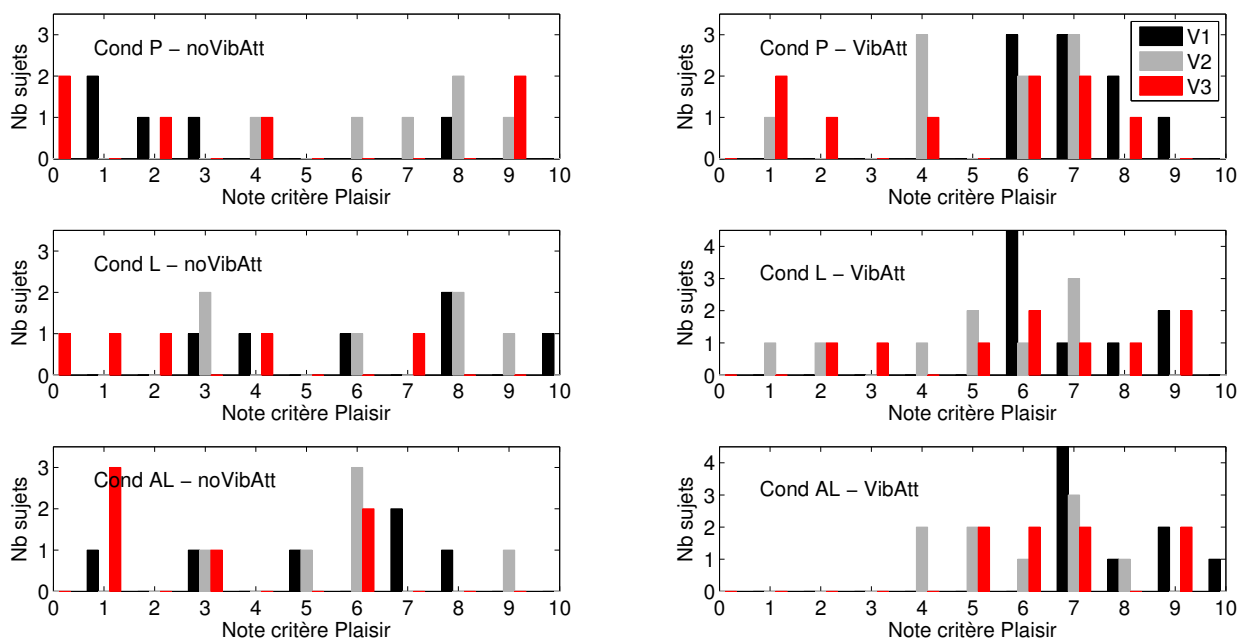


FIGURE 6.4 – Répartition des notes de « Plaisir » - colonne de gauche, groupe VibAtt ; colonne de droite groupe, noVibAtt

notes de plaisir ne descendent pas en dessous de 3/10 (Cond L et AL) et sont plutôt concentrées autour de [6-8] au cours des trois conditions, ce qui n'est pas le cas des autres violons, dont le violon V2 se différencie. En effet, dans ce groupe, la différence des moyennes des notes de « Plaisir » V2-V1 (moyenné sur les trois conditions) est égale à 1.56, 95% CI [-0.83 ; 3.94],  $t(5) = 1.68$ ,  $p = 0.08$  (unilatéral). La différence V2-V3 est égale à 2.74, 95% CI [-0.10 ; 6.59],  $t(5) = 1.84$ ,  $p = 0.06$  (unilatéral). La probabilité d'une différence positive entre les notes moyennes du violon V2 et des violons V1 et V3 respectivement est supérieure ou égale à 92%. Le violon V1 (en noir) a donné le plus de plaisir au groupe VibAtt, au cours des trois conditions. Les neuf notes de « Plaisir » sont en effet toutes au-dessus de la moyenne (6/10) dans les trois conditions. Dans ce groupe, la différence des moyennes des notes de « Plaisir » V1-V2 (moyenné sur les trois conditions) est égale à 1.9, 95% CI [0.45 ; 3.30],  $t(8) = 3.10$ ,  $p = 0.01$  (unilatéral). La différence V1-V3 est égale à 1.26, 95% CI [0.02 ; 2.5],  $t(8) = 2.34$ ,  $p = 0.02$  (unilatéral). Dans les deux cas, la probabilité d'une différence positive entre les notes moyennes du violon V1 et des violons V2 et V3 respectivement est donc supérieure ou égale à 98% ; elle est un peu plus forte que pour le groupe noVibAtt. Il est intéressant de constater que la séparation des participants en deux groupes de sujets fait donc apparaître une tendance d'accord entre les violonistes d'un même groupe en ce qui concerne leur préférence<sup>4</sup>.

4. On note par ailleurs que le niveau de corrélation d'un critère directement lié aux attributs du violon (« Son Riche », « Fort et Puissant », « Vivant et Réactif ») avec le « Plaisir » ne peut pas être généralisé sur l'ensemble des trois violons. Le lecteur peut se référer à l'Annexe F pour une description complète de corrélation entre les critères de cette étude.

On remarque également que contrairement au groupe noVibAtt, la même tendance s’observe pour les trois violons au sein du groupe VibAtt. Les notes de « Plaisir » des trois violons sont en effet meilleures en condition d’écoute augmentée qu’en condition d’écoute seule dans cette tâche de jugement en absolus.

### 6.3 Caractérisation des violons

Les trois violons utilisés dans l’étude ont été sélectionnés parmi 12 violons pour le ressenti vibratoire très différent qu’ils procurent. De la même façon qu’au Chapitre 4 précédent, il est donc intéressant d’étudier si les mesures vibratoires effectuées sur les instruments de l’étude présentent des indices de distinction permettant d’expliquer les différences de plaisir observées entre les deux groupes.

#### 6.3.1 Violons de l’étude

	V1	V2	V3
Luthier	Anne Lefoll	arlequin ?	Jean Bauer
Origine	français	autrichien	français
Année fabrication	1999	1690	1966
Cordes	Thomastik Dominant (acier)	Pirastro Eudoxa (boyau filé)	Thomastik Dominant (acier)
Prix (euros)	10000	20000	12000
Note moyenne "Plaisir" <sup>5</sup>	6.34	5.82	5.11

TABLE 6.6 – Violons de l’étude

Lors de la phase de présélection, le violon V1 était perçu comme très vibrant au niveau de la main gauche, par FM et IW, sur toute la tessiture du violon ; le violon V2 était jugé peu vibrant, mais homogène sur toute sa tessiture ; le violon V3 jugé pas du tout vibrant, donnant une sensation d’instrument « inerte ». Il est important de noter ici que cette distinction entre les violons s’est en grande partie concentrée sur les sensations lors du jeu des cordes à vide.

#### 6.3.2 Etude de l’interaction groupe × violon

On peut se demander si l’effet du violon dépend du groupe considéré. On considère ici seulement la partie de l’expérience « jugements en absolu » car elle a été montrée être la plus discriminante entre les deux groupes.

L’effet observé de l’interaction (groupe VibAtt–noVibAtt) × violon est, par critère : « Son Riche », 1.43 ; « Fort et Puissant », 1.46 ; « Vivant et Réactif », 1.50 ; « Plaisir », 2.79. Une analyse de variance par mesures répétées sur les notes montre un effet significatif de l’interaction pour le critère « Plaisir » uniquement ( $F(2,26) = 5.62, p = 0.01$ ) ; (« Son Riche »,  $F(2,26) = 1.68, p$

5. note moyenne sur l’ensemble des conditions (P, L, AL)



= 0.21 ; « Fort et Puissant »,  $F(2,26) = 1.25$ ,  $p = 0.30$  ; « Vivant et Réactif »  $F(2,26) = 3.32$ ,  $p = 0.05$ ). Ces résultats indiquent que l'on ne peut pas exclure que les trois critères liés aux attributs physiques des violons aient en moyenne les mêmes notes au sein des deux groupes (i.e. effet violon est le même sur les deux groupes) ; en revanche, les deux groupes se démarquent par le plaisir qu'ils ont eu avec chacun des violons.

### 6.3.3 Mesures vibratoires sur les violons de l'étude

Deux types de mesure ont été réalisées sur les instruments de l'étude : admittances au chevalet et fonctions de transfert chevalet/manche. Le même type de procédure expérimentale que celui décrit au Chapitre 2 basé sur une excitation impulsionnelle est ici suivi. Aucune plaque de fixation n'est cependant utilisée pour maintenir les instruments fixes. Ils reposent simplement sur une table, en appui sur une barre (épaulière, modèle Kun) classiquement montée sur l'instrument au niveau du bas de la caisse et en appui sur un morceau de mousse placé sous le manche au niveau de la première position. On voit ici tout l'intérêt de ce dispositif de mesure, puisque outre sa relative simplicité, il nous permet de nous affranchir des effets de serrage au niveau de la mentonnière mis en évidence sur les mesures présentées au Chapitre 4.

La figure 6.5 présente les mesures d'admittance au chevalet pour les trois violons de l'étude.

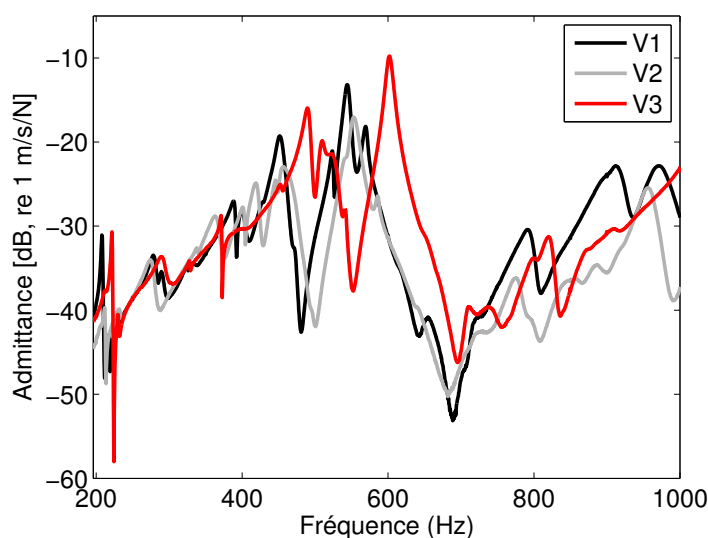


FIGURE 6.5 – Courbes d'admittance au chevalet

En complément de la figure 6.5, le tableau 6.7 suivant répertorie les principaux modes propres des violons compris dans l'intervalle [0 - 1000] Hz, tels qu'ils ont été identifiés sur les courbes d'admittance.

Les courbes d'admittance au chevalet des violons V1 et V2 présentent la même allure dans la zone de fréquence sélectionnée [0 - 1000] Hz, en termes de niveau et de fréquence des modes. Le violon V1 présente un dédoublement clair du mode CBR, des perturbations autour de 427, et

	A0	A1	CBR	B1-	B1+
V1	278	472	388 & 399	452	544
V2	275	-	417	457	553
V3	290	-	491	509 & 525	602

TABLE 6.7 – Fréquences des cinq « modes signature »

B1+ présente 2 pics additionnels, probablement dus à des phénomènes de couplage. La courbe du violon V2 ne permet de pas d’observer le mode A1. Des pics résiduels de faible amplitude sont observés autour ses modes B1- et CBR.

Le violon V3 présente une courbe d’admittance très différente de celles classiquement obtenues sur les violons : ses modes sont décalés en fréquence (vers les fréquences plus hautes) et ils semblent plus hauts en termes de niveau. Le mode B1+ est en particulier extrêmement haut (602 Hz). Ce violon se démarque donc très clairement des deux autres.

La figure 6.6 présente les niveaux de déplacement au manche des violons.

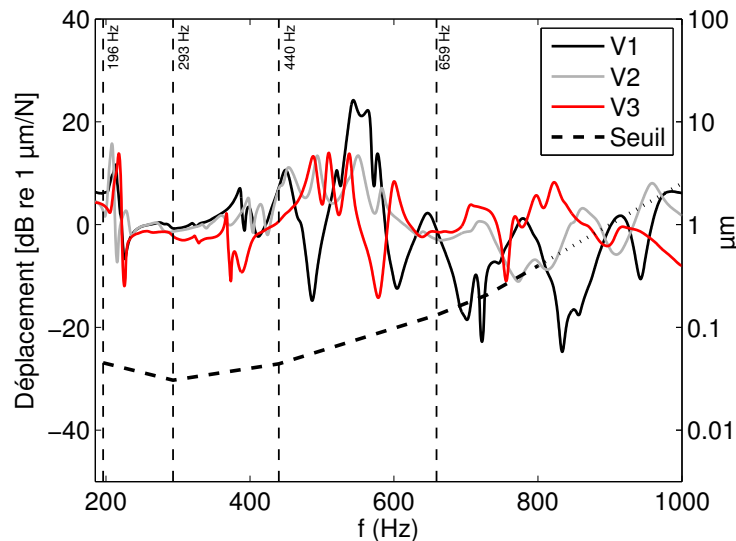


FIGURE 6.6 – Niveaux de vibration sur le côté du manche. La courbe de seuil de sensibilité mesurée sur la main gauche des violonistes est reportée en pointillés. Les quatre lignes verticales en pointillées sont des repères pour les fréquences de cordes à vide

Le violon V2 présente la courbe la plus régulière par rapport à la courbe de seuil. Le violon V3 présente une courbe assez régulière or c’est celui qui, lors de la phase de présélection, était perçu comme à peine vibrant au niveau de la main gauche, par FM et IW. La courbe du violon V1 en revanche présente beaucoup d’irrégularités (pics et trous) mais ne coupe pas non plus radicalement autour de 600 Hz.

L’allure de ces courbes ne nous permet pas de retrouver simplement les ressentis de la phase

	V1	V2	V3
196 Hz (corde de Sol)	6.2	2.5	3.8
293 Hz (corde de Ré)	-0.7	-1.3	-2.2
440 Hz (corde de La)	7.2	7.0	0.6
659 Hz (corde de Mi)	-1.0	-2.9	-1.4

TABLE 6.8 – Niveaux de vibrations aux fréquences des cordes à vides (valeurs en dB, re 1  $\mu\text{m}/\text{N}$ )

de présélection. Cependant, la présélection des instruments (et leur distinction) s'étant en grande partie concentrée sur le ressenti vibratoire des cordes à vides, il est intéressant de comparer les trois violons sur leur niveau vibratoire aux fréquences des cordes à vide. Les valeurs obtenues sur les différents violons de l'étude sont reportés au tableau 6.8.

Avec cette comparaison (voir tableau 6.8), on retrouve bien les violons dans l'ordre  $V1 > V2 > V3$ . Les écarts les plus importants entre les violons en termes de niveaux de vibration se trouvent aux fréquences des cordes de Sol et de La (pour lesquelles le niveau du violon V1 est nettement supérieur à celui des deux autres).

La comparaison des courbes vibratoires (admittances et niveaux de vibration aux manches) ne permet pas de conclure simplement sur l'origine des différences de plaisir ressenti par les violonistes.

### 6.3.4 Violon préféré vs. violon personnel

La figure 6.7 représente le violon préféré des sujets en Cond P en fonction de l'origine (lieu de fabrication) et de l'âge (siècle de fabrication) de leur violon personnel, ces données nous renseignent sur l'école de lutherie ayant donné naissance au violon. Le terme "contemporain" est utilisé en lieu et place de l'origine de tous les violons facturés après 1970, c'est-à-dire quand il n'existe plus d'école de lutherie.

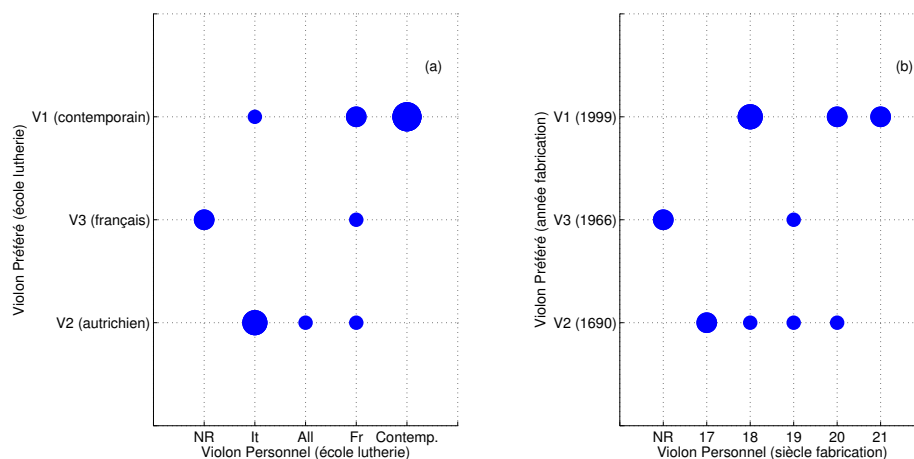


FIGURE 6.7 – Violon préféré vs. caractéristiques du violon personnel : (a) lieu de fabrication (b) siècle de fabrication. La surface du disque est proportionnelle au nombre de sujets. “NR” signifie que l’information n’a pas été renseignée par le participant ; “contemporain” signifie que pour tous les violons facturés après 1970, où il n’y a plus d’école de lutherie, nous considérons que le lieu de fabrication importe peu

La possession d’un violon contemporain semble privilégier le goût pour les violons contemporains (figure 6.7 (a)). Par ailleurs, il semble que les violonistes possédant un violon moderne (21ème siècle) aient préféré le violon V1, soit le plus récent des trois, alors que les violonistes possédant un violon ancien (17ème) aient préféré le violon V2, soit le plus ancien des trois, datant lui-même du 17ème siècle (figure 6.7 (b)). Malheureusement nous disposions d’un trop petit nombre de sujets pour développer davantage sur ces points.

## 6.4 Discussion et conclusion

Parmi les 15 violonistes participant à l’expérience, deux groupes de sujets ont été identifiés grâce aux réponses à la question « Faites-vous attention aux vibrations de l’instrument quand vous jouez/évaluez un violon ? ». Dans ce chapitre, l’analyse des résultats de l’expérience a été conduite par groupe séparé. La démarcation entre les deux groupes s’est avérée dépendre de la tâche d’évaluation.

La différence entre les deux groupes s’observe dans la tâche dédiée aux jugements en absolu (figure 6.2) : les violonistes VibAtt augmentant les notes des critères en Cond AL par rapport à la Cond L, alors que le contraire s’observe en moyenne pour le groupe noVibAtt. Cette démarcation entre les deux groupes apparaît clairement sur le critère du « Plaisir » et « Son Riche » dans les analyses. Cette étude complète donc les résultats présentés au Chapitre 5 (tableau 5.2) : on met ici en évidence que ce sont les violonistes du groupe noVibAtt qui ont en majorité contribué à rendre l’effet du retour vibrotactile non significatif sur trois critères dans la tâche de jugements absolus. Ces résultats montrent ainsi une grande cohérence entre ce qu’ont affirmé les violonistes (en réponse au questionnaire) et leur évaluation en cours d’expérience (notations des critères).

Mais la distinction entre les deux groupes de sujets est nettement plus floue lors d'une tâche d'évaluation comparative, où l'augmentation du niveau de vibration a le même effet pour les deux types d'auditeurs sur les deux critères a priori liés au son et sur le critère « Plaisir ». Ceci explique pourquoi l'effet observé dans cette tâche de comparaison par paire était très net et significatif dans le Chapitre 5, prenant en compte l'ensemble des participants de l'étude. Finalement, dans ce type de tâche, les notes données par les deux types d'auditeurs témoignent d'une intégration bimodale.

La différence entre les résultats des deux types de tâches provient probablement de la différence qui leur est inhérente. Les jugements en absolu et les jugements comparatifs ne sont probablement pas issus des mêmes processus psychologiques de décision. Ce phénomène est déjà illustré dans le Chapitre 3 par le fait que les notes de préférence qui sont basées sur des comparaisons n'étaient pas corrélées aux notes de qualité globale, qui, elles, reposent sur des jugements absolus. En outre, dans la tâche de comparaison par paires, l'unique variable était l'intensité des vibrations, l'accent était mis sur l'influence de l'intensité des vibrations car ces dernières étaient le seul paramètre variable dans une même paire, alors que dans la tâche des jugements en absolus, non seulement la vibration pouvait ou non être présente (i.e. ce n'est pas le degré d'intensité de la vibration qui importait), mais de plus l'ordre de présentation des violons était aléatoire (i.e. un même violon n'était pas forcément présenté consécutivement avec et sans retour vibratoire). Il est également important de rappeler que la comparaison par paires était la dernière tâche de l'expérience, ce qui fait qu'on ne peut pas écarter l'hypothèse d'un effet d'habituation au retour vibrotactile dans le manche isolé, chez les deux types de sujets.

En ce qui concerne le « Plaisir » des violonistes, l'analyse par groupe séparés a permis d'approfondir notre compréhension de la variabilité des jugements de préférence d'un instrumentiste à l'autre. Nous avons en effet supposé ici que le violon qui a obtenu, en condition de jeu, la note la plus élevée sur le critère « Plaisir » correspondait au violon préféré des sujets. Un début d'accord entre les violonistes au sein de chaque groupe sur le violon donnant le plus de plaisir est observé : les notes de « Plaisir » dans le groupe VibAtt montrent une plus grande préférence pour le violon V1 alors que celles du groupe noVibAtt tendent à indiquer une préférence pour le violon V2. Si la comparaison des courbes vibratoires des trois violons ne permet pas de conclure simplement sur l'origine des différences de plaisir procuré par chacun d'entre eux, on remarque que les appréciations apportées par le violoniste qui a procédé à la présélection des instruments permettent déjà d'entrevoir les tendances de jugements de plaisir pour les deux groupes. Il n'est alors pas surprenant que les violonistes VibAtt aient en moyenne préféré le violon V1 jugé le plus vibrant dans la main gauche lors de la phase de présélection, et que le violon V2, jugé très légèrement vibrant (mais de manière homogène sur toute la tessiture du violon) ait été préféré par les violonistes noVibAtt. Quant au violon V3, initialement jugé inerte, il a effectivement été peu apprécié par les participants de l'expérience.

Remarquons pour finir que cette étude est la première à parvenir à identifier des groupes de sujets sur un critère spécifique — l'attention aux vibrations — donnant des pistes assez fiables pour expliquer la préférence instrumentale.



## Cinquième partie

# Conclusions et perspectives





## Conclusion générale

S'il est une évidence qu'il existe une interaction autre qu'auditive entre le violoniste et son instrument, cette question n'a jamais été réellement prise en compte dans les études portant sur les critères de la qualité d'un violon. De ce fait aucune étude spécifique sur ce sujet n'a été menée jusqu'ici, aussi le présent travail constitue-t-il un premier jalon dans cette perspective. Les expériences présentées au cours de cette thèse concernent plusieurs aspects de la perception vibrotactile des violonistes — en particulier par la main gauche — en contexte d'évaluation du violon. Dans la mesure où les phénomènes mis en évidence sont étudiés pour la première fois, l'approche adoptée est essentiellement expérimentale et descriptive. Nous espérons que les résultats présentés permettront d'ouvrir le champ à de nouvelles recherches.

Même si les musiciens disent ressentir globalement les vibrations de leur instrument, il est intéressant de le vérifier empiriquement. Les seuils de sensibilité de la main gauche des violonistes ont été mesurés selon une procédure classique de psychophysique. L'originalité des mesures réside dans le dispositif expérimental utilisé : ces mesures ont en effet été réalisées sur des violonistes tenant un vrai manche de violon, mis en vibration par un vibreur, ce qui augmente la validité écologique de la situation expérimentale. Les résultats montrent que la sensibilité s'étend sur une plage de fréquences incluse dans le registre du violon, avec une sensibilité maximale aux vibrations autour de 300Hz. Les niveaux de vibrations des manches de violons ont été obtenus à partir des fonctions de transfert mesurées entre le chevalet et le manche et traduisent les niveaux de vibration existant sur tout le registre du violon. Les résultats des différentes campagnes de mesures effectuées au cours de cette thèse montrent que les niveaux de vibration des manches des violons sont supérieurs aux seuils de sensibilité mesurés (au moins jusqu'à 600 Hz). Ils attestent donc l'existence d'un retour vibrotactile dans le manche des violons, perceptible par la main gauche des violonistes.

Les résultats de la Partie 2 indiquent de plus que la position de la courbe de vibration par rapport aux seuils sur l'intervalle de sensibilité de la peau ([0 - 1000] Hz) pourrait être une illustration du retour vibrotactile existant dans le manche lors du jeu du violon. Il est en effet apparu que le jugement d'un violoniste professionnel sur le caractère vibrant des violons de l'étude — il s'agissait un ressenti global, et non d'un ressenti exclusivement focalisé sur les sensations de la main gauche — est en accord avec le comportement vibratoire mesuré au manche, relativement au seuil, en particulier dans la région [600 - 700] Hz. Ces résultats préliminaires permettent donc d'envisager le retour vibratoire comme « signature » perceptive des violons. Mais la confrontation des courbes de vibration aux manches avec la courbe de seuil de sensibilité vibrotactile n'est apparue discriminante que pour les violons utilisés dans la campagne de mesure de la Partie 2. Dans les deux autres parties (Parties 3 et 4), ni l'allure des courbes de vibrations aux manches, ni la position de ces courbes par rapport à la courbe de seuil de sensibilité n'a permis de distinguer les violons de l'étude.

En outre, bien que toutes les mesures d'admittance réalisées au chevalet (Parties 2, 3 et 4) révèlent une chute des niveaux autour de 600 Hz, due à l'absence de modes dans la région [600 – 700] Hz, ce « trou » ne se retrouve que sur la courbe de niveaux de vibration aux manches d'un petit nombre de violons. Cette constatation, issue de la simple comparaison des deux types de mesures (admittances et niveaux de vibration au manche), mériterait sans doute d'être approfondie. Une étude approfondie du couplage mécanique manche/corps permettrait peut-être d'apporter de nouveaux éléments à cette discussion.

Les expériences perceptives reportées aux Parties 3 et 4 ont permis de mettre en évidence le rôle de l'information tactile en contexte d'évaluation de violon. Ces expériences ont reposé sur des jugements analytiques (évaluation de critères perceptifs liés aux caractéristiques de jeu et propriétés sonores du violon), et des jugements de préférence (classement de préférence dans la Partie 3 et notation du « Plaisir » dans la Partie 4).

Malgré le fait que le retour auditif soit apparu globalement plus important que le retour vibrotactile dans les tâches d'évaluation de critères, son importance par rapport au retour vibratoire dépend du violoniste (Partie 3). Il apparaît qu'il existe des violonistes pour lesquels le masquage du retour vibratoire est plus perturbant que la perte auditive. On ne peut bien sûr pas exclure que le dispositif expérimental (e.g. port des bagues ou du casque anti-bruit) ait pu distraire l'attention du sujet, l'éloignant des conditions naturelles de jeu et d'évaluation. Pourtant, malgré cette éventuelle perturbation, la somme pondérée des critères d'évaluation (intensités et importances) prédit très bien la note de qualité globale dans toutes les conditions expérimentales testées ; cette grande cohérence dans les réponses des violonistes, en particulier dans la condition « audition masquée », suffit à démontrer que les indices tactiles sont importants lors du jeu et de l'évaluation des attributs perceptifs du violon. Il paraît en effet quasiment impossible que les sujets aient réussi, en un temps très bref, à baser leur évaluation sur des indices non-auditifs (que l'on suppose tactiles) si ces derniers ne leur étaient pas des repères habituels. L'importance des indices tactiles apparaît clairement dans les réponses à la question de pertinence concernant les critères « Responsiveness » et « Ease of Playing » mais elle a également été mise en évidence, à différents degrés, pour tous les autres critères (Partie 3). En particulier, le niveau de vibration dans le manche (Partie 4) a une influence sur la notation des critères perceptifs *a priori* basés sur des indices purement sonores (« Fort et Puissant » et « Son Riche »). En effet, un même violon est mieux noté lorsque la vibration perceptible dans le manche est plus forte. Cette expérience révèle ainsi la multimodalité de la perception des violonistes lors d'un jugement analytique, dans laquelle les informations tactiles tiennent bien sûr une place importante. Nous avons choisi de nous intéresser en priorité à l'influence d'indices vibrotactiles sur la perception et l'évaluation d'attributs sonores des violons, pour illustrer le rôle des indices tactiles. Il serait néanmoins tout aussi pertinent d'étudier à l'inverse l'influence de l'information auditive sur la perception tactile des violonistes ; étude qui se baserait cette fois sur la manipulation de stimuli auditifs pour moduler la perception tactile.

Dans les jugements de préférence, les informations tactiles jouent également un rôle non négligeable : la séparation du panel en deux groupes de sujets différenciés par l'attention qu'ils

disent accorder aux vibrations (critère tactile) a permis de faire apparaître une concordance de préférence au sein de chaque groupe (Partie 4). Il serait cependant enrichissant de confirmer la pertinence de ce critère par d'autres expériences perceptives sur les évaluations de qualité du violon. Par ailleurs, la préférence pour un violon n'est généralement pas corrélée au jugement de qualité globale (i.e. jugement des violonistes rendu le plus objectif possible sur la qualité d'un violon) (Partie 3). Un violon ayant reçu la meilleure note de qualité globale de la part d'un violoniste peut ne pas être son violon préféré. De manière surprenante, alors que les notes de qualité globale étaient très bien décrites par la somme pondérée des critères d'évaluation choisis, aucune combinaison de ces mêmes critères n'a permis d'expliquer les notes de préférence. Néanmoins, l'analyse des notes attribuées aux violons VD et VE (Partie 3) suggère que l'ergonomie d'un violon est un des critères perceptifs régissant la préférence. La contribution d'indices purement tactiles à l'évaluation des violons pourrait, cette fois encore, être mise en avant.

De la même façon que nos résultats font apparaître des différences inter-individuelles très nettes sur l'appréciation des violons par les violonistes (corroborant les résultats d'études précédentes), l'utilisation de la modalité tactile par rapport à la modalité auditive s'est, comme nous venons de le rappeler, également avérée dépendre du violoniste. Il est raisonnable de penser que le retour vibrotactile (impliqué dans l'évaluation de qualité d'un instrument) n'est pas une simple sensation mais provient en réalité d'un ensemble de processus cognitifs « de haut niveau ». Dans un contexte de jeu et d'évaluation, la sensation vibratoire se combine à de nombreuses autres dimensions influentes — e.g. mémoire, apprentissage — pour participer au jugement perceptif. On pourrait par exemple penser que les caractéristiques du violon possédé par un violoniste le poussent à rechercher (et donc à préférer) le violon le plus similaire au sien dans l'ensemble des instruments de l'étude, ou encore que le son d'un violon est préféré à un autre car il rappelle au violoniste qui le joue un enregistrement particulier d'un violoniste de renom etc.

Ainsi, une analyse plus fouillée concernant la pratique personnelle et la formation musicale des violonistes participant aux expériences constituerait une perspective intéressante pour comprendre l'origine des différences interindividuelles couramment observées dans le cadre de l'évaluation de qualité des instruments de musique.

Bien que toutes les expériences perceptives conduites dans cette thèse attestent l'existence d'un retour vibratoire qui est peut-être propre au violon joué, il reste très difficile d'expliquer les résultats des expériences perceptives par les mesures vibratoires. Si dans la Partie 2, les mesures physiques (mesures d'admittance au chevalet et de niveaux de vibration au manche) semblent corroborer le discours du violoniste sur son ressenti vibratoire global, dans les Parties 3 et 4, les mesures réalisées sur les violons des deux expériences perceptives sur la qualité des violons n'ont pas pu être mises en corrélation simple avec les jugements de préférence, ou les notations des critères. D'un point de vue purement descriptif, on remarque que la courbe de vibrations du violon VA (Partie 3) et du violon V3 (Partie 4) présentent des modes décalés vers les fréquences plus hautes. Ces deux violons ont également en commun d'avoir été en moyenne les moins appréciés dans chacune des expériences perceptives. Ces résultats font penser que les

violons dont les modes de vibration se situent à des fréquences élevées dans l'intervalle [196 - 1000] Hz plaisent moins. Ces résultats restent cependant trop préliminaires et nécessiteraient une campagne de mesures plus complète pour pouvoir être interprétés de façon convenable.

Cette thèse permet de mettre en évidence les limites des mesures classiquement réalisées sur les violons. On en trouvera une illustration dans le fait que des mesures vibratoires présentant très peu de différences - traduisant des différences subtiles d'action sur le chevalet - sont perçues comme modifiant profondément un même violon, au point de le voir considéré comme un autre instrument par des violonistes experts (Partie 3).

En ce qui concerne les admittances au chevalet, les mesures traduisent uniquement la capacité d'un violon à restituer globalement l'énergie qui lui est fournie en entrée (excitation de la corde) mais ne renseignent en rien sur les transferts d'énergie intermédiaires. Ni les comportements des sous-systèmes structurels constitutifs du violon (e.g. manche) ni leur couplage ne peuvent être observés simplement à partir de l'admittance qui caractérise le système global uniquement. Or il est probable que le « ressenti » du violoniste naisse du contact physique entre le musicien et ces sous structures, dont le comportement n'est pas totalement caractérisé. L'utilisation de techniques d'analyse modale expérimentale permettant une identification plus complète du comportement dynamique d'un violon (telles des mesures de déformées opérationnelles en fonctionnement — DOF ou ODS : Operational Deflection Shape — permettant de déterminer les déformées réelles du violon en situation de jeu) mériterait sans doute d'être plus généralisée en vue de comprendre les différences de jugements perceptifs observés.

Les fonctions de transfert chevalet/manche apportent, quant à elles, une information supplémentaire pour caractériser le couplage existant entre le corps du violon et le manche. Mais l'approche a également montré ses limites : dans l'expérience présentée à la Partie 4, le violon V3 présente la courbe de niveau de vibration la plus régulière au-dessus du seuil dans l'intervalle de sensibilité de la peau or c'est le violon qui était perçu comme à peine vibrant au niveau de la main gauche lors de la phase de présélection. La détermination d'un plus grand nombre de fonctions de transfert de ce type permettant d'évaluer plus précisément l'influence des différents sous-systèmes du violon, pourrait permettre d'obtenir des résultats plus éclairants pour expliquer les différences perceptives. Par exemple, lorsque la corde vibre, si la vibration du manche résulte en grande partie de la vibration du corps excité par la corde au niveau du chevalet, elle provient aussi, en quantité moindre, de la mise en vibration du sillet par l'autre extrémité de la corde vibrante. Une mesure d'admittance au sillet pourrait ainsi se révéler pertinente pour quantifier pleinement le retour vibratoire au manche.

Cette thèse se veut une contribution à la compréhension de la perception musicale non auditive. Rappelons que notre étude n'a porté que sur le violon. On peut se demander par exemple si le rôle du retour vibrotactile ne serait plus important encore pour des instruments à cordes ayant une caisse de résonance plus grande, une tessiture plus grave, et si les phénomènes d'interaction audio-tactile ne seraient pas plus forts. Une recherche étendue à d'autres instruments de la famille du violon (alto, violoncelle, contrebasse...) permettrait certainement d'enrichir nos connaissances sur le sujet.

# Bibliographie

- J. Alonso Moral and E.V. Jansson. Input admittance, eigenmodes, and quality of violins. *Report STL-QPSR*, pages 2–3, 1982.
- A. Askenfelt. Measurement of the bowing parameters in violin playing. ii : Bow–bridge distance, dynamic range, and limits of bow force. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 86 :503, 1989.
- A. Askenfelt and E. V. Jansson. On vibration sensation and finger touch in stringed instrument playing. *Music Perception*, pages 311–349, 1992.
- A. P. Baader, O. Kazennikov, and M. Wiesendanger. Coordination of bowing and fingering in violin playing. *Cognitive brain research*, 23(2) :436–443, 2005.
- L. J. Banton. The role of visual and auditory feedback during the sight-reading of music. *Psychology of music*, 23(1) :3–16, 1995.
- A. Benade. *Fundamentals of musical acoustics*. Number 527-554. New York : Oxford University Press, 1976.
- G. Bissinger. Ambiguity in a1-b1 delta criterion for violin tone and quality. *CAS Journal Series* 2, 3(1) :13–16, 1996.
- G. Bissinger. Contemporary generalized normal mode violin acoustics. *Acta Acustica united with Acustica*, 90(4) :590–599, 2004.
- G. Bissinger. Structural acoustics of good and bad violins. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124 :1764, 2008.
- G. Bissinger and A. Gregorian. Relating normal mode properties of violins to overall quality : Signature modes. *Catgut Acoust. Soc. J*, 4(8) :37–45, 2003.
- S. J. Bolanowski, G. A. Gescheider, R. Verrillo, and C. Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch. *The Journal of the Acoustical society of America*, 84 :1680, 1988.
- A.J. Bongers. Tactual display of sound properties in electronic musical instruments. *Displays*, 18(3) :129–133, 1998.
- G. Box and G. Tiao. Bayesian inference in statistical analysis. 1973. *Addison-Wesely publishing company*, 1993.
- C. Branje, M. Maksimouski, M. Karam, D. I. Fels, and F. Russo. Vibrotactile display of music on the human back. In *Advances in Computer-Human Interactions, 2010. ACHI'10. Third International Conference on*, pages 154–159. IEEE, 2010.

- G. Caetano and V. Jousmäki. Evidence of vibrotactile input to human auditory cortex. *Neuroimage*, 29(1) :15–28, 2006.
- G. A. Calvert, C. Spence, and B. E. Stein. *The handbook of multisensory processes*. MIT press, 2004.
- L. Cardinali, F. Frassinetti, C. Brozzoli, C. Urquizar, A. C. Roy, and A. Farnè. Tool-use induces morphological updating of the body schema. *Current Biology*, 19(12) :R478–R479, 2009.
- C. Chafe. Tactile audio feedback. In *Proceedings of the International Computer Music Conference*, pages 76–76. International Computer Music Association, 1993.
- C. S. Choe, R. B. Welch, R. M. Gilford, and J. F. Juola. The "ventriloquist effect" : Visual dominance or response bias? *Perception & Psychophysics*, 18(1) :55–60, 1975.
- J. C. Craig. Vibrotactile difference thresholds for intensity and the effect of a masking stimulus. *Perception & Psychophysics*, 15(1) :123–127, 1974.
- L. Cremer and J. S. Allen. *The physics of the violin*. MIT press Cambridge, MA, 1984.
- H. Dünwald. Deduction of objective quality parameters on old and new violins. *Catgut Acoust. Soc. J*, 1(7) :1–5, 1991.
- T. Elbert, C. Pantev, C. Wienbruch, B. Rockstroh, and E. Taub. Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, 270(5234) :305–307, 1995.
- S. A. Finney. Auditory feedback and musical keyboard performance. *Music Perception*, pages 153–174, 1997.
- J.-L. Florens. Expressive bowing on a virtual string instrument. In *Gesture-Based Communication in Human-Computer Interaction*, pages 487–496. Springer, 2004.
- E. Foulhe, G. Goli, A. Houssay, and G. Stoppani. Vibration modes of the cello tailpiece. *Archives of acoustics*, 36(4) :713–726, 2011.
- C. Fritz, J. Woodhouse, F. P.-H. Cheng, I. Cross, A. F. Blackwell, and B.C.J. Moore. Perceptual studies of violin body damping and vibrato. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127 :513, 2010.
- C. Fritz, A. F. Blackwell, I. Cross, J. Woodhouse, and B.C.J. Moore. Exploring violin sound quality : Investigating english timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 131 : 783, 2012a.
- C. Fritz, J. Curtin, J. Poitevineau, P. Morrel-Samuels, and F.-C. Tao. Player preferences among new and old violins. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(3) :760–763, 2012b.

- 
- R. Fulford, J. Ginsborg, and J. Goldbart. Functions and uses of auditory and visual feedback : Exploring the possible effects of a hearing impairment on music performance. In *Proceedings of the 12th ICMPC-ESCOM Conference*, 2012.
- A. Galembo. Perception of musical instrument by performer and listener (with application to the piano). In *Proceedings of the International workshop on Human Supervision and Control in Engineering and Music*, pages 21–24, 2001.
- C. Gaser and G. Schlaug. Brain structures differ between musicians and non-musicians. *The Journal of Neuroscience*, 23(27) :9240–9245, 2003.
- A. Gates and J. L. Bradshaw. Effects of auditory feedback on a musical performance task. *Perception & Psychophysics*, 16(1) :105–109, 1974.
- G. A. Gescheider. Resolving of successive clicks by the ears and skin. *Journal of Experimental Psychology*, 71(3) :378, 1966.
- G. A. Gescheider. Auditory and cutaneous temporal resolution of successive brief stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 75(4) :570, 1967a.
- G. A. Gescheider. Auditory and cutaneous temporal resolution of successive brief stimuli. *Journal of Experimental Psychology*, 75(4) :570, 1967b.
- G. A. Gescheider. *Psychophysics : the fundamentals*. Psychology Press, 1997.
- G. A. Gescheider, R. T. Verrillo, and D. G. Pelli. Effects of noise on detection of amplitude increments of sinusoidal vibration of the skin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 91 :348, 1992.
- M.H. Giard and F. Peronnet. Auditory-visual integration during multimodal object recognition in humans : a behavioral and electrophysiological study. *Journal of cognitive neuroscience*, 11 (5) :473–490, 1999.
- B. Gillespie. Haptics in manipulation, music, cognition, and computerized sound : an introduction to psychoacoustics, 1999.
- H. Gillmeister and M. Eimer. Tactile enhancement of auditory detection and perceived loudness. *Brain research*, 1160 :58–68, 2007.
- B. L. Giordano, F. Avanzini, M. M. Wanderley, S. Mcadams, et al. Multisensory integration in percussion performance. *10ème Congrès Français d’Acoustique*, 2010.
- W. Goebel and C. Palmer. Tactile feedback and timing accuracy in piano performance. *Experimental Brain Research*, 186(3) :471–479, 2008.
- S. C. Herholz and R. J. Zatorre. Musical training as a framework for brain plasticity : behavior, function, and structure. *Neuron*, 76(3) :486–502, 2012.

- C. Ho and C. Spence. *The multisensory driver : Implications for ergonomic car interface design*. Ashgate Publishing, 2012.
- J. M. Hollerbach. *Planning of arm movements*. The MIT Press, 1990.
- C. K. Hsee, G. F. Loewenstein, S. Blount, and M. H. Bazerman. Preference reversals between joint and separate evaluations of options : A review and theoretical analysis. *Psychological Bulletin*, 125(5) :576, 1999.
- J. Huang, D. Gamble, K. Sarnlertsophon, X. Wang, and S. Hsiao. Feeling music : Integration of auditory and tactile inputs in musical meter perception. *PloS one*, 7(10) :e48496, 2012.
- C. M. Hutchins. Effects of an air-body coupling on the tone and playing qualities of violins. *Journal of Catgut Acoustical Society*, 44 :12–15, 1985.
- C. M. Hutchins. A measurable controlling factor in the tone and playing qualities of violins. *Catgut Acoustical Society Journal*, 1(4) :10–19, 1989.
- C. M. Hutchins and V. Benade. *Research papers in violin acoustics, 1975-1993 : with an introductory essay, 350 years of violin research*. Acoustical society of America, 1997.
- E. V. Jansson. Acoustical properties of complex cavities. prediction and measurements of resonance properties of violin-shaped and guitar-shaped cavities. *Acta Acustica united with Acustica*, 37(4) :211–221, 1977.
- E. V. Jansson. Admittance measurements of 25 high quality violins. *Acta Acustica united with Acustica*, 83(2) :337–341, 1997.
- V. Jousmäki and R. Hari. Parchment-skin illusion : sound-biased touch. *Current Biology*, 8(6) : R190–R191, 1998.
- C. Kayser, C. Petkov, M. Augath, and N. Logothetis. Integration of touch and sound in auditory cortex. *Neuron*, 48(2) :373–384, 2005.
- M. Keane and G. Dodd. Subjective assessment of upright piano key vibrations. *Acta Acustica united with Acustica*, 97(4) :708–713, 2011.
- S. W. Keele. *Attention and human performance*. Goodyear Publishing Company Pacific Palisades, CA, 1973.
- H. Kinoshita and S. Obata. Left hand finger force in violin playing : Tempo, loudness, and finger differences. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126 :388, 2009.
- N. Kitagawa and C. Spence. Audiotactile multisensory interactions in human information processing. *Japanese Psychological Research*, 48(3) :158–173, 2006.
- P. Lamore, H. Muijser, and C. Keemink. Envelope detection of amplitude-modulated high-frequency sinusoidal signals by skin mechanoreceptors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 79 :1082, 1986.



- 
- K. S. Lashley. The problem of serial order in behavior. pages 112–135, 1951.
- B. Lecoutre and J. Poitevineau. Pac (programme d’analyse des comparaisons) : Guide d’utilisation et manuel de référence. *CISIA-CERESTA, Montreuil*, 1992.
- H. Levitt. Transformed up-down methods in psychoacoustics. *The Journal of the Acoustical society of America*, 49 :467, 1971.
- D. J. Lewkowicz and A. A. Ghazanfar. The emergence of multisensory systems through perceptual narrowing. *Trends in cognitive sciences*, 13(11) :470–478, 2009.
- B. Lütkenhöner, C. Lammertmann, C. Simoes, and R. Hari. Magnetoencephalographic correlates of audiotactile interaction. *Neuroimage*, 15(3) :509–522, 2002.
- S. Maeda and M.J. Griffin. A comparison of vibrotactile thresholds on the finger obtained with different equipment. *Ergonomics*, 37(8) :1391–1406, 1994.
- L. E. Marks. Magnitude estimation and sensory matching. *Perception & Psychophysics*, 43(6) : 511–525, 1988.
- L. E. Marks, R. Szczesiul, and P. Ohlott. On the cross-modal perception of intensity. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 12(4) :517, 1986.
- K. D. Marshall. Modal analysis of a violin. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 77 :695, 1985.
- K. D. Marshall. The musician and the vibrational behavior of the violin. *J. Catgut Acoust. Soc.*, 45 :28–33, 1986.
- D. E. Morrison and R. E. Henkel. *The significance test controversy : A reader*. Transaction Books, 1970.
- G. Musacchia, D. Strait, and N. Kraus. Relationships between behavior, brainstem and cortical encoding of seen and heard speech in musicians and non-musicians. *Hearing research*, 241(1) : 34–42, 2008.
- C. Nichols. The vbow : A virtual violin bow controller for mapping gesture to synthesis with haptic feedback. *Organised Sound*, 7(02) :215–220, 2002.
- R. Okazaki, H. Kajimoto, and V. Hayward. Vibrotactile stimulation can affect auditory loudness : a pilot study. In *Haptics : Perception, Devices, Mobility, and Communication*, pages 103–108. Springer, 2012.
- S. O’Modhrain. *Incorporating Haptic Feedback into Computer-Based Musical Instruments*. PhD thesis, Ph. D. diss., Stanford University. Available at <http://ccrma-www.stanford.edu/~sile/thesis.html>, 2000.

- C. Pantev, C. Lappe, S. Herholz, and L. Trainor. Auditory-somatosensory integration and cortical plasticity in musical training. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169(1) : 143–150, 2009.
- P. Q. Pfordresher. Coordination of perception and action in music performance. *Advances in Cognitive Psychology*, 2(2-3) :183–198, 2006.
- B. H. Repp. Effects of auditory feedback deprivation on expressive piano performance. *Music Perception*, pages 409–438, 1999.
- T. Ro, J. Hsu, N. Yasar, L. Elmore, and M. Beauchamp. Sound enhances touch perception. *Experimental brain research*, 195(1) :135–143, 2009.
- H. Rouanet, J.-M. Bernard, M.-C. Bert, B. Lecoutre, M.-P. Lecoutre, and B. Le Roux. *New ways in statistical methodology*. Lang, 1998.
- C. Saitas, C. Fritz, B. Giordano, G. Scavone, et al. Bridge admittance measurements of 10 preference-rated violins. *Acoustics 2012 Nantes*, 2012.
- C. Saitis, B. L Giordano, C. Fritz, and G. Scavone. Perceptual evaluation of violins : A quantitative analysis of preference judgments by experienced players. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 132(6) :4002–4012, 2012.
- H. M. Saldaña and L. D. Rosenblum. Visual influences on auditory pluck and bow judgments. *Perception & Psychophysics*, 54(3) :406–416, 1993.
- H. F. Schliesser and R. O. Coleman. Effectiveness of certain procedures for alteration of auditory and oral tactile sensation for speech. *Perceptual and Motor Skills*, 26(1) :275–281, 1968.
- M. Schürmann, G. Caetano, V. Jousmäki, and R. Hari. Hands help hearing : facilitatory audiotactile interaction at low sound-intensity levels. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 115 :830, 2004.
- C. E. Sherrick and R. W. Cholewiak. Cutaneous sensitivity. *Handbook of perception and human performance*, 1 :1–12, 1986.
- S. Sinclair, M. M. Wanderley, V. Hayward, and G. Scavone. Noise-free haptic interaction with a bowed-string acoustic model. In *World Haptics Conference (WHC), 2011 IEEE*, pages 463–468. IEEE, 2011.
- S. Soto-Faraco and G. Deco. Multisensory contributions to the perception of vibrotactile events. *Behavioural brain research*, 196(2) :145–154, 2009.
- B. Stark, T. Carlstedt, R.G. Hallin, and M. Risling. Distribution of human pacinian corpuscles in the hand : a cadaver study. *The Journal of Hand Surgery : British & European Volume*, 23(3) :370–372, 1998.
- B. E. Stein and M. A. Meredith. *The merging of the senses*. The MIT Press, 1993.

- R. T. Verrillo. Investigation of some parameters of the cutaneous threshold for vibration. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34 :1768, 1962.
- R. T. Verrillo. Effect of contactor area on the vibrotactile threshold. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35 :1962, 1963.
- R. T. Verrillo. Vibrotactile thresholds measured at the finger. *Perception & Psychophysics*, 9 (4) :329–330, 1971.
- R. T. Verrillo and G. A. Gescheider. Perception via the sense of touch. *Tactile aids for the hearing impaired*, pages 1–36, 1992.
- G. Von Békésy. Similarities between hearing and skin sensations. *Psychological Review*, 66(1) : 1, 1959.
- S. Weinstein. Intensive and extensive aspects of tactile sensitivity as a function of body part, sex and laterality. In *the First Int'l symp. on the Skin Senses, 1968*, 1968.
- J. M. Weisenberger. *Blackwell Handbook Of Sensation and Perception - Chapter Seventeen Cutaneous Perception*. 2001.
- L. Wilkinson. Task force on statistical inference, apa board of scientific affairs.(1999). *Statistical methods in psychology journals : Guidelines and explanations*. *American Psychologist*, 54 : 594–604, 1999.
- R. Willgoss and R. Walker. Discernment of the sound of a violin. In *Proceedings of the 8th World Scientific and Engineering Academy and Society International Conference on Acoustics and Music : Theory and Applications*, pages 1–6, 2007.
- I. Wollman, C. Fritz, J. Poitevineau, and S. Mcadams. Violin quality evaluation : examining the role of auditory and vibrotactile feedbacks. In *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference, SMAC*, pages 140–146, 2013.
- J. Woodhouse. The acoustics of "a0-b0 mode matching" in the violin. *Acta Acustica united with Acustica*, 84(5) :947–956, 1998.
- J. Woodhouse. Body vibration of the violin—what can a maker expect to control. *J. Catgut Acoust. Soc*, 4(5) :43–49, 2002.
- J. M. Yau, A. I. Weber, and S. J. Bensmaia. Separate mechanisms for audio-tactile pitch and loudness interactions. *Frontiers in psychology*, 1, 2010.
- M. Zampini and C. Spence. The role of auditory cues in modulating the perceived crispness and staleness of potato chips. *Journal of sensory studies*, 19(5) :347–363, 2004.
- M. Zampini, S. Guest, and C. Spence. The role of auditory cues in modulating the perception of electric toothbrushes. *Journal of dental research*, 82(11) :929–932, 2003.



## Sixième partie

# Annexes



# Traitements statistiques

---

Jusqu'à présent, l'approche statistique fréquentiste a été l'approche la plus couramment utilisée par les chercheurs dans l'inférence statistique. Mais les tests de significativité utilisés ont depuis longtemps été critiqués comme étant inappropriés pour une démarche scientifique (cf. par exemple le recueil publié par Morrison et Henkel, 1970 ; on trouvera une bibliographie détaillée sur le site de l'ERIS : . Les valeurs du  $p$  indiquent seulement la probabilité d'obtenir un résultat au moins aussi extrême que celui observé, sur la base d'une hypothèse formulée *a priori* (i.e. l'hypothèse nulle), mais ne renseignent en rien sur la taille de l'effet de facteurs expérimentaux sur la ou les variables mesurées.

Suivant les suggestions et recommandations de « Wilkinson and Task Force on Statistical Inference » 1999, nous avons dans cette thèse essayé de caractériser autant que possible les effets des facteurs expérimentaux (les tailles d'effets observés sont toujours données), et d'adopter, en compléments des tests de significativité usuels, des méthodes d'analyse statistique bayésiennes basées sur des distributions de probabilité non informatives. Une distribution de probabilité *a priori* non informative (au sens de Jeffreys, cf. Box and Tiao (1993), pp. 41-42.) traduit une ignorance concernant le paramètre examiné c'est-à-dire qu'aucune valeur particulière n'est au départ favorisée<sup>1</sup>. Cette distribution initiale, combinée à une distribution d'échantillonnage (la même que dans le test fréquentiste traditionnel, donc avec les mêmes conditions de validité) permet de déduire la distribution de probabilité finale sur les valeurs possibles du paramètre auquel on s'intéresse, conditionnellement aux données observées. Il est donc possible de calculer, au vu des observations, la probabilité qu'a le paramètre d'appartenir à n'importe quel intervalle qui semblera intéressant (par exemple un intervalle de crédibilité bayésien).

Les analyses statistiques ont été effectuées avec le logiciel de traitements statistiques LePAC (Lecoutre and Poitevineau, 1992). Dans le manuscrit, les analyses statistiques avec inférences sont généralement présentées dans l'ordre suivant :

- effet observé et erreur standard associée présentée entre parenthèses
- valeur de la statistique de test utilisée avec ses degrés de liberté entre parenthèses
- valeur du  $p$
- intervalle de crédibilité bayésien

Certains points sont développés ci-dessous.

---

1. le paramètre correspond à la valeur dans la population de la quantité à laquelle on s'intéresse ; dans cette thèse, il s'agit généralement d'une moyenne arithmétique, de la simple différence de deux moyennes, d'une moyenne quadratique ou, quelques fois d'une proportion

## A.1 Définition de l'effet

Dans le cas d'une comparaison de deux populations (i.e. deux ensembles de données, par exemple deux conditions expérimentales), l'effet dans la population — souvent appelé dans cette thèse « effet vrai » ou encore « vraie différence » — est défini comme la différence de leur moyennes ; le signe de l'effet dépend donc du sens dans lequel a été effectuée la différence. Au niveau des échantillons, il lui correspond un effet observé qui est donc tout naturellement la différence des moyennes observées.

Dans le cas d'une comparaison entre plusieurs populations, l'effet vrai est un vecteur dont la taille (module) est défini comme la moyenne quadratique (« Root Mean Square », en anglais) des différences des moyennes deux à deux (i.e. racine de la moyenne des carrés des différences des moyennes deux à deux). Cette quantité est donc toujours positive. Dans cette thèse, les effets vrais sont généralement notés «  $\epsilon$  » pour les comparaisons de deux éléments et pour les comparaisons de plus de deux éléments les tailles d'effet sont notées « **RMS** ». Les effets observés sont généralement notés «  $e$  » pour les comparaisons entre deux éléments et « RMS » sinon.

Pour chaque effet observé, on donne également son erreur type (« standard error of the mean », SEM en anglais) correspondant à l'écart type dans l'échantillon divisé par la racine carrée de l'effectif.

## A.2 Tests

Les deux expériences perceptives menées dans cette thèse (Parties 3 et 4) suivent un plan d'expérience similaire : les variables indépendantes (ou facteurs) sont les conditions expérimentales (e.g. condition normale/condition audition masquée/condition tactile masqué dans l'expérience de la Partie 3), les violons. Les variables dépendantes correspondent aux critères d'évaluation.

Les plans d'expériences sont des plans à mesures répétées (ex : dans la Partie 3, la condition expérimentale présente 3 modalités : normale, audition masquée, tactile masqué). Des analyses de variances (ANOVA) à mesures répétées ont donc été conduites sur les données recueillies.

Pour le cas où il y existe plus d'un degré de liberté sur la comparaison, les ajustements de Greenhouse-Geisser ou Huynh-Feldt concernant l'écart à la sphéricité sont utilisés. En général les corrections sont négligeables (et cela est précisé), sauf cas particulier.

Le test de Student de comparaison des moyennes de deux modalités est formellement équivalent à l'analyse de la variance (ANOVA) à un seul facteur présentant deux modalités (le carré d'un  $t$  à  $n$  degrés de liberté est un  $F$  à  $(1, n)$  degrés de liberté).

Selon les hypothèses formulées pour nos expériences, pour les cas à un degré de liberté, nous appliquons soit un test bilatéral (i.e. on ne se préoccupe pas du signe ou du sens de la différence), soit un test unilatéral (e.g. on a fait l'hypothèse qu'une estimation est supérieure - ou inférieure - à une autre).



### A.3 Corrélations

Les coefficients de corrélation de Pearson expriment la corrélation entre les valeurs prises par deux variables. Les coefficients de corrélation de Spearman exprime la corrélation entre les rangs des valeurs prises par les deux variables (e.g. dans l'expérience présentée à la Partie 3, les violons se voient assigner des rangs dans les classements de préférence). Les coefficients de corrélation sont principalement utilisés dans l'expérience présentée à la Partie 3. Ils sont utilisés comme indices descriptifs des réponses des violonistes. Ils sont calculés sur 5 points (correspondant aux 5 violons). Les violons ne sont pas un échantillon (ils n'ont pas été tirés au hasard dans une population de violons, mais ils ont été choisis pour leurs propriétés sonores et caractéristiques de jeu différentes). On ne cherche donc pas à faire d'inférences sur une population des violons dont les violons de l'expérience seraient issus mais sur la population des violonistes. Ainsi, tout ce qui est dit dans l'étude se rapporte aux violons sélectionnés.

Il serait aussi raisonnable que, pour un violoniste donné, les cinq points soient considérés comme un échantillon d'une population de ces *cinq mêmes* violons dans l'univers des « moments » : si l'on avait pu répéter l'expérience dans une même situation et en effaçant la mémoire du sujet, ses scores auraient pu varier plus ou moins en fonction du « moment » de la répétition de l'expérience. Dans ce cas-là, le coefficient de corrélation d'un violoniste ne serait qu'un coefficient de corrélation parmi un ensemble de possibles. Cela introduit simplement une source de variabilité supplémentaire, la variabilité intra sujet (en plus de la variabilité inter sujets), qui devient une des composantes de la variance des coefficients. Comme ici il n'y a qu'un coefficient par sujet, il n'est pas possible de faire la part entre les variabilités intra et inter mais cela ne change en rien à la possibilité d'étudier la variabilité globale et de faire des inférences concernant la population des sujets (on perd simplement de la précision par rapport au cas où la variance intra-sujets aurait pu être estimée).

### A.4 Enoncés bayésiens

Les probabilités bayésiennes sont ici notées  $Pr^*$ . Elles sont conditionnelles aux données, mais pour des raisons de simplicité, la notation conditionnelle est omise.

L'intervalle de confiance bayésien (dit aussi de crédibilité) à 95% permet de dire que, étant données nos mesures (et une distribution initiale, par exemple non-informative), il y a 95% de chance que la vraie différence  $\epsilon$  soit dans un intervalle  $[x1 ; x2]$ . Dans le cas particulier de variables numériques et pour des comparaisons à 1 degré de liberté (comme la comparaison de 2 moyennes), les valeurs des bornes de l'intervalle fréquentiste usuel (Neyman-Pearson) et de l'intervalle de crédibilité bayésien non informatif coïncident. Autrement dit, la seule différence est une différence d'interprétation : étant donné les bornes  $x1$  et  $x2$  calculées à partir de l'échantillon tiré,

- on affirme que la vraie valeur, considérée comme une constante, est comprise entre  $x1$  et  $x2$ , car on utilise une procédure qui fournit le bon encadrement la plupart des fois, 95% par exemple (interprétation fréquentiste). La probabilité (fréquentiste) que ce soit vrai pour ce cas particulier n'ayant pas de sens, ou plus exactement ne pouvant être que soit

0 soit 1.

- ou on considère que la vraie valeur peut être considérée comme une variable aléatoire (modélisant l'incertitude sur la vraie valeur) et on indique qu'au vu des données il y a 95% de chances qu'elle soit comprise entre  $x_1$  et  $x_2$  (interprétation bayésienne).

Dans cette thèse, s'ils ne coïncident pas, les intervalles de confiance à 95% fréquentistes sont notés « 95% CI », et les intervalles de crédibilité bayésiens sont notés «  $Pr^* [x_1 < \epsilon < x_2] = 0.95$  ».

De temps en temps, l'intervalle symétrique (autour de 0) est présenté. Cet intervalle permet de dire qu'étant données nos mesures (et une distribution initiale non-informative), il y a 95% de chance que la valeur absolue de la vraie différence  $\epsilon$  soit inférieure à une valeur  $x$ . Cette probabilité est notée  $Pr^* [|\epsilon| < x] = 0.95$ . Ceci est particulièrement intéressant pour montrer qu'un effet est sinon nul, du moins très faible : il suffit pour cela que  $x$  lui-même puisse être jugé très faible.

Pour des variables numériques et pour des comparaisons à 1 degré de liberté, il y a une correspondance directe entre le seuil  $p$  du test fréquentiste usuel (test de Student) et la probabilité bayésienne non informative sur le signe de l'effet vrai : si l'effet observé est positif,  $Pr^* [ \epsilon > 0 ] = 1 - p_{unilatéral}$  ; s'il est négatif,  $Pr^* [ \epsilon < 0 ] = 1 - p_{unilatéral}$

## Campagne de mesures de la Partie 2

Les courbes d'admittance au chevalet et de vibrations horizontales mesurées au manche des six autres violons de l'ensemble (en gris) – violons ne présentant aucune distinction vibratoire particulière pour le violoniste qui les a évalués – sont superposées à celles de quatre violons sélectionnés pour leur comportement « extrême » (en noir).

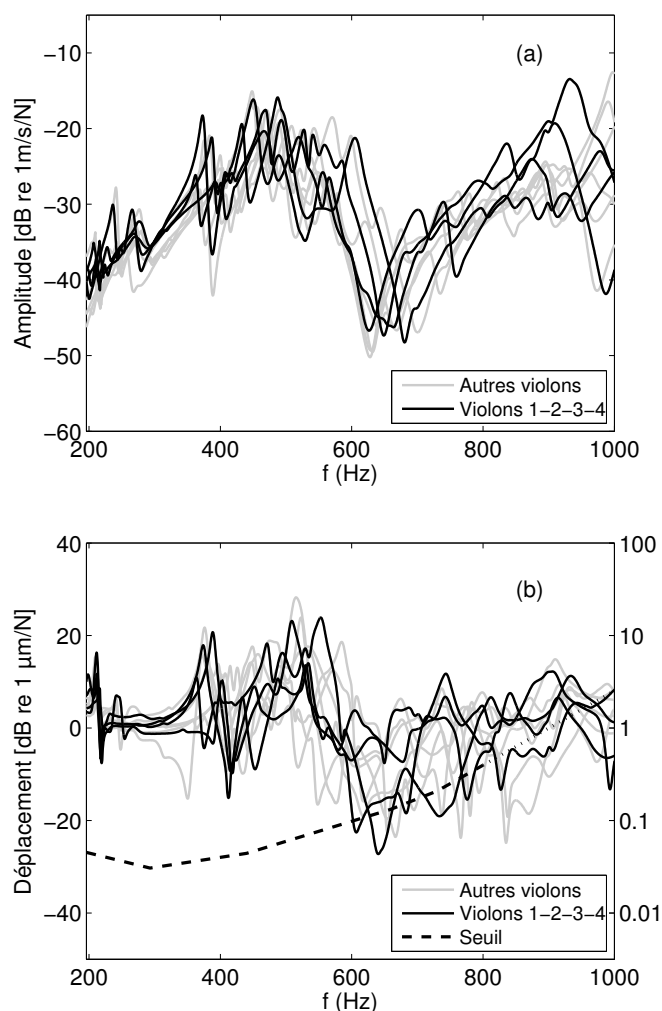


FIGURE B.1 – (a) Admittance au chevalet (b) Amplitudes horizontales de vibration des dix violons. Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés

La figure B.1 (a) montre que les courbes d'admittance de tous les violons de l'étude (4 violons au comportement vibratoire jugé extrêmes et les 6 autres) présentent globalement la même allure dans l'intervalle de fréquences choisi. La superposition des niveaux de vibration au manche des 10 violons de l'étude sur la figure B.1 (b) ne permet pas non plus de distinguer aisément les comportements vibratoires des violons.

# Campagne de mesures de la Partie 3

---

Les figures C.1 et C.2 présentent les courbes d'admittance au chevalet (en norme) superposées des violons VA, VB et VC utilisés dans l'expérience perceptive de la Partie 3 selon quatre configurations correspondant aux quatre couples possibles 'direction d'excitation/direction de mesure' (« HH », « HV », « VH », « VV »). Ces mesures sont présentées pour chacun des deux types de conditions aux limites imposées sur les violons (figure C.1 : condition encastree / « Plaque de fixation » ; figure C.2 : condition « Libre-Libre »). Les figures C.3 et C.4 présentent les fonctions de transfert chevalet/manche (en norme) de ces trois mêmes violons dans les quatre configurations et pour chacun des deux types de conditions aux limites.

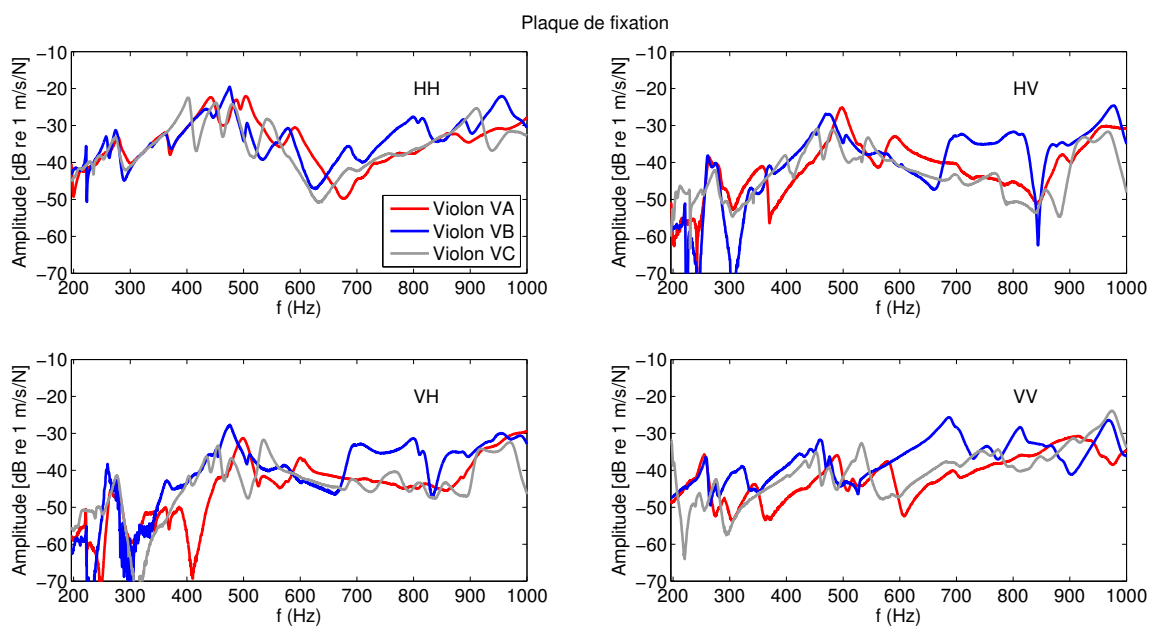


FIGURE C.1 – Admittances au chevalet pour les violons avec plaque de fixation

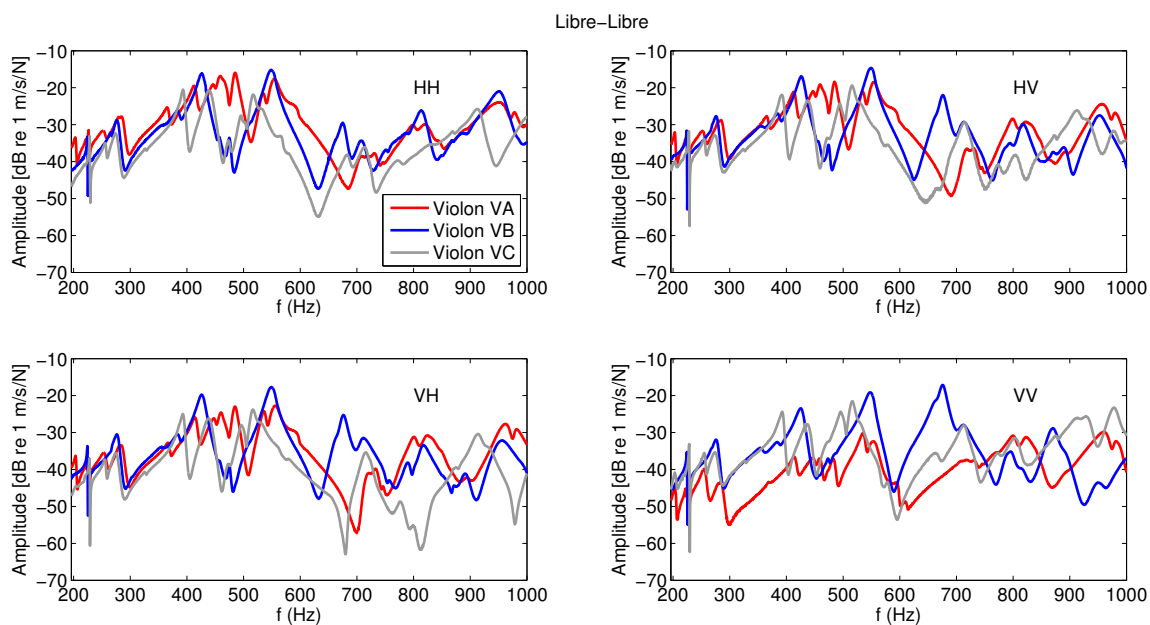


FIGURE C.2 – Admittances au chevalet pour les violons en condition libre-libre

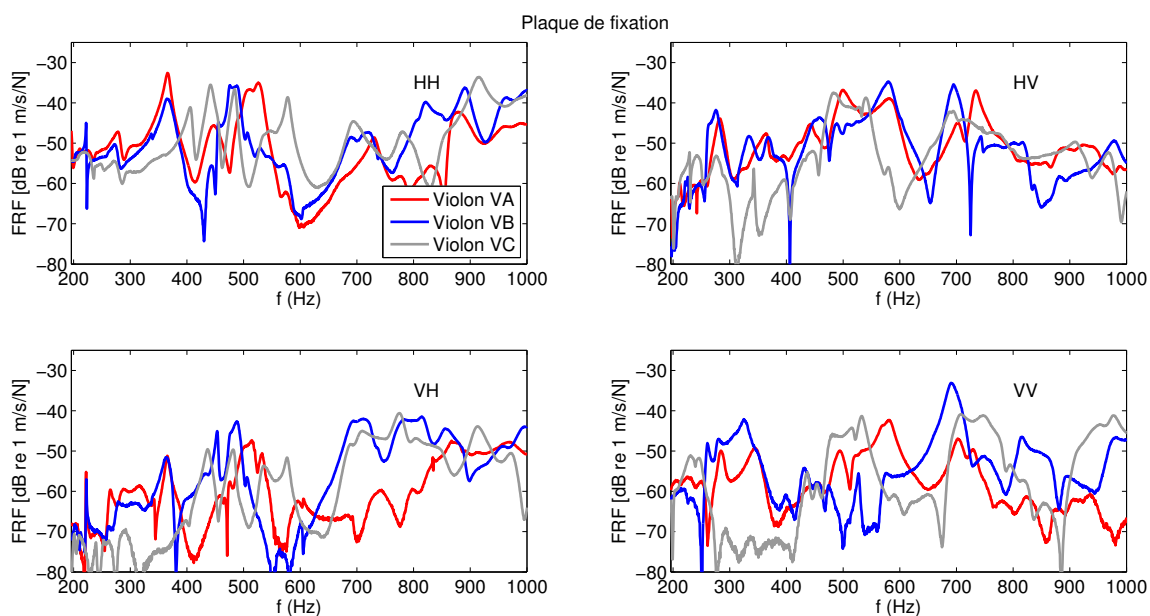


FIGURE C.3 – Fonctions de transfert chevalet/manche avec plaque de fixation

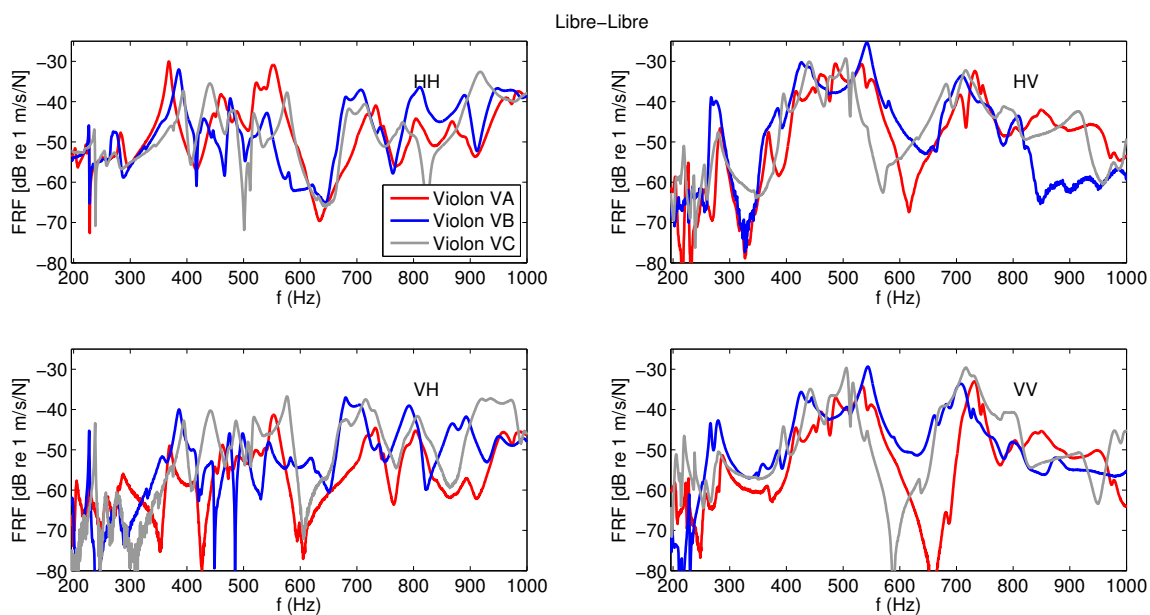


FIGURE C.4 – Fonctions de transfert chevalet/manche avec violons en libre-libre





# Expérience Partie 4 : extraits musicaux

- « Son Riche »

Musical score for « Son Riche ». The score is written for guitar in G major (one sharp) and common time (C). It consists of two staves. The first staff shows a sequence of eighth notes with fingerings: 0, 2, 1, 3, 2, 0, 3, 1, 0, 2, 1, 3, 2, 0, 3, 1. The second staff shows a sequence of chords with fingerings: 0, 2, 1, 3, 2, 0, 3, 1, 0, 2, 1, 3, 2, 0, 3, 1.

- « Fort et Puissant »

Musical score for « Fort et Puissant ». The score is written for guitar in B-flat major (two flats) and common time (C). It consists of two staves. The first staff is marked *SOLO.* and includes dynamics *sf*, *mf*, *espress.*, *cresc.*, and *f*. It features a *rit.* section with a 3/3 time signature. The second staff is marked *molto espress.* and includes dynamics *f* and *rit.*. It features a 3/3 time signature and a *tr* (trill) marking.

- « Vivant et Réactif »

Musical score for « Vivant et Réactif ». The score is written for guitar in B-flat major (two flats) and common time (C). It consists of two staves. The first staff is marked *Allegro moderato.* and includes dynamics *p* and *f*. The second staff is marked *SOLO. ad lib.* and includes dynamics *f* and *rit.*. It features a *tr* (trill) marking.

- « Plaisir »

Musical score for « Plaisir ». The score is written for guitar in B-flat major (two flats) and common time (C). It consists of two staves. The first staff is marked *Largo 46 = ♩* and includes dynamics *p* and *f*. The second staff is marked *SOLO. ad lib.* and includes dynamics *f* and *rit.*. It features a *tr* (trill) marking.



# Expérience Partie 4 : réponses au questionnaire

Pour chaque critère X, les questions ont été posées sous la forme « Selon vous, qu'est-ce qu'un violon X? », et « Comment avez-vous jugé ce critère au cours de l'expérience? » Les réponses à ces six questions sont présentées dans les tableaux suivants (l'ordre des sujets est le même pour chacun des tableaux, "NA" signifie que l'information n'a pas été renseignée) :

- Son Riche (en harmoniques)

Qu'est-ce qu'un Son Riche (en harmoniques) ?	Comment avez-vous jugé ce critère ?
Pour moi un son "riche" et un son "riche en harmoniques" sont deux choses différentes. Un son riche est un son qui a beaucoup de fondamentale, des harmoniques entre 1khz-2,5khz assez fortes, un creux entre 7,5-10khz, et un "reverb" audible grâce à des "phase shifts" entre les différentes pièces qui radient les vibrations. J'ai interprété "un son riche en harmoniques" comme un spectre sonore ou la fondamentale est relativement moins forte par rapport aux harmoniques, ce que j'ai l'habitude d'appeler "son complexe."	Cherchant la qualité "riche en harmoniques," j'ai écouté, pendant les longues notes, la relation fondamentale/harmoniques. J'ai surtout joué des double cordes fortes et soutenues, cherchant à faire entendre des "fausses fondamentales," la troisième note créée par la mélange des harmoniques des deux notes jouées. Le son de cette fausse fondamentale me donne une idée de l'enveloppe générée par le violon en question et quelles fréquences sont plus ou moins filtrées.
Avec un grand faisceau d'harmoniques	Par les résonances
Un violon qui a beaucoup de résonance, qui peu sonner comme un tonneau. A l'opposé de criard. Dans l'absolu, les critères sont extrêmement liés et il m'est très difficile de les scinder.	Les violons qui étaient à l'opposé de criard.
Un son riche est un son plein, ouvert mais avec du poids.	La sensation est immédiate sur un violon au son riche en harmonique. On sent l'ouverture, la générosité, et malgré la nuance jouée, le violon garde un son de qualité
Violon dont la palette sonore est variée, et pour lequel, quelle que soit la nuance effectuée, la résonance semble libre et pure.	En constatant les éléments précédents...
Un violon qui émet des vibrations créant un halo sonore	Difficilement. Mais à peu près comme précédemment décrit
Je cherche des violons où sans privilégier trop ni les graves ni les aiguës, les harmoniques naturelles que je perçois sont le mieux répartis possible à travers l'instrument. À mon oreille, un son riche en harmoniques est lié probablement à une certaine résonance de l'instrument.	En jouant lentement, des cordes à vide et des gammes, des doubles cordes. Sans méthodes et de manière totalement empirique.
Spectre large, son "riche", son perceptible au sein d'un groupe	Impression de densité du "grain" de son, luminosité, densité, "richesse"
un son riche est, pour moi, un son timbré, coloré, rond, chaleureux. stp oublie cette histoire d'harmoniques, c'est très secondaire, presque hors sujet...	si donc j'occulte les "harmoniques", ce critère représente 50% des qualités recherchées dans un violon. L'expérience de la vibration harmonique par le manche était intéressante, car très différente d'un instrument à l'autre, mais peu représentative du jeu en condition réelle.
Un violon riche en harmonique a une profondeur/qualité de notes que n'a pas forcément un violon neuf, surtout dans les graves.	En jouant on ressent les harmoniques du violon qui se mettent en résonances. à l'écoute des tierces brisées ce sont les résonances.
un violon dont toute sa tessiture résonne bien et qui a une palette sonore large	pertinent et indispensable dans la comparaison de plusieurs violons.
un violon ayant un timbre intéressant, dont on peut tirer une grande variété de couleurs, de sonorités...Ca n'a pas toujours de rapport avec la puissance, même si , en général, un violon "timbré" passe très bien dans la salle. C'est aussi parce qu'on a plus de curiosité à l'écouter.	De deux manières: 1-sur une seule note, en variant le point de contact entre l'extrême ponticello et l'extrême sul tasto 2-sur des tierces et quarts, pour entendre la troisième note (l'harmonique)
Un violon qui à de l'amplitude	En utilisant divers techniques comme jouer forte (pour voir si le son ne sature pas) piano (si il a un son chaleureux) jouer sur toute les cordes pour voir l'homogénéité de l'instrument.
Un violon qui résonne sans effort de pression particulière sur l'archet. Un violon dont le son sort facilement dans les positions hautes, sur la corde de sol et de ré notamment.	J'ai essayé de faire sonner le violon dans des pianos, ou même pianissimos, avec beaucoup de longueur et de vitesse d'archet. J'ai fait des gammes sur une corde pour entendre si le son paraissait étouffé sur les positions hautes de Main gauche.
NA	NA

- Fort & Puissant

Qu'est-ce qu'un violon Fort et Puissant ?	Comment avez-vous jugé ce critère ?
Un violon qui, pour une vitesse et pression d'archet donné, rend plus de volume (amplitude) de son.	En jouant des gammes et des extraits de morceaux en essayant d'appliquer les mêmes vitesses et pressions d'archet en évaluant la volume du son. Ensuite en cherchant le maximum de chaque violon et les limites de volume par rapport à une sonorité "acceptable."
Dont on sent qu'il porte loin	Par intuition, car l'oreille sur le violon est peu réceptive à ces qualités
Un violon criard, si on sépare les paramètres tels que présentés dans ce questionnaire.	quand le son crie....
Un violon qui ne craque pas sous la pression de l'archet	En jouant forte justement.
Violon qui possède un son capable de bonne projection sans nécessairement avoir besoin de forcer.	Si le son d'une nuance "forté" par exemple paraît projeter en suffisance et en volume sonore suffisant.
Un violon qui est sonne beaucoup sous l'oreille et qui donne une impression de projection	Difficilement. Mais à peu près comme précédemment décrit...!
Un violon fort et puissant ( je ne fais pas vraiment de différence entre les deux termes) est un violon qui projette dans l'espace et résiste aux pressions de l'archet. J'y ajouterais également une capacité à se différencier d'une masse sonore par le timbre.	En jouant fort mais aussi piano car la puissance se ressent aussi dans les pianos. Sans méthodes et de manière totalement empirique.
Impression de volume sonore, capacité à non-saturer, grand champ de dynamiques	Sensation de répondant quand je variais la nuance, sensation qu'il en reste "sous le pied", capacité à aller plus loin dans la corde, <b>impression de plénitude sonore</b>
un violon fort et puissant est, selon moi, un violon dont la forme et la conception impose le moins possible de limite à l'appui et à la vitesse d'archet, un violon dont l'émission est suffisamment claire pour projeter le son le plus loin possible. une corde neuve est riche en harmonie, elle ne fera jamais sonner une "crêpe" comme un strad. cqfd.	l'expérience était déstabilisante pour évaluer la puissance des violons. La projection du son compliquée à appréhender: petite pièce, assez mate, les vibrations du manche faussait la perception du son, ces vibrations ayant tendance à passer dans le corps.
C'est un violon duquel le timbre est très facile à obtenir. c'est plus une question de décibels.	En jouant en obtenant des forte facilement. à l'écoute on pouvait aussi sentir le manche vibrer.
un violon qui projette le son loin de manière puissante et englobante	bien mais difficile à juger dans une petite pièce
En général, un violon timbré, même si parfois, certains violons à vernis secs, de type Bernardel, peuvent être extrêmement puissants, sans avoir un timbre passionnant pour autant. Ca s'entend tout bêtement au volume produit en jouant. Toutefois, le réglage de l'instrument peut pousser artificiellement la puissance, en "boostant" la corde de Sol ou de Mi..	En jouant les mêmes extraits sur les divers instruments, et en vérifiant le réglage, sur toute l'étendue du violon
un violon qui ne sature pas	Comme précédemment mais en me focalisant sur les extrêmes.
Un violon fort et puissant est pour moi un violon ou il ne faut pas forcer pour obtenir un forte, un violon qui ne sature pas, même lorsque la pression de l'archet est très importante.	J'ai joué le plus fort possible en écoutant la résonance de l'instrument.
NA	NA

- Vivant & Réactif

Qu'est-ce qu'un violon Vivant et Réactif ?	Comment avez-vous jugé ce critère ?
Un violon qui accepte la plus grande fourchette de pressions et vitesses d'archet sans "siffler" ni "cracquer." "Siffler" est ce que j'appelle l'état quand la corde ne tiens plus la fondamentale car il manque de pression par rapport à la vitesse de l'archet. "Cracquer" c'est quand la pression est trop forte pour la vitesse.	Chercher les limites de chaque violon, puis enchaîner des passages rapides pour juger la réponse aux changements d'archet, pression, attaque, vitesse.
Qui répond bien à la sollicitation et qui a du ressort	Par la rapidité de la réponse
Facile d'émission, répond facilement aux sollicitations de l'archet sur la corde.	Difficile d'évaluer ce paramètre quand on ne joue pas l'instrument. Simplement des pistes avec les bruits d'archets sur la corde et la rapidité d'émission.
Un violon qui dans la vitesse est capable de s'adapter aux contrastes et à la précision de l'archet	En jouant vite, des rythmes courts, et des nuances très variées
Réactivité de l'instrument, quelles que soient les attaques d'archet (de moelleuses à vives) effectuées, quant à la rapidité et qualité d'émission sonore.	NA
Facile à dompter	Difficilement. Mais à peu près comme précédemment décrit!!!
C'est la rapidité d'émission de la corde.	Cela se sent très bien sous l'archet. Peut-être plus difficilement à l'audition. Cela est particulièrement perceptible dans les coups d'archet rapides
Rapidité d'émission, sensibilité aux moindres inflexions et intentions transmises, du coup, possibilité d'être subtil puisque le violon réagit infiniment	Capacité à être plus spontané et fin dans l'interprétation, puisque le violon réagit et rend audible les moindres gestes transmis. L'interprète peut plus se lâcher et lâcher-prise, on peut être plus inspiré, libre et inventif
un violon facile à jouer, d'une émission claire, égale, homogène.	difficilement...
C'est un violon qui a une palette de jeux ample. duquel on peut distinguer ou obtenir des couleurs et des articulations différentes.	En jouant différentes nuances et articulations. à l'écoute en cherchant des contrastes.
un violon qui répond instantanément à l'action de l'archet et des doigts de la main gauche: une rapidité de réaction	bien mais l'extrait choisi aurait pu être plus pertinent
un instrument qui n'est pas limité dans la projection du son, qui réagit facilement dans les passages rapides, et qui permet de changer de sonorité	avec deux extraits: -un extrait virtuose et véloce -un extrait de la Sonate de Debussy
Un violon qui a une grande palette de nuances entre autre.	En jouant divers oeuvres qui demandent des techniques différentes.
Un violon ou les subtilités de l'archet ressortent sans difficulté, ou tout le travail d'archet à un effet facile et direct sur le son.	j'ai varié les coups d'archet: spicato, staccato, pointé ou trait, "goutte mozartienne" etc...
NA	NA

Pour finir, deux questions concernant explicitement le rapport des violonistes aux vibrations ont été posées. L'une est assez générale : « Faites-vous attention aux vibrations de l'instrument quand vous jouez/évaluez un violon ? » ; l'autre est directement en lien avec notre étude : « Les vibrations du manche du violon sont-elles synonymes de quelque chose en particulier ? »

Attention aux vibrations ?	Vibrations du manche signifient quelque chose ?
Oui, j'aime bien sentir les vibrations du fond, qui me rassure que le violon fonctionne bien.	Oui, un violon en mauvaise état, ou la structure des éclisses n'est pas stable. De l'énergie qui pourrait ajouter à l'amplitude des mouvements des plaques est en train de se dissiper dans le manche et sera perdu à cause de l'effet "damping" de la main.
Nécessairement mais sans en avoir la conscience immédiate	Non
Non	non
Oui	Oui, lorsqu'on sent le violon vibrer on a cette sensation qu'il est le prolongement de notre corps
Oui, elles sont signe de bonne composition	Les vibrations ressenties par un violoniste me semblent être principalement dues aux cordes, le bois étant assez plein au niveau du manche. du coup la qualité des cordes entre en jeu...mais pas que bien sûr.
Pas spécialement	Non
Je ne suis pas sûr de parfaitement comprendre la question mais je dirais que non.	Pas du tout.
Oui - ça manque terriblement quand il n'y en a pas - impression d'instrument "mort"	Que l'instrument est bel et bien mis en vibration, et que le son est avant tout une vibration physique audible L'aspect sensoriel et sensuel est très important pour moi quand je joue A fortiori sur un alto qui renvoie encore plus de retour physique qu'un violon
particulièrement pendant cette expérience! En fait, personnellement j'y prête peu d'attention. Je ressens ces vibrations, bien sûr, mais j'ai plutôt tendance à me focaliser sur la personnalité d'un instrument et ces infinies facettes.	à vous de me répondre
Bien sûr, consciemment et inconsciemment d'ailleurs, puisque le violon est prolongement de notre corps et nos oreilles.	ce sont plutôt les cordes et la caisse de résonances qui vibrent quand on joue car le manche est encadré par notre main. mais c'est sûr que c'est plutôt bon signe car la musique est une onde.
oui beaucoup, la vibration se diffusant dans notre corps, que ce soit au niveau des doigts, de la tête ou de l'épaule	oui j'ai l'impression que plus la vibration ce fait plus le son est libre et projetant...
Je me suis aperçu au cours de l'expérience d'auditeur qu'il y avait une relation directe entre la sensation d'entendre un violon timbré et les vibrations artificielles du manche factice. Je n'avais jamais réfléchi à ça avant ! Bien évidemment, une fois ce constat effectué, il était plus difficile de rester objectif pour les violons restant mais l'expérience, du point de vue de la sensation est concluante.	la sensation, l'image corporelle etc etc, sont fondamentales dans la pratique du violon. je ne pense pas que les vibrations représentent quelque chose de très concret dans la sonorité ou le timbre de l'instrument, mais peuvent visiblement affecter la perception physique du violoniste (et son objectivité) du son de son violon.
Oui j'y suis extrêmement sensible mais pas toujours consciemment.	Certainement mais je ne sais pas précisément.
Non, peu.	Souvent de saturation pour moi, j'aime un violon qui résonne sans trop de vibrations dans la main.
Oui, si le violon vibre c'est qu'il se met en résonance et que donc les harmonies sont riches.	Pour moi le manche ne vibre pas en particulier c'est le corps du violon qui vibre et notamment le dos que des gens qui jouent sans cousins comme moi peuvent sentir puisque le dos du violon est posé sur la clavature.

# Expérience Partie 4 : complément d'analyse

Nous apportons dans cette annexe un complément à l'étude proposée dans la Partie 4.

Le tableau F.1 présente les coefficients de corrélation de Pearson entre les notes de « Plaisir » et celles de chacun des trois critères.

D'après ce tableau, le niveau de corrélation d'un critère directement lié aux attributs du violon (« Son Riche », « Fort et Puissant », « Vivant et Réactif ») avec le « Plaisir » est hétérogène sur l'ensemble des trois violons. On n'observe en effet aucune tendance particulière concernant le niveau de corrélation entre le plaisir jugé et chacun des trois critères liés aux attributs du violon.

De façon similaire à la représentation de la répartition des notes de « Plaisir » au cours des conditions Cond P, Cond L, Cond AL, pour chacun des groupes de sujets (VibAtt ou noVibAtt) (voir Chapitre 8, 8.2.3), la figure F.1 présente les notes des trois autres critères (« Son Riche », « Fort et Puissant », « Vivant et Réactif ») en fonction du violon, et du groupe de sujet, à l'aide de diagrammes en boîte (« box plot » en anglais).

De même que pour les notes de « Plaisir », la même tendance s'observe pour les trois violons au sein du groupe VibAtt : les notes des trois critères sont meilleures pour les trois violons en condition d'écoute augmentée qu'en condition d'écoute seule dans cette tâche de jugement en absolu. Ceci n'est pas le cas dans le groupe noVibAtt. Par ailleurs, les résultats des deux groupes montrent une plus grande variabilité en ce qui concerne la notation des critères en condition de jeu (Cond P) par rapport aux autres conditions.

Par ailleurs, on observe qu'au sein du groupe VibAtt, les notations des trois critères sur le

	Cond P			Cond L			Cond AL		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3	V1	V2	V3
Plaisir vs. Son Riche	0.66	0.55	0.60	0.26	0.68	0.38	0.79	0.19	0.84
Plaisir vs. Fort & Puiss	0.62	0.42	0.15	0.37	0.82	0.79	0.75	0.44	0.74
Plaisir vs. Vivant & Réact	0.66	0.72	0.49	0.82	0.71	0.72	0.71	0.07	0.75

TABLE F.1 – Coefficients de corrélation de Pearson entre les notes de « Plaisir » et celles des 3 autres critères, par violon et condition

violon V1 (donnant le plus de plaisir aux VibAtt) sont globalement similaires à celles des violons V2 et V3, de même que dans le groupe noVibAtt, les notations du violon V2 (donnant le plus de plaisir aux noVibAtt) a en moyenne des notes similaires aux violons V1 et V3.



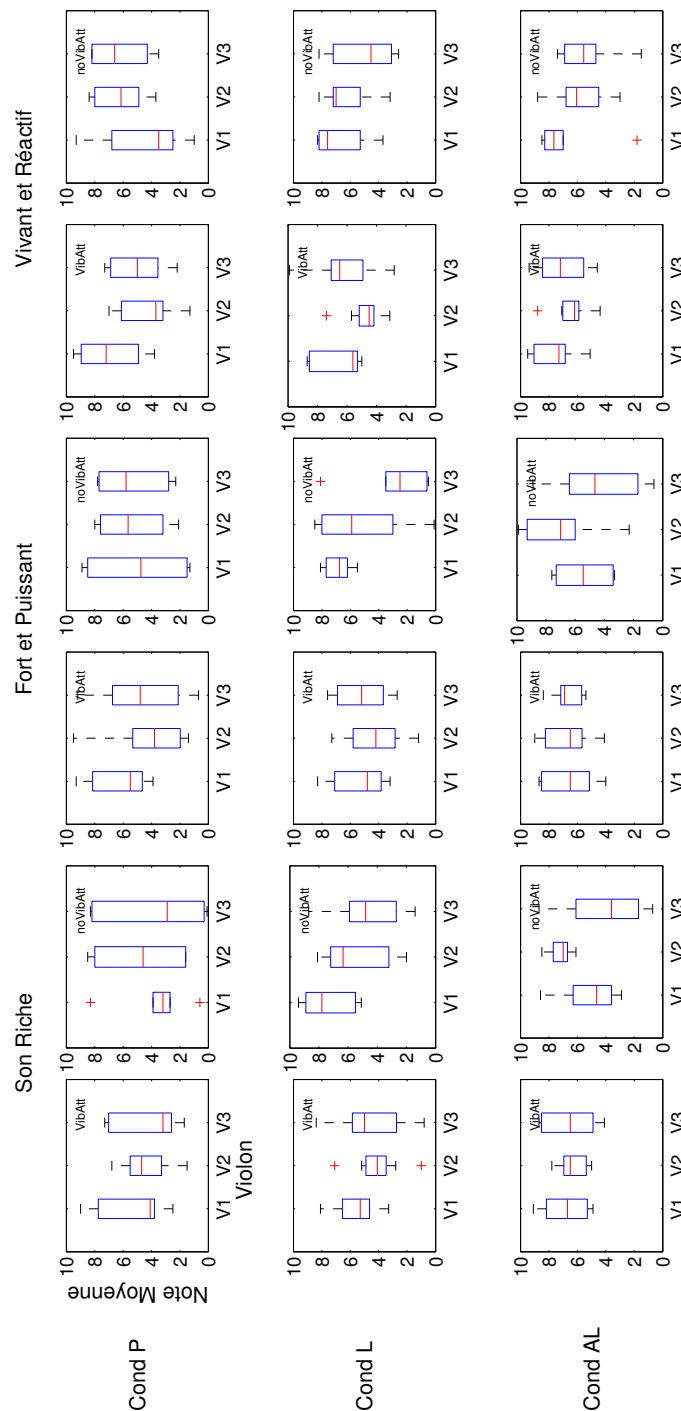


FIGURE F.1 – Diagramme en boîte représentant les notes des critères « Son Riche », « Fort et Puissant » et « Vivant et Réactif » au cours des conditions P, L et AL; colonnes gauche : groupe VibAtt, colonnes droite groupe noVibAtt. Les rectangles s’étendent du premier quartile au troisième quartile et sont coupés par la médiane (en rouge); les segments aux extrémités mènent jusqu’aux valeurs extrêmes et les points rouges représentent les données aberrantes (« outliers » en anglais)

Au Chapitre 7, nous avons vu que l'effet du retour vibrotactile (sur la notation des critères) pourrait être indépendant du violon, c'est-à-dire qu'il s'appliquerait de la même façon pour tous les violons. A l'écoute simple, un même violon pouvant être perçu comme très « Fort et Puissant » (respectivement très « Vivant et Réactif », ou au « Son très Riche ») ou au contraire peu « Puissant » (respectivement peu « Vivant et Réactif », ou au « Son peu Riche ») selon l'instrumentiste qui l'évalue, on peut se demander dans quelle mesure cette appréciation est modifiée par l'écoute augmentée (présence retour vibratoire). Par exemple, on peut se demander si un violon jugé peu « Fort et Puissant » (respectivement peu « Vivant et Réactif », ou au « Son peu Riche » etc.) à l'écoute par un violoniste donné, ne bénéficie pas davantage de la présence du retour vibrotactile qu'un violon perçu à l'écoute simple comme « Fort et Puissant » (respectivement « Vivant et Réactif », ou au « Son Riche » etc).

Les deux figures suivantes illustrent respectivement cette analyse pour les groupes VibAtt et noVibAtt. Pour chaque critère X, l'effet de la présence de la vibration lors de la situation d'écoute active — correspondant simplement à la différence « note de X en Cond AL – note de X en Cond L » — est représenté en fonction de la note accordée à ce critère X en condition d'écoute seule, Cond L. Chaque couleur représente un violon, chaque numéro un sujet. Le tableau 2 suivant présente les coefficients de corrélations issus de la régression linéaire pour chacun des critères, et pour les deux groupes séparés.

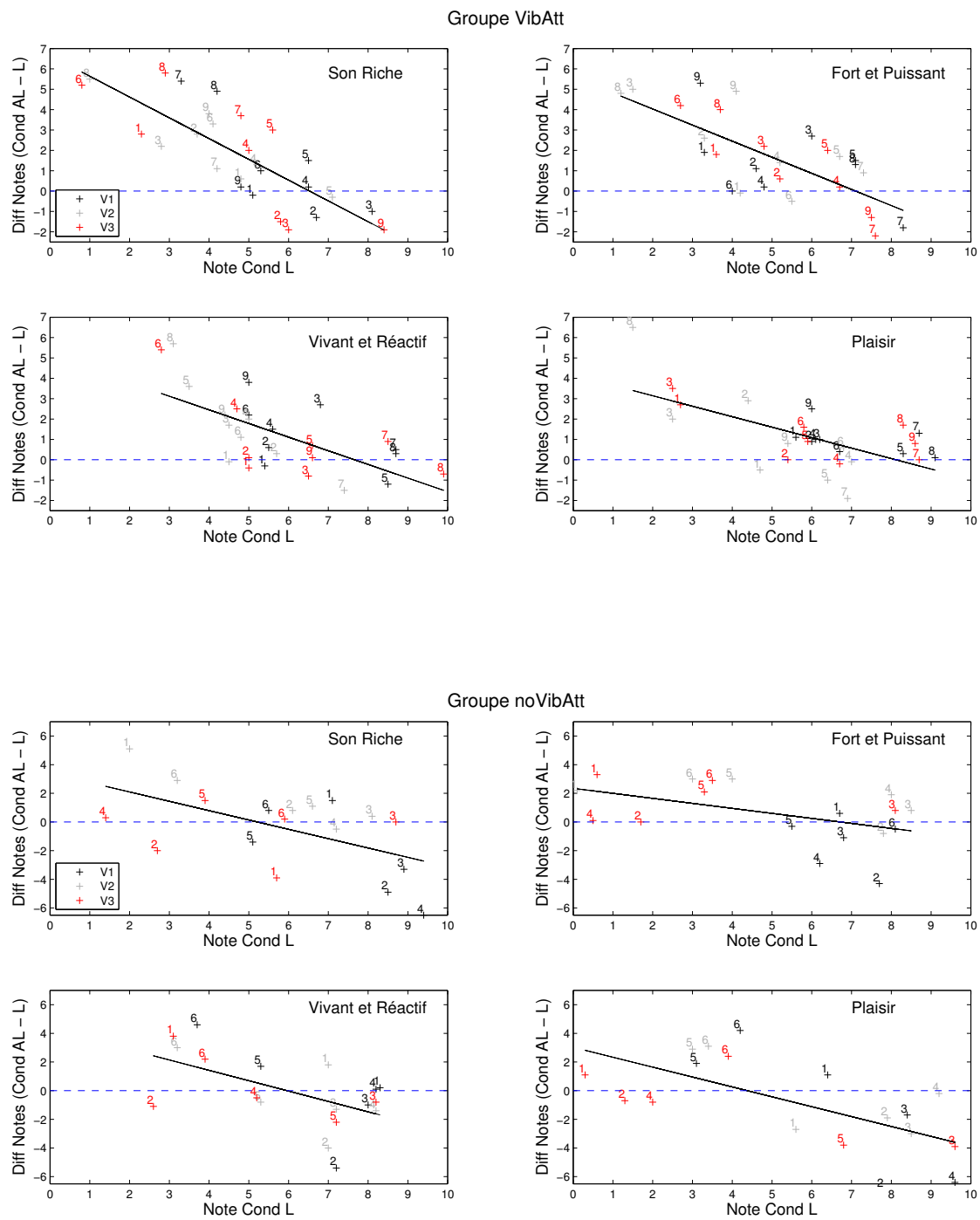


FIGURE F.2 – Effet du retour vibratoire en fonction de la note en condition d’écoute seule, par critère (figure), violon (couleur), sujet (numéro). (en haut) Groupe VibAtt (en bas) Groupe noVibAtt

Pour les deux groupes, la pente négative des droites de régression donnent du poids à notre hypothèse de départ que l’effet du retour vibratoire sur la notation d’un critère (Cond AL - L) est inversement corrélé à l’appréciation de ce critère en condition d’écoute seule (Cond L). La

	noVibAtt	VibAtt
Son Riche	-0.56	-0.80
Fort & Puiss	-0.49	-0.73
Vivant & Réact	-0.57	-0.66
Plaisir	-0.65	-0.64

TABLE F.2 – Coefficients de corrélation (ddl = 16 pour noVibAtt ; ddl = 25 pour VibAtt ) associés aux droites de régression des 4 critères

groupe VibAtt présente plus d'homogénéité que le groupe noVibAtt en terme de stratégie de réponse comme en témoignent les coefficients de corrélation (tableau F.2) issus de la régression linéaire beaucoup plus élevés pour le groupe VibAtt que pour le groupe noVibAtt, et ce pour les quatre critères. Il est important de remarquer cependant que la proportion de croix négatives (i.e. effet négatif de la présence du retour vibratoire sur la notation d'un critère) est très différente d'un groupe à l'autre : elle est relativement faible pour le groupe VibAtt (entre 15% et 26% selon le critère) alors qu'elle est variée entre 33% et 61% pour le groupe noVibAtt.

Les résultats du groupe VibAtt sur les critères « Fort et Puissant » et « Son Riche » (pour lesquels la corrélation est la plus forte) montrent que plus un violon est jugé peu puissant (respectivement au son peu riche) en condition d'écoute seule, plus l'ajout du retour vibratoire a d'influence sur la notation de ce critère, dans le sens d'une amélioration. Et à l'inverse, plus un violon est noté puissant (respectivement au son riche) en écoute seule, moins la présence du retour vibratoire a d'effet positif sur la notation. On observe même quelques cas de petite dégradation de la notation, lorsque les notes sont supérieures à 5 en condition d'écoute seule : on pourrait parler d'un effet de seuil, autour de 6 sur le graphe. Il est néanmoins important de noter ici qu'une limitation méthodologique est inhérente à l'utilisation d'un axe de réponse borné, et ce pour les notes élevées. En effet de « bonnes » notes en Cond L peuvent difficilement devenir encore meilleures en Cond AL du fait de la borne supérieure de l'axe de réponse [0 10]. Ces notes peuvent stagner, et si certaines diminuent, il est important de noter que cette diminution est de moins de 2 sur l'axe [0 10]. Pour les notes plus faibles, par exemple en dessous de 5, un axe de réponse borné n'empêche pas de fortes augmentations mais il limite plutôt les fortes diminutions. Et finalement, on remarque que la présence du retour vibratoire entraîne une augmentation claire et forte des notes des deux critères « Son Riche » et « Fort et Puissant ». La même tendance se distingue également sur le critère « Vivant et Réactif ». En ce qui concerne le critère de « Plaisir », mis à part quelques violonistes sur le violon V2, on remarque que toutes les notes ont été augmentées avec la présence du retour vibratoire. Cette observation pourrait indiquer que, contrairement aux trois autres critères, l'effet du retour vibrotactile sur la notation du « Plaisir » ne bénéficie pas davantage à un violon donnant peu de plaisir à l'écoute seule qu'un violon donnant déjà beaucoup de plaisir.

Au sein du groupe noVibAtt, la tendance est beaucoup plus floue pour les quatre critères. Il apparaît toujours qu'un violon jugé peu « Fort et Puissant » (respectivement peu « Vivant et Réactif », ou au « Son peu Riche » etc.) à l'écoute seule bénéficie positivement de la présence

du retour vibrotactile. Mais, cette fois, plus un violon est perçu comme « Fort et Puissant » (respectivement « Vivant et Réactif », ou au « Son Riche » etc) à l'écoute seule, plus la présence du retour vibratoire a un effet négatif sur la notation. On observe même de fortes dégradations des notes, allant jusqu'à - 6 entre les deux conditions. Cette tendance est observée sur les trois violons de l'étude.

Finalement, ces résultats suggèrent que, indépendamment du groupe de sujets considéré, l'effet du retour vibratoire sur la notation des trois critères liés aux attributs du violon est inversement corrélé à l'appréciation de ce critère en condition d'écoute seule lorsque cette appréciation est inférieure à 5/10. La distinction entre les groupes apparaît pour des notes supérieures à 5/10 en condition d'écoute seule : la restitution du retour vibratoire dans le manche a un effet positif ou nul sur l'évaluation des critères pour les violonistes du groupe VibAtt alors qu'elle a un effet négatif sur l'évaluation des violonistes noVibAtt.



# Liste des tableaux

1.1	Valeurs médianes de forces appliquées respectivement par le pouce et l'index lors du jeu des notes Sol (196 Hz) et Do (261 Hz) en <i>mf</i> . . . . .	23
2.1	Fréquences (Hz) des modes signatures des quatre violons . . . . .	36
3.1	Pearson correlation coefficients (df=3) between preference ratings made under the normal condition and each sensory masking condition by participant . . . . .	57
3.2	Number of times each violin was most (a) or least (b) preferred by condition . . . . .	60
3.3	Mean (averaged over participants) Pearson correlation between the weighted sum of the criteria ratings and the overall quality ratings for the five violins under the three playing conditions . . . . .	62
3.4	Range of number of times each criterion was found to be relevant across violins in each condition . . . . .	65
3.5	Number of times each criterion was found to be fully relevant by criterion and condition. . . . .	65
3.6	Mean (averaged over subjects) Pearson correlation (df=3) between the preference ratings and the overall quality ratings for the five violins under the three playing conditions . . . . .	66
3.7	Pearson correlation coefficients (df=3) between the overall quality ratings made under the normal condition and each sensory masking condition by participant . . . . .	67
4.1	Violons de l'étude . . . . .	73
4.2	Fréquences des cinq « modes signature » . . . . .	77
4.3	Préférences et notes moyennes des critères liés à la modalité tactile (et écarts-types), par violon, en condition normale . . . . .	78
4.4	Comparaison VD/VE par rapport à toutes les autres paires . . . . .	80
4.5	Principaux modes propres dans [0 -1000] Hz pour les violons VD et VE . . . . .	83
5.1	Comparisons Cond AL – Cond L . . . . .	106
5.2	Comparisons Cond L – Cond P . . . . .	107
5.3	Comparisons Cond AL – Cond P . . . . .	107
5.4	Interaction effects (condition x violon) . . . . .	108
5.5	Effect of the factor “vibration level” . . . . .	109
5.6	Effect of the factor “violin” . . . . .	110
6.1	Effets de la condition expérimentale par critère et par groupe . . . . .	119
6.2	Effet du groupe (Groupe VibAtt – Groupe noVibAtt) en phase d'évaluation . . . . .	119
6.3	Comparaison (Cond AL-Cond L) par critère et par groupe . . . . .	120
6.4	Effet du groupe (Groupe VibAtt – Groupe noVibAtt) en phase de notation . . . . .	122

---

6.5	Moyenne des notes de « Plaisir » par condition, violon et groupe (erreurs standard de la moyenne) . . . . .	122
6.6	Violons de l'étude . . . . .	124
6.7	Fréquences des cinq « modes signature » . . . . .	126
6.8	Niveaux de vibrations aux fréquences des cordes à vides (valeurs en dB, re 1 $\mu\text{m}/\text{N}$ )	127
F.1	Coefficients de corrélation de Pearson entre les notes de « Plaisir » et celles des 3 autres critères, par violon et condition . . . . .	163
F.2	Coefficients de corrélation (ddl = 16 pour noVibAtt; ddl = 25 pour VibAtt ) associés aux droites de régression des 4 critères . . . . .	168



# Table des figures

1.1	Eléments de facture d'un violon . . . . .	4
1.2	Graphe illustrant la relation entre les seuils absolus de sensations tactile et auditive et le registre du violon (adapté de Gescheider, 1997) . . . . .	8
1.1	Exemple de tenue du manche lors du jeu sur la corde de Sol . . . . .	22
1.2	Mesure de pression sous le pouce à l'aide d'un capteur FlexiForce . . . . .	23
1.3	Dispositif expérimental pour la mesure des seuils absolus de sensibilité à la vibration : manche de violon isolé excité par un petit vibreur . . . . .	25
1.4	Seuils absolus de sensation vibratoire mesurés sur la main gauche de 14 violonistes (trait plein) et mesurés sur le bout de l'index (trait en petits pointillés) (adapté de Verrillo (1971)). Les traits en grands pointillés représentent les seuils extrapolés. Les barres d'erreur représentent les écarts-type . . . . .	28
2.1	Dispositif expérimental utilisé : excitation impulsionnelle sur le coin supérieur du chevalet côté Sol et mesure vibratoire au laser coin supérieur du chevalet côté Mi (à gauche pour les admittances au chevalet), sur la touche (à droite pour les niveaux de vibration au manche) . . . . .	34
2.2	Admittance au chevalet des quatre violons sélectionnés pour leur caractère (a) « vibrant », (b) « non vibrant ». Les niveaux sont représentés en dB (ref 1 m/s/N) . . . . .	36
2.3	Amplitudes horizontales de vibration des violons jugés (a) « vibrants » (b) « non vibrants ». Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés . . . . .	37
2.4	Amplitudes verticales de vibration des violons jugés (a) « vibrants » (b) « non vibrants ». Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés . . . . .	38
3.1	Vibrating rings worn by the violinists during the experiment . . . . .	54
3.2	Means of between-subjects preference ratings in the "Holding Only" condition. The vertical bars represent the standard errors of the mean . . . . .	56
3.3	Mean preference ratings under the three playing conditions. The vertical bars represent the standard errors of the mean . . . . .	59
3.4	Means of the importance and magnitude ratings under normal playing conditions, averaged over the five violins, under the normal condition. The vertical bars represent the standard errors . . . . .	63
3.5	Arithmetic means over the five violins of the standard deviations of the importance and magnitude ratings, under normal playing conditions . . . . .	64
4.1	Cordier avec masse ajustable monté sur un violon de l'expérience . . . . .	74
4.2	Dispositif de mesures (à gauche) sur « plaque de fixation », (à droite) en libre-libre . . . . .	75

4.3	Admittances « HH » au chevalet des cinq violons de l'étude (à gauche) sur « plaque de fixation », (à droite) en libre-libre . . . . .	76
4.4	Niveaux de déplacement (en norme) au manche des cinq violons de l'étude . . . . .	77
4.5	Admittances au chevalet pour les violons fixés . . . . .	82
4.6	Admittances au chevalet pour les violons en condition libre-libre . . . . .	82
4.7	Fonctions de transfert chevalet/manche avec plaque de fixation . . . . .	84
4.8	Fonctions de transfert chevalet/manche avec violons en libre-libre . . . . .	84
5.1	Experimental room : violinist experimenter on one side of the curtain (on the left), participant holding the isolated neck on the other side of the curtain (on the right) . . . . .	96
5.2	Experimental design . . . . .	96
5.3	Experimental setup . . . . .	102
5.4	Overall transfer function $B$ superimposed with the response of the equalizer, for the three violins . . . . .	104
5.5	Mean preference ratings under the three conditions requiring absolute judgments	105
5.6	Mean comparison ratings (VL_100% - VL_50%) of the three violins, by criterion	109
6.1	Appartenance aux groupes VibAtt vs. noVibAtt en fonction des réponses au questionnaire. La surface du disque est proportionnelle au nombre de sujets . . . . .	117
6.2	Notes moyennes, par critère (en ordonnée), condition expérimentale (couleur), et groupe (vers la gauche : Groupe noVibAtt ; vers la droite : Groupe VibAtt) . . . . .	118
6.3	Notes moyennes de comparaison (VL_100% - VL_50%) des trois violons, par critère : (a). Groupe noVibAtt (b). Groupe VibAtt . . . . .	121
6.4	Répartition des notes de « Plaisir » - colonne de gauche, groupe VibAtt ; colonne de droite groupe, noVibAtt . . . . .	123
6.5	Courbes d'admittance au chevalet . . . . .	125
6.6	Niveaux de vibration sur le côté du manche. La courbe de seuil de sensibilité mesurée sur la main gauche des violonistes est reportée en pointillés. Les quatre lignes verticales en pointillées sont des repères pour les fréquences de cordes à vide	126
6.7	Violon préféré vs. caractéristiques du violon personnel : (a) lieu de fabrication (b) siècle de fabrication. La surface du disque est proportionnelle au nombre de sujets. "NR" signifie que l'information n'a pas été renseignée par le participant ; "contemporain" signifie que pour tous les violons facturés après 1970, où il n'y a plus d'école de lutherie, nous considérons que le lieu de fabrication importe peu . . . . .	128
B.1	(a) Admittance au chevalet (b) Amplitudes horizontales de vibration des dix violons. Le seuil de sensibilité à la vibration mesuré sur la main gauche des violonistes est reporté en traits pointillés . . . . .	151
C.1	Admittances au chevalet pour les violons avec plaque de fixation . . . . .	154
C.2	Admittances au chevalet pour les violons en condition libre-libre . . . . .	154
C.3	Fonctions de transfert chevalet/manche avec plaque de fixation . . . . .	155

C.4	Fonctions de transfert chevalet/manche avec violons en libre-libre . . . . .	155
F.1	Diagramme en boîte représentant les notes des critères « Son Riche », « Fort et Puissant » et « Vivant et Réactif » au cours des conditions P, L et AL ; colonnes gauche : groupe VibAtt, colonnes droite groupe noVibAtt. Les rectangles s'étendent du premier quartile au troisième quartile et sont coupés par la médiane (en rouge) ; les segments aux extrémités mènent jusqu'aux valeurs extrêmes et les points rouges représentent les données aberrantes (« outliers » en anglais) . . . .	165
F.2	Effet du retour vibratoire en fonction de la note en condition d'écoute seule, par critère (figure), violon (couleur), sujet (numéro). (en haut) Groupe VibAtt (en bas) Groupe noVibAtt . . . . .	167