HAL
open science

Lutherie de la guitare électrique solid body : aspects mécaniques et perceptifs

Arthur Paté

To cite this version:

Arthur Paté. Lutherie de la guitare électrique solid body : aspects mécaniques et perceptifs. Acoustique [physics.class-ph]. Université Pierre et Marie Curie - Paris VI, 2014. Français. NNT : 2014PA066461 . tel-01127562

HAL Id: tel-01127562

https://theses.hal.science/tel-01127562

Submitted on 7 Mar 2015

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

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

THESE DE DOCTORAT DE
L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Spécialité :
Acoustique

Présentée par :

Arthur Paté

Pour obtenir le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE PIERRE ET MARIE CURIE

Sujet de la thèse :

LUTHERIE DE LA GUITARE ÉLECTRIQUE *SOLID BODY* : ASPECTS MÉCANIQUES ET PERCEPTIFS

Soutenue le 16 octobre 2014

devant le jury composé de :

François Gautier, professeur à l'université du Maine	Rapporteur
Catherine Guastavino, professeur à l'université McGill	Rapporteur
Vincent Doutaut, responsable du pôle d'innovation à l'Itemm	Examinateur
Laurent Gagliardini, ingénieur de recherches à PSA	Examinateur
Vincent Martin, directeur de recherches au CNRS	Examinateur
Etienne Parizet, professeur à l'INSA de Lyon	Président du jury
Benoît Fabre, professeur à l'UPMC	Directeur de thèse
Jean-Loïc Le Carrou, maître de conférences à l'UPMC	Co-directeur de thèse

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

Pur Hedouig

Remerciements

Avant d'entamer la classique anaphore, je souhaite remercier tout d'abord les membres du jury pour avoir accepté de relire et évaluer ce travail : merci à mes rapporteurs Catherine Guastavino et François Gautier et à mes examinateurs Vincent Doutaut, Laurent Gagliardini, Vincent Martin et Etienne Parizet.

Merci à Jean-Loïc pour son dynamisme et son enthousiasme quotidiens durant ces trois ans. Merci à Benoît Fabre pour avoir su cadrer avec sagesse ce projet. Merci à Danièle Dubois pour la fraîcheur intellectuelle qu'elle a su communiquer à ce travail.

Merci également à Hugues Genevois, responsable de l'équipe LAM, pour l'intérêt qu'il a porté à notre projet et pour les multiples conversations autour de la guitare électrique. Merci à Catherine Fourcin et Pascal Le Saëc pour avoir efficacement géré les aspects respectivement administratif et informatique de mon aventure au laboratoire. Merci à Laurent Quartier pour son aide, sa disponibilité et ses idées ayant permis la réalisation de mes expérimentations. Merci à tous les autres membres de l'équipe LAM, notamment à Jean-Marc Fontaine, Michèle Castellengo et Boris Doval.

Merci aux thésards passés par le LAM : Paul, Roman, Sylvain, Indiana. Merci surtout à ma sœur Delphine (qui m'a laissé son formidable bureau (avant que je ne le cède à mon tour à Camille (merci à toi de lire ces remerciements))). Merci et bon courage au gai luron du LAM Augustin, ainsi qu'à Alexandre, Juan Pablo, Cédrik et Hugo.

Merci à Benoît Navarret, pour avoir véritablement été cet « équipier de choc », à la fois professionnellement, musicalement et humainement.

Merci à tous ceux qui ont rendu cette étude sur les guitares électriques possible, qu'il ait fallu les fabriquer (Benjamin Amosse, Valentin Bringuier, Etienne Emery, Alan Jan, Hugo Lanches, Félix Lienhard, Jean-Baptiste Lorin, François Saint-Martin, Julien Sanson, Vincent Charrier, Loïc Keranforn, Lisa Marchand, Bela Pari, Alexandre Paul, Julien Simon, Emeric Delcamp, Nicolas Gamond, Guillaume Gauny, Julien Dupont, Clovis Cruchet, Héloïse Dubrulle, Nicolas Pinateau, Florent Guesdon, Maxime Jan, Damien Chattelard, Jérémy Bart) ou les jouer (Jérôme Aellion, Yann Armellino, Olivier Aude, Jean-Pierre Bourgeois, Sylvain Choinier, Benoît Courribet, Nicolas Dauchez, Jimi Drouillard, Vincent Fournier, Laurent Gagliardini, Pierrejean Gaucher, Hugues Genevois, Miguel Henry, Jean-Louis Horvilleur, René Lebhar, Guillaume Ley, Georges Locatelli, Thibaut Meurisse, Benoît Navarret, Claude Pavy, Stéphane Rambaud, Jean-Claude Rapin, Jean-Do Sallaberry, Alban Sautour, Anthony Delloye). Merci à Yann-David Esmans, Fred Pons, Pierre Terrien, Franck Teissier et Vincent Doutaut pour avoir permis cette formidable collaboration avec l'Itemm.

Merci à Gary Scavone, Marcelo Wanderley et Hossein Mansour pour l'accueil au CIRMMT et au CAML lors de l'été 2013. Merci aussi à Daniel Fiocco, Richard Larivière, Robert et Janet Godin pour m'avoir permis de m'installer dans l'entrepôt de Baie d'Urfé pour mesurer tout ce qui avait six cordes et pas de caisse de résonance.

Merci aux collègues de conférence Diego, Benjamin, Gilles, Soizic et Thibaut.

Merci à Joël Frelat et Régis Dumoulin pour toutes nos discussions.

Merci à tous les étudiants que nous avons encadrés en projet (Rémi Blandin, Emile Blanc, Benjamin Véron, Ilya Franciosi, Arthur Aubertin, Damien Bouvier, Léo Robert, Axel Chemla, Mickaël De Andreade, Mickael Petitfourg et Paul Saint-Aubert).

Merci aux deux stagiaires qui ont travaillé sur la guitare électrique avec moi : Rémi Blandin (que Cast3m soit avec toi) et Elsa Jauffret (j'espère que tu ne perds pas ton talent dans la discipline de la patate).

Merci à Lapo et Ben pour m'avoir enrôlé dans ce projet qui démarre sur les sons de séismes.

Merci à l'Amertume, à ses membres passés, présents et futurs, pour beaucoup de choses dont la non moindre est de m'avoir maintenu sous une perfusion musicale salvatrice.

Merci à tous les éléments des catégories naturelles suivantes, dont les frontières sont nécessairement floues : « les licheurs », les « SM », les « élèves guitaristes », les « Wiener Kumpel ».

Merci à mes parents et à ma famille pour m'avoir soutenu pendant toutes ces années d'études.

Merci enfin à Sibylle pour avoir tranquillement supporté mes nombreuses plaintes.

Table des matières

Remerciements **5**

Table des matières **v**

I Introduction générale **1**

1 Introduction **3**

1.1 La guitare électrique *solid body* 4

1.1.1 Un regard sur la communauté des guitaristes électriques 4

1.1.2 L'histoire simplifiée 5

1.1.3 Une ou des guitare(s) électrique(s) ? 10

1.1.4 Comment agir de manière raisonnée et réaliste sur la lutherie ? 13

1.1.5 Sur l'influence des éléments de lutherie 15

1.1.6 La vision du mécanicien 16

1.2 Etat de l'art 17

1.2.1 Aspect électroacoustique 17

1.2.2 Aspect mécanique 18

1.2.3 Aspect perceptif 22

1.3 Positionnement de la thèse 25

1.3.1 Problématique 25

1.3.2 Hypothèses générales 26

1.3.3 Organisation du manuscrit 26

II Approche perceptive **29**

Avant-propos **31**

2 Positionnement de la démarche **33**

2.1 Les études perceptives en acoustique musicale 33

2.1.1 La psychophysique 33

2.1.2 L'analyse sensorielle 34

2.1.3 Une approche cognitive : la psycholinguistique 35

2.2 Une approche située de la perception musicale 35

2.2.1 La notion d'écologie des situations expérimentales 36

2.2.2 La perception et les catégories sémantiques naturelles 36

2.2.3 L'expression de la subjectivité : mots et discours 37

2.3 Conséquences méthodologiques 39

2.3.1 Le tri libre 40

2.3.2 La tâche de jeu et verbalisation libre 40

2.4 Positionnement de l'étude perceptive dans le cas de la guitare électrique *solid body* 41

3 Démarche expérimentale **43**
3.1 La jonction du manche au corps – Une première étude . . . 43
3.1.1 Contexte et problématique . . . 43
3.1.2 Résultats . . . 44
3.2 Le matériau de la touche . . . 45
3.2.1 Problématique . . . 45
3.2.2 Catégorisation libre . . . 47
3.2.3 Verbalisation libre en phase de jeu . . . 48

4 Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarist's perception **61**
4.1 Introduction . . . 62
4.2 Experimental methods . . . 63
4.2.1 The guitars, hardware and guitarists . . . 63
4.2.2 Listening task . . . 64
4.2.3 Free playing task . . . 66
4.3 Data processing . . . 68
4.3.1 Data from the free sorting task . . . 68
4.3.2 Verbal data . . . 68
4.4 Results . . . 71
4.4.1 Results from the listening task . . . 71
4.4.2 Results from the verbalisations . . . 74
4.5 Discussion . . . 77
4.5.1 The sound . . . 77
4.5.2 The musician-instrument interaction . . . 77
4.6 Conclusion . . . 78

5 Conclusions et perspectives sur l'étude perceptive **81**
5.1 Remarques sur les variations inter-individuelles . . . 81
5.1.1 Mots et nombre d'occurrences . . . 81
5.1.2 Les termes des guitaristes électriques . . . 83
5.2 Vers d'autres analyses du corpus . . . 84
5.2.1 Adverbes et échelles sémantiques . . . 85
5.2.2 Le « médium » . . . 87
5.3 Conclusion sur l'approche perceptive . . . 90

III Approche mécanique **95**

Avant-propos **97**

6 Predicting the decay time of solid body electric guitar tones **105**
6.1 Introduction . . . 106
6.2 An electric guitar model . . . 107
6.2.1 The guitar of the study . . . 107
6.2.2 String model . . . 107
6.3 The isolated string . . . 110
6.3.1 A model of string damping . . . 110
6.3.2 Experimental protocol . . . 111

6.3.3 Signal model . . . 111
6.3.4 Results . . . 112
6.4 The string and the guitar . . . 114
6.4.1 On the influence of the pickup . . . 114
6.4.2 Coupling the string with the structure . . . 115
6.4.3 The pickup and the string polarizations . . . 118
6.5 Accurate prediction of the decay time . . . 119
6.6 Conclusion and perspectives . . . 121

7 Ebony vs rosewood : experimental investigation about the influence of the fingerboard on the sound of a solid body electric guitar 123
7.1 Introduction . . . 124
7.2 Model . . . 125
7.3 Experimental study . . . 126
7.3.1 The two guitars of the study . . . 126
7.3.2 Experimental setup . . . 126
7.3.3 Validation of the model . . . 127
7.3.4 Observation of dead spots . . . 128
7.4 Sound differences between the two fingerboards . . . 129
7.4.1 Dead spot location . . . 129
7.4.2 Dead spot dangerousness . . . 130
7.5 Conclusion . . . 131

8 De la variabilité inter-type à la variabilité intra-type 135
8.1 Analyse modale . . . 135
8.2 Guitares de l'étude sur le matériau de touche . . . 135
8.3 Guitares de l'étude sur la jonction du manche au corps . . . 137
8.4 Vers une étude de la variabilité . . . 140

9 Evolution of the modal behaviour of nominally identical electric guitars during the making process 143
9.1 Introduction . . . 144
9.2 Overview of the experimental material . . . 145
9.2.1 The guitars . . . 145
9.2.2 The stages of the making process . . . 146
9.3 Modelling the making process . . . 147
9.3.1 Vibrations of a beam . . . 147
9.3.2 Raw necks to shaped necks (S1 → S2) . . . 148
9.3.3 Shaped necks to necks with fingerboards (S2 → S3) . . . 148
9.3.4 Raw guitars to fully-equipped guitars (S5 → S6) . . . 150
9.4 Measuring the making process . . . 151
9.4.1 Experimental protocol . . . 151
9.4.2 The ESPRIT method . . . 151
9.4.3 Finite-element model . . . 152
9.5 Results . . . 152
9.5.1 Matching experimental identification to numerical simulation . . . 152
9.5.2 Comparison of analytical models and measurements for the evolution of modal frequencies . . . 154

9.5.3 Modal frequency tracking . . . 156
9.5.4 Mass variability . . . 158
9.5.5 Modal damping tracking . . . 160
9.6 Conclusion . . . 162
9.7 Appendix 1: Data and computed values for the models and simulation . . . 163
Data and computed values for the models and simulation . . . 163
9.8 Appendix 2: Comparison between unstrung and strung guitar . . . 163
Comparison between unstrung and strung guitar . . . 163

10 Modal parameter variability in industrial electric guitar making : manufacturing process, wood variability, and lutherie decisions 167
10.1 Introduction . . . 168
10.2 Experimental method . . . 169
10.2.1 The guitars of the study . . . 169
10.2.2 Measurement protocol . . . 170
10.2.3 Modal parameter identification . . . 170
10.3 Results . . . 174
10.3.1 Modal parameters of the first two guitars . . . 174
10.3.2 Mobility curves . . . 174
10.3.3 Masses . . . 177
10.3.4 Modal frequencies . . . 178
10.3.5 Modal damping ratios . . . 180
10.4 Discussion . . . 181
10.4.1 Modal parameter variability for electric guitar as industrial objects . . . 181
10.4.2 Lutherie change vs. making process: influence on the modal parameter variability 183
10.5 Conclusion . . . 184

IV Conclusion générale 187

11 Conclusion et perspectives 189

Bibliographie 207

Annexes 209

A Caractéristiques des *Les Paul Junior* construites à l'Itemm 211

B Informations complémentaires sur les études perceptives 217
B.1 Etude préliminaire : la jonction corps/manche . . . 217
B.2 Etude de la perception du matériau de la touche . . . 217
B.2.1 Guitaristes . . . 217
B.2.2 Test d'écoute . . . 220
B.2.3 Test de jeu . . . 221

C Transcription d'un entretien 223

D Compléments sur le couplage corde-structure **233**
D.1 Contexte 233
D.2 Description modale de la structure 234
D.3 Description modale de la corde 235
D.4 Couplage de la corde et de la structure 235
D.5 Réduction à un mode de corde et un mode de structure 237
D.6 Discussion 238

E Sur la validité des mesures vibratoires **241**

F Influence de la forme de la tête et de la forme du corps **245**

G Généralisation des résultats mécaniques sur le matériau de la touche **247**

H Paramètres modaux identifiés sur les guitares des études de la touche et de la jonction manche–corps. **251**

Table des tableaux **258**

Table des figures **267**

Résumé/Abstract **268**

Première partie

Introduction générale

Chapitre 1

Introduction

En 2010, les ventes de guitare électrique (et de basse électrique) représentaient 14% du chiffre d'affaires total des distributeurs d'instruments de musique en France (15% en 2009). Si on considère le nombre d'instruments de musique vendus, la part de la guitare électrique était de 12% en 2010 et 14% en 2009 [CSFI 2010]. La guitare électrique occupe donc une place importante, tant économiquement que culturellement, d'autant plus si on considère la place de premier plan qu'elle occupe dans les musiques populaires depuis quelques décennies.

Forte d'une énorme communauté de musiciens et d'une distribution à échelle mondiale, la guitare électrique *solid body*[1] a été relativement peu étudiée scientifiquement. Les objets des études scientifiques existant suivent assez bien le schéma proposé en figure 1.1 qui représente la guitare électrique *solid body* dans un réseau où chaque élément est représenté par une boîte : guitariste, guitare (comprenant donc principalement la lutherie et l'aspect mécanique de l'instrument), traitements analogiques et numériques, amplification et restitution du signal du *pickup*. Ces deux derniers éléments constituant les aspects électronique et électromagnétique de l'instrument.

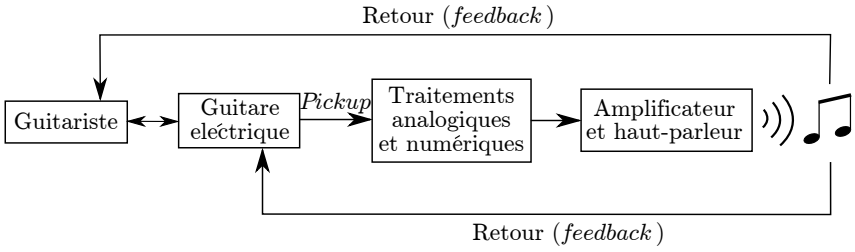


Figure 1.1 – L'environnement de la guitare électrique dans son cadre habituel d'utilisation : le jeu musical. Ce schéma est inspiré de [Lähdeoja *et al.* 2010; Paté *et al.* 2012a]. L'objet « guitare » est vu comme un élément d'un réseau comprenant l'instrumentiste, les traitements électroniques appliqués au son et le système de restitution.

Parmi les études scientifiques touchant la guitare électrique *solid body*, c'est la lutherie de l'instrument qui semble avoir le moins retenu l'attention des scientifiques. Les aspects électronique et électromagnétique de l'instrument, allant de l'étude des *pickups*[2] à celle des amplificateurs, en passant par celle des traitements du signal la plupart du temps sous forme de « pédales d'effets », ont suscité la grande majorité des études scientifiques ayant trait à l'instrument. Cela peut paraître légitime dans le sens où l'instrument est entendu à travers la restitution du signal du *pickup* par le haut-parleur, dernier maillon d'une longue chaîne électroacoustique. Or, c'est bien la vibration des cordes qui est captée par le *pickup*, et cette corde est attachée à une structure qui altère son comportement vibratoire. Ce point de vue rejoint les dires des guitaristes et luthiers, attribuant une responsabilité au moins partielle à la qualité de la lutherie et à ses divers éléments sur le son final de l'instrument.

1. Le fait de distinguer, parmi les guitares électriques, les *solid body*, qui ne possèdent pas de caisse de résonance, n'est pas anodin et nous y reviendrons.
2. Les termes techniques seront définis dans cette introduction.

Nous relions cette notion de qualité de lutherie aux éléments de lutherie. Ceux-ci sont au cœur de ce travail de thèse. Nous désignerons par « élément de lutherie » les composants ou parties mécaniques de la guitare électrique (par exemple le matériau et la forme du manche, de la touche, des frettes, du corps, etc.). Quand nous parlerons d'« étude des éléments de lutherie », nous ne parlerons pas de leur étude en tant que tels : poser une question telle que « quelle est l'influence du manche sur le son ? » reviendrait à comparer une guitare avec manche et une guitare sans manche, ce qui a peu de sens. Nous parlerons en revanche de l'étude des différentes déclinaisons des éléments de lutherie : nous poserons donc plutôt des questions telles que « quelle est l'influence du matériau du manche sur le son ? », ce qui revient à comparer une guitare ayant un manche fait dans un certain matériau à une guitare ayant un manche fait dans un autre matériau. Une approche des éléments de lutherie de la guitare électrique *solid body* est proposée selon deux chemins parallèles : un questionnement sur leur perception par le guitariste, et un questionnement sur la caractérisation mécanique de la lutherie. Les deux approches se sont développées en parallèle au cours de ce travail, elles se sont donc constamment rejointes et nourries mutuellement.

Cette introduction générale est structurée de la manière suivante : la section 1.1, après avoir proposé un aperçu des spécificités de la communauté des guitaristes électriques (nous appellerons ainsi les joueurs de guitare électrique), définit et circonscrit la guitare électrique *solid body* en tant qu'instrument, et finalement s'autorise à parler de « la » guitare électrique *solid body*. Est ensuite proposé un regard sur les éléments de lutherie, qui permet d'esquisser une vision mécanicienne de l'instrument. La section 1.2 expose ensuite un état de l'art consacré à la guitare électrique *solid body* organisé suivant trois aspects de l'instrument : l'aspect électromagnétique et électroacoustique, l'aspect mécanique et enfin l'aspect perceptif, les deux derniers héritant nécessairement de l'état de l'art concernant les instruments acoustiques à cordes pincées. Finalement, la section 1.3 énonce la problématique de la présente thèse, les questions liées et notre démarche pour y répondre, ainsi que certaines hypothèses d'un point de vue mécanique.

1.1 La guitare électrique *solid body*

L'objet de l'étude de cette thèse est la guitare électrique *solid body*. Peu étudiée par les acousticiens et les psychologues, il a semblé nécessaire de la définir dans les champs de la pratique instrumentale et de l'organologie (il s'agit de l'étude des instruments de musique resitués dans une perspective historique). La section 1.1.1 présente la communauté des guitaristes électriques et les spécificités de ceux-ci. La section 1.1.2 résume l'histoire de l'instrument et montre entre autres qu'un certain nombre de modèles de guitares électriques coexistent. La section 1.1.3 propose la vision d'un marché de la guitare électrique équilibré entre deux pôles qui sont deux modèles canons de guitare électrique *solid body* : la *Fender Stratocaster* et la *Gibson Les Paul*. Cela nous permet de définir précisément « la guitare électrique », d'exposer la solution que nous avons choisie pour mener une étude expérimentale de la guitare électrique *solid body* et de ses éléments de lutherie (section 1.1.4), de développer la notion d'élément de lutherie comme notion chère aux musiciens et aux luthiers (section 1.1.5), puis d'introduire la vision mécanicienne de l'instrument comme un système couplant cordes et structure (section 1.1.6).

1.1.1 Un regard sur la communauté des guitaristes électriques

Les musiciens utilisant la guitare électrique *solid body* forment une communauté d'apparence hétérogène. En effet, on note une multiplicité de styles musicaux employant de manière systématique ou au moins régulière la guitare électrique : *blues, country, rock, jazz, funk, soul, hard rock, heavy metal, punk, pop, progressive rock, fusion*, pour ne citer que les principaux. Ceci implique forcément une prolifération de techniques de jeu, de manières d'appréhender l'instrument, de manières d'utiliser les effets et moyens

d'amplification, etc. Les moyens de transmission et de pédagogie autour de la guitare électrique sont également très divers et renforcent la variété de styles et techniques. En effet, comme le montre le tableau 1.1, la guitare électrique est encore un instrument sous-représenté dans les conservatoires français. L'apprentissage se déroule donc plutôt par voie orale et par mimétisme : il est courant d'apprendre par l'imitation des grands guitaristes, que ce soit en tentant de reproduire ce qu'on entend sur des enregistrements audios (bandes, disques, puis formats numériques), ce qu'on voit en concert, ou en suivant les conseils prodigués par les magazines [3], ouvrages ou vidéos pédagogiques proposés par des guitaristes et/ou pédagogues reconnus (par exemple [Rébillard 1999; Godin 1998]).

La communauté des guitaristes électriques ne semble pas présenter la même homogénéité que celle d'instruments plus « classiques » tels la guitare classique ou le violon. Ceci s'explique en partie par le caractère récent de l'instrument (la guitare électrique n'a que quatre-vingts ans, et la *solid body* guère plus de soixante ans), et par les styles musicaux populaires dont elle est le vecteur [Paté *et al.* 2012a]. Nous verrons lors de l'étude perceptive que les guitaristes électriques présentent tout de même des régularités, tout du moins dans leur ressenti [4].

Table 1.1 – Nombre de conservatoires français proposant l'enseignement de la guitare électrique au cours de l'année scolaire 2013–2014. D'après la base de données du « guide pratique de la musique » de la Cité de la musique, disponible à l'adresse http://mediatheque.cite-musique.fr/masc/

	Conservatoire à rayonnement municipal	Conservatoire à rayonnement départemental	Conservatoire à rayonnement régional
Guitare électrique	85	24	3
Guitare classique	301	97	39
Violon	308	100	39
Piano	309	101	37

1.1.2 L'histoire simplifiée

Ce manuscrit n'étant pas un travail d'organologie, on s'attachera ici à dresser un historique succinct et peut-être parfois un peu trop schématique de l'histoire de la guitare électrique. De nombreux ouvrages traitent de l'histoire de l'instrument et le présent résumé s'inspire très largement de [Navarret 2013a; Séguret 2002; Paté *et al.* 2012a; Dumoulin & Simon 2008; Charle 1998]. Davantage d'informations peuvent être trouvées dans [Duchossoir 1991 1994; Carter 2007; Iwanade & McCarty 1998].

L'idée d'électrifier la guitare pour en augmenter la puissance sonore remonte sans doute aux années 1920. En effet, l'essor des musiques *blues* et *jazz* amène les guitaristes à jouer au sein d'orchestres comportant des instruments au volume sonore bien plus élevé, batterie et cuivres notamment. Certaines solutions ont été envisagées pour augmenter la puissance sonore de la guitare : emploi systématique de cordes métalliques, utilisation de résonateurs en métal (songeons au marques *National* et *Dobro* à la

3. Citons par exemple les magazines *Guitar Part* ou *Guitarist Magazine* en France, *Guitar World* aux Etats-Unis, ou encore *Total Guitar* au Royaume-Uni

4. Nous nous permettrons dans ce travail cette licence à la langue en employant le mot « ressenti » comme un substantif, bien qu'il soit répertorié dans les dictionnaires comme un adjectif dérivant d'un participe passé. L'usage du mot « ressenti » en tant que substantif, attesté dans la littérature traitant de la perception de stimuli acoustiques [Guastavino 2003; Morel 2005; Cance 2008], permet à notre sens de considérer les aspects sensoriels couverts par le mot « perception », mais aussi les aspects cognitifs.

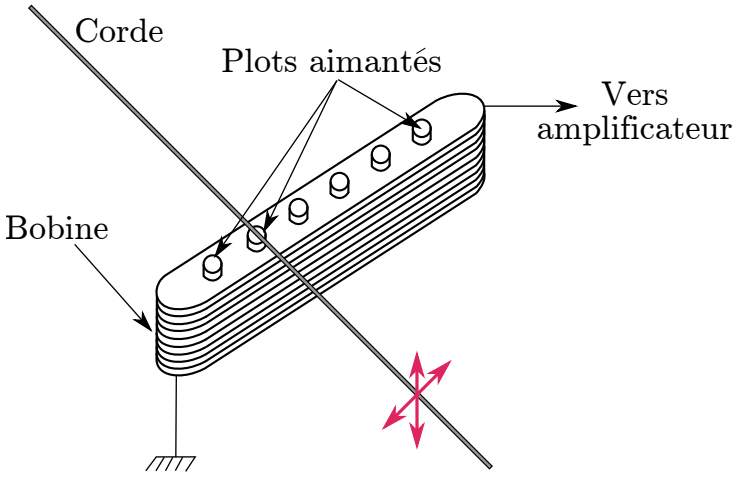


FIGURE 1.2 – Schéma de principe du *pickup* électromagnétique. Des plots aimantés génèrent un champ magnétique permanent. Ce champ est perturbé par le mouvement des cordes de la guitare (une seule est représentée pour des raisons de clarté) : la variation de flux au travers de la bobine induit un courant au sein de celle-ci. Ce courant est le signal de sortie du *pickup*.

fin des années 1920), utilisation de tables d'harmonie plus grandes [Charle 1998], augmentation de la tension des cordes couplée à l'utilisation de tables d'harmonie soit plates avec un barrage en « X » (par le constructeur *Martin*) soit bombées (conception dite *archtop*, par le constructeur *Gibson*) pour une meilleure résistance [Charle 1998]. L'innovation la plus saillante, et qui peut marquer la naissance de la guitare électrique, est l'ajout de capteurs électromagnétiques (ou *pickup*[5]) sur les guitares. Bien qu'une quantité considérable de *pickup* électromagnétiques[6] ait été conçue, produite et vendue depuis la moitié du XXe siècle, le principe de fonctionnement est resté relativement inchangé : une rangée d'aimants crée un champ magnétique permanent, que le mouvement des cordes en matériau ferro-magnétique vient perturber. La variation du flux magnétique au travers de la bobine de cuivre ceignant cette rangée d'aimants crée aux bornes de la bobine une tension image de la vitesse de la corde. C'est cette tension qui est ensuite acheminée vers l'amplificateur. La figure 1.2 schématise ce fonctionnement. Si elle n'est pas la première guitare électrifiée (il y a notamment l'exemple de la *"Frying pan"* du constructeur *Rickenbacker*[7] en 1931), la *ES-150* du constructeur *Gibson* est au moins la première guitare électrique largement diffusée. Nous sommes en 1936. Reprenant les dernières évolutions de la guitare (table bombée *archtop* et cordes en acier), la société *Gibson* a muni cette guitare d'un capteur électromagnétique appelé *Charlie Christian pickup* en hommage au guitariste de jazz l'ayant popularisée. Cette guitare marque le début de la longue tradition des guitares électriques *hollow-body* : le corps est encore creux, l'appellation « caisse de résonance » est encore justifiée. D'autres guitares illustres suivront cette voie, jusqu'à nos jours, citons pour fixer les idées et sans prétention à l'exhaustivité quelques modèles de guitare électrique *hollow body* : l'*ES-175* de *Gibson* en 1949, l'*ES-335* de *Gibson* en 1958, la *6120* de *Gretsch* en 1954, ou bien la *360* de *Rickenbacker* en 1958.

Or, très vite s'est posé le problème du *feedback* lorsque les guitaristes nouvellement électrifiés jouaient à fort volume. En effet, le classique effet « Larsen » était devenu courant sur scène : la table d'harmo-

5. Ce manuscrit préfèrera l'emploi du terme anglais *pickup*, afin d'éviter certaines confusion pouvant apparaître avec l'emploi du français « microphone ». En effet, le *pickup* électromagnétique de guitare électrique n'est pas un capteur de pression acoustique, mais de perturbation de champ magnétique induite par les oscillations des cordes.

6. D'autres technologies ont été également utilisées, comme par exemple des capteurs optiques ou fonctionnant sur le principe de piézo-électricité, mais le principe électromagnétique est de loin la technologie dominante.

7. A l'origine, la marque s'appelait *Rickenbacher*.

nie est excitée mécaniquement par le rayonnement acoustique des haut-parleurs, ceci créant une boucle acoustique conduisant parfois à des sifflements très désagréables. Encore une fois, l'idée était dans l'air du temps (voir encore la *« Frying pan »* de *Rickenbacker* ou la « *The log* » de Les Paul au début des années 1940), mais c'est à l'ingénieur Leo Fender qu'on doit la première guitare électrique *solid body* produite à grande échelle : ce qui deviendra la *Telecaster* voit le jour en 1949 [8] [Navarret & Séguret 2011]. Comme le nom l'indique, la guitare *solid body*, à l'instar de la *Telecaster* (voir figure 1.5a), est faite d'un corps plein, c'est-à-dire sans caisse de résonance : l'indésirable effet « Larsen » est atténué. C'est la même société *Fender* qui produira à partir de 1954 celle qui deviendra la « reine des guitares électriques » : la *Stratocaster* (figure 1.3), qui est conçue comme une amélioration de la *Telecaster* avec une ergonomie plus aboutie et un chevalet mobile offrant la possibilité de jouer avec les effets de « vibrato » et l'ajout d'un troisième *pickup*.

Résolument ingénieur, Leo Fender n'est pas luthier et organise la conception et la production de ses guitares *solid body* selon des principes de rationalité industrielle et de facilité d'assemblage et de réglage :

- vissage du manche au corps ;
- pas de renversement (inclinaison) du manche par raport au corps ou de la tête par rapport au manche ;
- découpe du corps sans chanfrein ;
- table (partie faciale du corps) plate ;
- chevalet à pièces mobiles, permettant de concentrer la plupart des réglages.

Gibson, un des chefs de file de la production de guitares acoustiques (dites aussi « guitares *folk* ») et électriques *hollow body*, ne demeure pas en reste pendant très longtemps, car en 1952 sort une guitare qui s'imposera comme une référence au même titre que la *Stratocaster* : la *Les Paul* (figure 1.4) [Navarret 2013b]. Au contraire de *Fender*, qui a recherché dès le début à rationaliser la production et à simplifier toutes les étapes de construction, *Gibson* souhaite que la *Les Paul* apparaissent comme un objet digne de la longue tradition de savoir-faire de luthier dont bénéficie la marque. *Gibson* tient là son originalité avec une *solid body* haut de gamme. Le savoir-faire des employés de *Gibson* permet de construire une guitare plus raffinée, ce qui n'est pas l'objectif de *Fender* : la *Les Paul* comporte une table rapportée et bombée en érable sur un corps en acajou (qui est un bois noble en lutherie), un manche collé (qui demande plus de savoir-faire qu'un manche vissé), ainsi qu'un manche et une tête renversés (inclinés l'un par rapport à l'autre, ce qui nécessite une phase de réglage). Cette image de guitares plus raffinées tiendra à *Gibson*, même si assez rapidement les machines ont permis d'automatiser également la production des guitares *Gibson*.

Nombreux seront les modèles de guitare *solid body* fabriqués par ces deux constructeurs pionniers. Pour *Fender* citons :

- la *Jazzmaster* en 1958 proposant pour la première fois chez *Fender* une touche en palissandre ;
- la *Mustang* en 1964.

Pour *Gibson* citons :

- la célèbre *SG* en 1961 (et jusqu'en 1963 appelée encore *Les Paul model*) ;
- l'*EDS-1275* à double-manche (l'un à six cordes et l'autre à douze cordes) ;
- l'*Explorer* aux formes osées en 1958 ;
- la *Flying V* aux lignes fermements futuristes en 1958 également.

Des photographies de ces modèles sont montrées en figure 1.5 [9].

8. Le prototype du modèle *Esquire* date de 1949. L'*Esquire* sera produite et distribuée à partir de 1950, elle deviendra *Telecaster* en 1951.

9. Les adresses où peuvent être trouvées ces photographies sont :

a) http://en.wikipedia.org/wiki/Fender_Telecaster

b) http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/1965_Fender_Jazzmaster_(by_Vacant_Fever).jpg

c) http://en.wikipedia.org/wiki/Fender_Mustang#mediaviewer/File :1998FenderMustangVintageWhite.jpg

FIGURE 1.3 – Photographie d'un exemplaire de la série *Plus* du modèle *Stratocaster* de la marque *Fender*.

FIGURE 1.4 – Photographie d'un exemplaire de la série *Custom* du modèle *Les Paul* de la marque *Gibson*.

FIGURE 1.5 – Exemples de modèles de guitare électrique *solid body*. Le nom du fabricant et du modèle est inscrit sous chaque photographie. Toutes les photographies sont sous licence *Creative Commons 2.0* et leur adresse est renseignée en note de bas de page numéro 9.

a) *Fender Telecaster*

b) *Fender Jazzmaster*

c) *Fender Mustang*

d) *Gibson SG*

e) *Gibson EDS-1275*

f) *Gibson Explorer*

g) *Gibson Flying V*

h) *Steinberger Synapse Demon*

De nombreuses marques se sont ensuite engagées dans la brèche *solid body* initiée par *Fender* et *Gibson*. Citons sans prétendre à l'exhaustivité : les américains *Rickenbacker*, *Gretsch*, *Epiphone*, les britanniques *Burns* et *Vox*, l'allemand *Höfner*, le suédois *Hagstrom*, l'italien *Eko*, le français *Jacobacci*, les japonais *Ibanez*, *Yamaha*, *Tokai* et *Aria*. Ces derniers ont commencé leur production de *solid bodies* par la réalisation de copies des guitares américaines créées par *Fender* et *Gibson*. Parmi les constructeurs étant apparus plus récemment, citons les américains *Parker* et *Steinberger* qui se démarquent à la fois par leurs dessins innovants (la série *Synapse* de *Steinberger* propose des guitares sans tête, voire figure 1.5h) et par l'emploi de matériaux tels que le carbone ou le graphite, les américains *Schecter*, *Paul Reed Smith*, *B. C. Rich*, *Jackson*, *Dean* et *Music man*, les français *Vigier* et *Lag*, le japonais *ESP*, le coréen *Cort* ou encore le canadien *Godin*.

Tous les fabricants cités précédemment ont la particularité d'être des industriels assurant une production de masse de leurs instruments. Par exemple, l'entreprise *Godin guitars* a une production annuelle d'environ 50 000 guitares électriques [10]. C'est peut-être en ceci que la guitare électrique *solid body* se démarque de la manière la plus radicale de la plupart des autres instruments de musique : dès son origine, elle a été conçue pour être produite en série. Le constructeur *Fender* a délibérément choisi de simplifier au maximum l'objet « guitare », afin de faire produire ses instruments à la chaîne par des ouvriers non forcément formés aux techniques et savoir-faire des luthiers. La *Telecaster* est en effet de conception simpliste et d'aspect brut (la guitare sera surnommée « la pelle », « la planche » ou « la pagaie » par ses détracteurs !). La réalisation de guitares électriques *solid body* est possible à moindres coûts : main d'œuvre peu qualifiée, matériaux pas forcément considérés comme « nobles » en lutherie traditionnelle, formes et assemblages rudimentaires garantissent la réussite d'une production de masse.

L'expansion planétaire des musiques populaires issues du *blues* et du *rock 'n' roll*, la starification des interprètes de ces musiques, et la production de masse couplée à la distribution à l'échelle mondiale des guitares électriques *solid body* qui permet à chacun de s'identifier aux *guitar heroes* (hérauts ?), renforcent la domination de l'industrie sur l'artisanat dans le domaine de la guitare électrique *solid body*. Une pratique minoritaire chez les guitaristes électriques consiste néanmoins à travailler avec un luthier artisan [11]. Parmi les apports de la collaboration avec un luthier, on peut citer :

- la possibilité de réaliser un *design* original ;
- la possibilité de formuler des commandes spécifiques et de personnaliser ses instruments (notamment obtenir des variantes non disponibles sur le marché) ;
- la possibilité de se faire construire des instruments sur mesure ;
- la possibilité de se faire construire des copies d'instruments industriels, avec l'assurance d'une qualité artisanale.

1.1.3 Une ou des guitare(s) électrique(s) ?

Ce paragraphe pose la question de la diversité de l'offre sur le marché de la guitare électrique *solid body* et de la multitude d'éléments de lutherie disponibles. Au vu de l'apparente hétérogénéité des modèles, peut-on arriver à dégager un modèle typique à étudier, sur lequel les résultats scientifiques obtenus pourraient être généralisés ?

d) http://en.wikipedia.org/wiki/Gibson_sg
e) http://en.wikipedia.org/wiki/Gibson_EDS-1275
f) http://en.wikipedia.org/wiki/Gibson_Explorer
g) http://commons.wikimedia.org/wiki/File :Epiphone_flying_v_guitar_svg.svg
h) http://commons.wikimedia.org/wiki/File :Steinberger_Synapse_Demon_TranScale_SD-2FPA.jpg

10. Communication personnelle du responsable de la lutherie et du *design* à *Godin guitars*.

11. Une liste de luthiers de guitares électriques est proposée par la page http://www.laguitare.com/2009_regluth1.php-?pays=1&cat=9&id_page=1 , consultée le 30 juin 2014.

Ainsi qu'illustré notamment au travers de la figure 1.5, la multiplicité des modèles semble montrer que la lutherie de guitare *solid body* est d'une grande diversité. Sans faire mention de l'offre immense en terme de *pickups* et de cordes, la lutherie de guitare électrique *solid body* apparaît dévoiler une remarquable variété et une apparente non-standardisation, contrairement à la lutherie de guitare classique par exemple. Quelques éléments de lutherie offrant des différences notables sont [Navarret 2013a] :

- les formes, particulièrement de corps et de tête : l'imagination semble sans limite dans le *continuum* allant des formes somme toute classiques de la *Les Paul* aux lignes futuristes de la *Flying V*, en passant par les courbes anguleuses des *B. C. Rich* ;
- les profils de manche (la forme de l'arrière du manche sur laquelle se pose la paume de la main gauche, dans le cas d'un guitariste droitier) ;
- le mode de jonction du manche au corps, par vissage, collage, ou construction du manche et du corps dans une même pièce de bois (ou de matière synthétique, par moulage) ;
- les essences de bois utilisées : érable, acajou, palissandre, ébène, tilleul, peuplier, frêne, aulne, noyer, contreplaqué, bouleau, marronnier, aluminium, acier, etc. ;
- les frettes : le détaillant spécialisé américain Stewart McDonald [12] ne propose pas moins de 11 types de frettes, différant par leur géométrie (excursion en-dehors de la touche, forme, largeur), il faut ensuite compter sur les variations offertes par toutes les sortes d'alliages métalliques pouvant être proposés ;
- le sillet, qu'il soit en os, en *tusq* [13], en plastique ou en métal ;
- le chevalet qui peut être fixe ou « flottant » (par exemple le vibrato des *Stratocaster*), faisant passer les cordes au travers du corps (*Stratocaster*), par un cordier (chevalet *tune-o-matic* associé au cordier *stop tailpiece* des *Les Paul*), ou autour du chevalet (chevalet *wrap-around* des premières *Les Paul*).

Parmi cette multitude de modèles et de constructeurs, les marques *Fender* et *Gibson* ont néanmoins su s'imposer comme chefs de file des constructeurs de guitares électriques *solid body*, et ont réussi à contraindre la concurrence à imiter les deux canons de la guitare électrique que sont la *Stratocaster* et la *Les Paul*. [Dumoulin & Simon 2008] livrent une analyse pertinente de la création et de l'affirmation du duopôle *Fender/Gibson* : nous la suivons dans ce paragraphe. Les clefs de la réussite et de l'ancrage de ces deux marques ne sont pas à chercher dans un équipement compétitif (tous les constructeurs disposent des mêmes types de machines, des mêmes ouvriers qualifiés ou non) et surtout pas dans une stratégie privilégiant l'innovation à tout prix (les fondamentaux de la facture de la *Stratocaster* et de la *Les Paul* n'ont pratiquement pas évolué depuis le milieu des années 1950 [Navarret 2013a]). Elles sont à mettre sur le compte de ce que [Dumoulin & Simon 2008] nomment les « ressources intangibles » accaparées par les entreprises *Fender* et *Gibson*. Ces ressources regroupent ce qui a trait à l'image des marques, à l'imaginaire des clients. Il est frappant de constater que *Fender* et *Gibson* ont lancé et imposé la guitare électrique *solid body* contemporainement à l'avènement d'un genre musical révolutionnaire : le *rock 'n' roll*. Témoin d'une époque socialement agitée, le *rock* bouleverse les repères musicaux, particulièrement la diffusion de la musique qui se fait à présent à l'échelle planétaire, et la starisation des musiciens, notamment des guitaristes, s'exerce à un point jamais atteint.

> *Parler du rock, c'est parler de la guitare électrique. Tout le monde a en tête les postures des stars du rock, le corps à corps avec l'instrument, ou les riffs, plaisants ou non pour les oreilles, des grands morceaux de l'histoire du rock* ([Mignon 1998], page 28)

> *Avec les années soixante, le rock 'n' roll, devenu rock, devient synonyme de groupe à guitare(s).* ([Mignon 1998], page 28)

12. http://www.stewmac.com/
13. http://www.graphtech.com/products/brands/tusq/tusq-guitar-nuts

Les groupes à succès sont aussi bien identifiés par leur musique et leurs frasques que par les guitares qu'ils utilisent, quasi-exclusivement de marque *Fender* ou *Gibson* dans les années 1950 et 1960. Ils contribuent à forger la légende dont ces deux ogres ne se départiront jamais. [Dumoulin & Simon 2008] décrivent cette époque comme la période où sont réunies des « conditions initiales non-reproductibles » : les problèmes technologiques (amplification sans effet *Larsen* par exemple) et sociaux-musicaux ont été résolus au pied levé par les deux industriels, qui ont su imposer leurs guitares et les faire devenir mythiques au point de se constituer un avantage concurrentiel définitif. Même copiés par les marques japonaises comme *Aria*, *Ibanez* ou *Yamaha*, qui tirent les prix vers le bas, qui défient les références américaines en terme de qualité de lutherie, qui innovent certainement davantage au niveau de la technologie (les modèles de référence que sont la *Stratocaster* et la *Les Paul* auraient même vocation à ne surtout pas évoluer sous peine de perdre leur statut d'icône indiscutée), *Fender* et *Gibson* gardent aux niveaux facture et économie une suprématie issue d'un « âge d'or » révolu mais figeant encore les routines du monde de la production industrielle (c'est-à-dire de la majorité de la production) de guitares électriques *solid body*. Les concurrents de *Fender* et *Gibson*, si nombreux et performants qu'ils soient, ne bénéficient pas de l'aura des modèles historiques américains : le guitariste actuel aura même tendance, pour se dépêtrer de l'offre colossale d'instruments disponible de nos jours, à trouver refuge dans des « valeurs sûres » : il achètera *Fender* ou *Gibson*.

Ainsi, il est sans doute fondé organologiquement, économiquement, socialement, culturellement, industriellement et musicologiquement, de ramener l'étude de la guitare électrique *solid body*, instrument *a priori* hautement polymorphe, aux deux modèles canoniques que sont la *Fender Stratocaster* et la *Gibson Les Paul*. Le tableau 1.2 rappelle les principales spécifications de ces deux modèles, d'après [Navarret 2013a]. Notons que seules les caractéristiques les plus courantes sont rappelées dans ce tableau (ainsi par exemple le tableau 1.2 ne considère pas les modèles plus rares de *Stratocaster* ayant un corps en acajou ou en peuplier). Pour le sélecteur à 5 positions de la *Stratocaster* (apparu en 1977), le fait de séparer chevalet et cordier pour la *Les Paul* (1955), les *pickups* à double-bobinage [14] (inventé en 1957) équipant les *Les Paul*, ces spécifications ne sont pas des modèles d'origine, mais des modèles les plus répandus et copiés.

Si elle n'était pas *a priori* évidente, la réduction du grand nombre de guitares électriques *solid body* à seulement deux guitares emblématiques correspond pleinement à une réalité. En tant qu'instrument autonome du point de vue organologique (la guitare électrique a bel et bien suivi un chemin différent des guitares classique et acoustique), et déterminé via les références aux deux canons (*Stratocaster* et *Les Paul*) du point de vue lutherie, et si tant est que le scientifique veuille s'attarder dessus, la guitare électrique *solid body* nécessite un cadre d'étude prenant en compte ses particularités.

La représentation collective des guitaristes électriques est marquée par cette opposition entre le schéma *Fender* et le schéma *Gibson* [Navarret 2013a] : chaque guitariste possède en sa mémoire des représentations (soit forgées par l'expérience, soit forgées par l'imaginaire collectif) des sonorités attribuées aux deux schémas. Or, comme le montre le tableau 1.2, les deux schémas diffèrent en de nombreux éléments de lutherie. La représentation collective des guitaristes électriques pousse à considérer — sans doute à juste titre — chaque élément de lutherie comme ayant une influence sur le son, et les différences sonores entre *Fender* et *Gibson* sont sûrement dues à une combinaison de tous ces éléments de lutherie.

14. Ou encore appelés « *humbuckers* », ils constituent une variante du *pickup* à simple-bobinage présenté en figure 1.2 en ceci qu'ils disposent de deux rangées d'aimants et de deux bobines. L'inversion des polarités magnétiques et des sens de bobinage permet d'obtenir un plus grand niveau électrique de sortie et de réduire les bruits issus des perturbations électromagnétiques de l'environnement.

TABLE 1.2 – *Fender Stratocaster* et *Gibson Les Paul* : les deux modèles de référence de guitare électrique *solid body* comparés selon leurs principaux éléments de lutherie. Ce tableau considère les modèles les plus courants.

		Fender Stratocaster	*Gibson Les Paul*
Cordes	« diapason » (longueur vibrante)	64, 8 cm 25, 5 in	62, 9 cm 24, 75 in
Manche	matériau	érable	acajou
	jonction au corps	vissé	collé
	renversement	non	oui
	nombre de pièces	1	1
	sens de coupe du bois	dosse	quartier
	profil (forme)	« V », « D », « C »	« D », « U »
Touche	matériau	érable ou palissandre	palissandre ou ébène
	jonction au manche	même pièce de bois (érable) ou rapportée/collée (palissandre)	collée
	nombre de frettes	21 ou 22	22
Corps	matériau	frêne ou aulne	acajou
	forme	asymétrique	quasi-symétrique
	échancrures	2	1
	nombre de parties	2	2 ou 3
	table rapportée	non	oui (érable, en 2 ou 3 pièces)
Pickups	nombre	3	2
	type	simple-bobinage	double-bobinage
Contrôles électroniques	boutons de volume	1	2
	boutons de tonalité	2	2
	nombre de positions du sélecteur	5	3
Tête	matériau	érable	acajou
	forme	asymétrique	symétrique
	nombre de parties	1	3 ou 5
	jonction au manche	même pièce de bois	collée
	renversement	non	oui
Chevalet	type	mobile (flottant)	fixe

1.1.4 Comment agir de manière raisonnée et réaliste sur la lutherie ?

Ce qui a été dit sur les spécificités notamment organologiques de la guitare électrique *solid body* doit guider notre étude : nous devons étudier des objets qui sont identifiés comme des guitares électriques à la fois par le musicien, par le luthier et par le mécanicien. Même dans la démarche analytique d'étude des éléments de lutherie qui est la nôtre, nous choisissons de ne pas étudier des objets qui seraient des caricatures simplistes de guitare.

Une collaboration avec des luthiers qui réalisent de véritables instruments adaptés à nos problématiques a donc été mise en place. Nous avons travaillé en association avec l'Itemm (Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique), qui propose entre autres une formation de haut niveau en lutherie de guitare électrique. Chaque apprenti-luthier réalise lors de son cursus de BMA (diplôme « Brevet des Métiers d'Art ») une guitare électrique répondant à un cahier des charges strict issu d'un programme pédagogique. Aux spécifications de l'instrument que le luthier doit apprendre à produire et reproduire a été ajoutée la possibilité de faire varier un paramètre de lutherie. Le choix de l'élément de lutherie variant s'est fait en concertation avec l'équipe pédagogique du département guitare de l'Itemm (constituée de Yann-David Esmans, Fred Pons et Pierre Terrien). Ainsi notre travail de recherche a pu s'appuyer sur trois lots (un par an) de guitares de conception et construction identiques : neuf guitares différant par le mode de jonction du manche au corps, six guitares différant par le matériau de la touche, et six guitares différant par le nombre de parties constituant le corps. La bonne facture de ces instruments est validée par les formateurs de l'Itemm, qui sont des luthiers reconnus. Nous avons pu bénéficier de guitares de très bonne qualité constituant des exemples typiques de notre objet d'étude.

A l'exception du chapitre 10, les guitares étudiées dans cet ouvrage proviennent de l'Itemm et sont, par décision pédagogique de l'Itemm, des copies du modèle *Gibson Les Paul Junior DC*[15], ce qui leur confère une validité dans les champs organologique et économique. Un schéma de ces guitares peut être vu en figure 1.6, et leurs caractéristiques principales sont récapitulées en annexe A.

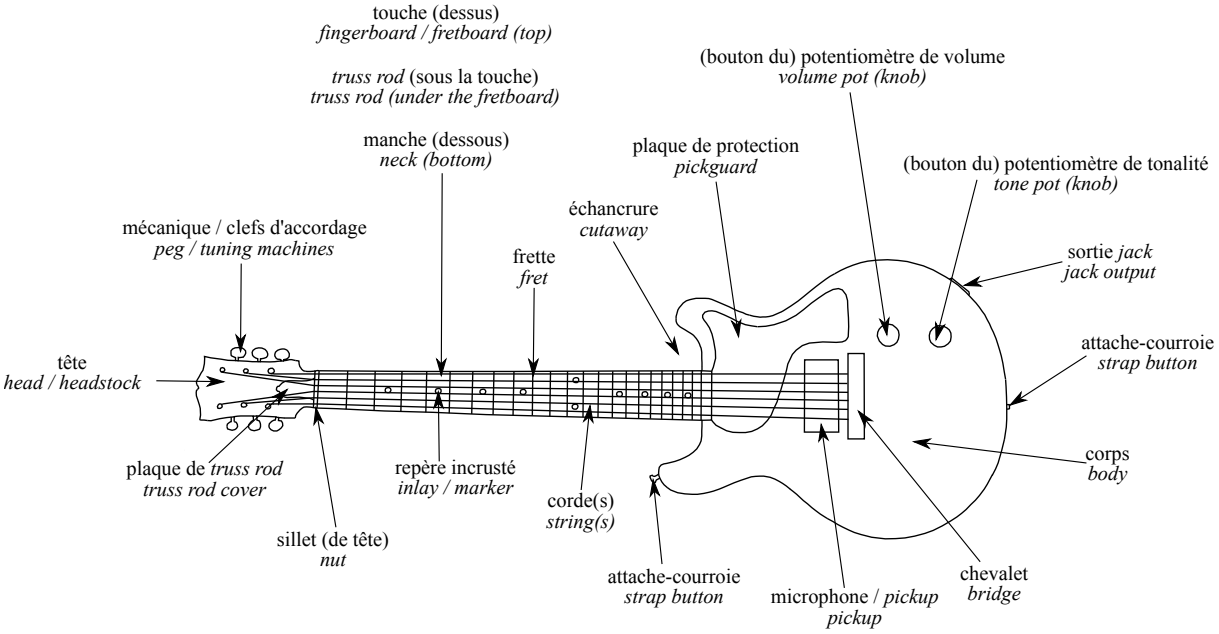


FIGURE 1.6 – Schéma d'une guitare électrique *solid body* (géométrie et équipement inspirés de la *Les Paul Junior* de *Gibson*) et dénomination de ses principaux composants (ligne du haut : dénomination en langue française, ligne du bas : dénomination en langue anglaise). Cette guitare n'ayant qu'un seul *pickup*, elle ne possède pas de sélecteur de *pickups*. Cet objet permet, le cas échéant, de choisir à tout moment quel *pickup* est relié à la sortie *jack* de la guitare.

15. DC est l'abréviation de *double cutaway* et désigne une guitare à deux pans coupés, c'est-à-dire à deux échancrures. Pour exemple, la *Stratocaster* de la figure 1.3 a un pan coupé et la *Les Paul* de la figure 1.4 en a deux. Cette construction permet notamment un meilleur accès aux notes aigues par la main gauche.

1.1.5 Sur l'influence des éléments de lutherie

La figure 1.6 schématise une *Gibson Les Paul Junior DC*, qui est, nous l'avons vu, un modèle typique de guitare électrique *solid body*. En figure 1.6 sont représentés les principaux éléments de lutherie de cette guitare (et en réalité de quasiment toutes les guitares électriques *solid body*), avec leurs dénominations française et anglaise.

L'élément de lutherie est l'objet questionné dans cette étude, car il est considéré comme déterminant la qualité de l'instrument. En particulier, chaque élément de lutherie est connu par les guitaristes et les luthiers pour avoir une influence sur le son de la guitare électrique *solid body*. L'aspect qui nourrit l'expérience et l'imaginaire des guitaristes et luthiers est en particulier l'influence de la variation d'un élément de lutherie. Afin de montrer l'importance qui est attribuée aux éléments de lutherie, ainsi que les croyances (justifiées ou non) qui gravitent autour, nous nous permettons quelques citations issues principalement de forums consultables sur l'internet, car c'est là une des principales sources d'information sur cette thématique auxquelles a accès le guitariste ordinaire :

> *[A]vec [une] touche érable vous obtiendrez un son plus précis, brillant dans les médium-aigus, plus "claquant" avec une meilleure vibration et un toucher très agréable pour les vibratos et le "bending" bluesy, les qualités que l'ont retrouve dans l'ébène en bois brut. La touche palissandre est plus polyvalente mais répond à d'autres exigences de jeu en particulier le toucher qui est très différent car le bois est brut ou huilé, idéal pour le jeu rapide en solo avec des démanchés fréquents. La touche palissandre offre un son plus chaud, un meilleur "sustain" en son saturé, un son plus rond, des basses plus présentes et prononcées que sur un manche érable vernis.* [16]
>
> *[mise en forme par nos soins] Le bois du corps donnera des sons très différents d'une guitare à l'autre, voici un petit descriptif :*
> - *l'aulne : très populaire car assez économique, poids léger. Le son qui en résulte est riche avec beaucoup de grave et m[é]dium ;*
> - *le frêne : bois dur à travailler qui donne un son brillant et du sustain ;*
> - *le tilleul : son riche et brillant ;*
> - *l'acajou : bois avec un son chaud avec fort m[é]dium (Gibson l'utilise pour ses Les Paul) ;*
> - *l'érable : assez rarement utilisé ;*
> - *le noyer : un bois de haute qualité pour des guitares de haute qualité... etc.* [17]
>
> *Ensuite le manche, collé, vissé ou conducteur. [L]e vissé c'est le moins cher, moins compliqué, et pas forcément le moins bien (Fender), [c]ollé ben c'est collé, ca donne plus de sustain, plus de gueule aussi ([G]ibson), et conducteur, le manche traverse le corps, jusqu'a l'at[t]ache[-]courroie, g[é]n[é]ralement des gratte[s] pour le métal ([Sc]hecter, certaines [ESP]), et l[à] tu as un sustain de folie.* [18]
>
> *Conventional wisdom holds that the neck through body gives the longest sustain and the bolt-on neck gives the shortest.* [French [2009], p. 81]

On voit donc que l'influence des différentes déclinaisons d'un composant (du bois du corps pour la première citation, et du mode de jonction entre le corps et le manche dans la deuxième citation) de la guitare paraît clairement identifiée par les guitaristes. Nous ne nous intéresserons dans un premier temps non à l'influence de l'ajout de tel ou tel élément de lutherie (qui n'a pas forcément de sens pour le guitariste qui utilise des instruments achevés), mais à l'influence d'un changement de matériau ou de

16. http://www.franceguitare.fr/fiches-pratiques-lutherie-fender/caracteristiques-des-manches-de-guitare-fender.html, consulté en ligne le 26 juin 2014
17. http://www.guitariste.com/guides/choisir-sa-guitare-electrique,1108,1.html, consulté en ligne le 26 juin 2014
18. http://www.tabs4acoustic.com/forum-guitare/une-bonne-guitare-cest-quoi-t1039.html#entry19804, consulté en ligne le 26 juin 2014

forme d'un élément de lutherie précis, avec l'objectif de vérifier les « on-dit » sur la lutherie de la guitare électrique *solid body*. Sont donc à comparer par exemple les influences respectives de plusieurs formes de corps, de plusieurs essences de bois utilisées pour la touche, du mode de jonction du manche au corps ou de la forme de la tête, tous les autres éléments étant laissés inchangés par ailleurs. Ceci semble pertinent à la fois pour les luthiers et pour les musiciens.

1.1.6 La vision du mécanicien

Ce paragraphe donne un aperçu de la vision de l'instrument que nous proposerons dans l'approche mécanique des éléments de lutherie. Cette vision est inspirée par l'état de l'art, et aide donc à la lecture de la section 1.2. Dans cette vision mécanicienne, la corde (les phénomènes sont identiques pour chacune des six cordes), dont le comportement théorique est exhaustivement décrit dans la littérature, est attachée en deux points à une structure vibrante. Du côté du corps, la corde est attachée par le chevalet à une structure mobile. On modélise cela par l'attachement de l'extrémité de corde correspondante à une mobilité mécanique [19] $\underline{\underline{Y}}_{corps}$, qui dépend des comportements vibratoires du corps, du chevalet, et de tous les éléments qui pourraient influencer la vibration du corps (table rapportée, cavités creusées à l'intérieur du corps, etc.). L'autre extrémité de la corde est attachée soit au sillet dans le cas de jeu en « cordes à vide [20] », soit à une frette dans tous les autres cas. La mobilité $\underline{\underline{Y}}_{manche}$ rend compte de l'attachement de la corde du côté du manche. Cette mobilité dépend des propriétés vibratoires de la touche, des frettes, du manche, du sillet, etc. Remarquons que ce modèle très simple sera justifié dans le corps de cet ouvrage.

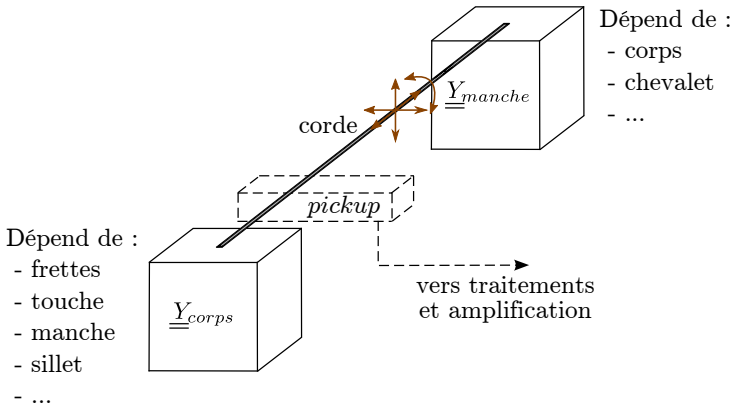


FIGURE 1.7 – Schéma décrivant le modèle mécanique de la guitare électrique. Les deux extrémités de la corde (en gris) sont mobiles et représentées par des mobilités mécaniques tridimensionnelles. L'une de ces mobilités modélise le comportement vibratoire du manche au point d'attachement de la corde ($\underline{\underline{Y}}_{manche}$), et l'autre le comportement vibratoire du corps à l'autre point d'attachement de la corde ($\underline{\underline{Y}}_{corps}$). Les flèches marron représentent les mouvements potentiels de la corde. Le *pickup* est représenté en traits pointillés.

Avec des hypothèses de linéarité du comportement vibratoire des objets mécaniques en présence, nous verrons notamment qu'une telle simplification de l'objet mécanique complexe qu'est la guitare électrique *solid body* est possible, raisonnable, et permet d'obtenir une caractérisation fine de l'instrument et de ses éléments de lutherie.

Les spécificités du guitariste et de la guitare électrique sont explicitées, les éléments de lutherie posés

19. Pour une structure vibrante, la mobilité est le rapport, dans le domaine fréquentiel, entre sa vitesse de vibration et la force qui lui est appliquée. Elle rend compte de la tendance de la structure à vibrer facilement sous sollicitation externe (notamment en fonction de la fréquence de l'excitation, ce qui est intéressant pour étudier les phénomènes de résonance).

20. On appelle ainsi le mode de jeu qui ne nécessite pas l'appui de doigt sur la touche pour raccourcir la longueur vibrante.

comme centraux dans l'appréhension qu'ont les guitaristes de la lutherie de leur instrument. Nous pouvons à présent dresser un état de l'art permettant de situer l'étude des éléments de lutherie de la guitare électrique *solid body* par rapport à la littérature.

1.2 Etat de l'art

Ainsi qu'il est rappelé dans [Lähdeoja *et al.* 2010] et en figure 1.1, la guitare électrique est pensée comme faisant partie d'un réseau. Sur tous les aspects de l'instrument présentés en figure 1.1, on trouve beaucoup de références dans la presse spécialisée ou sur les *fora* internet. L'aspect électrique de l'instrument retient l'attention de beaucoup de musiciens et de scientifiques (boîtes « traitements analogiques et numériques » et « amplificateur et haut-parleur » de la figure 1.1). Cet aspect n'est pas le centre de ce travail, mais puisqu'il semble concentrer la plupart des études scientifiques, il sera traité brièvement (et avec un parti pris de non-exhaustivité) en section 1.2.1. La boîte « guitare électrique » de la figure 1.1 représente l'aspect lutherie et mécanique, et la boîte « guitariste » l'aspect perceptif de l'instrument. Ces deux aspects sont au cœur de cette thèse, et la flèche à double sens liant les boîtes correspondantes en figure 1.1 témoigne de leur imbrication. L'état de l'art leur étant consacré est présenté en sections 1.2.2 et 1.2.3. Il est étonnant de prendre acte que seulement un nombre très limité d'études scientifiques a traité de ces deux aspects : la guitare électrique *solid body* est souvent réduite au circuit électronique qu'elle initie, et l'accès au ressenti des guitaristes par leur discours est souvent « brouillé » par les discours publicitaires ou commerciaux, ou par des interprétations de sens commun issues de méthodes d'analyse inadaptées.

1.2.1 Aspect électroacoustique

Des différentes facettes de la guitare électrique, c'est souvent l'aspect électroacoustique qui retient l'attention des scientifiques, assurément à juste titre d'ailleurs, car la chaîne électroacoustique a connu beaucoup plus d'évolutions que la lutherie depuis les années 1960 [Paté *et al.* 2012a; Navarret 2013a].

1.2.1.1 Le *pickup*

C'est l'élément-clef du son de la guitare électrique *solid body* pour maints guitaristes, mais aussi d'après les publicitaires. Un bon nombre de dossiers de magazines (par exemple [Ley & Giraud 2013]) ou d'ouvrages plutôt orientés du côté de la musicologie historique (*e.g.* [Hunter 2008; Lotton 2008a]) se sont penchés sur le sujet épineux du lien entre le type de *pickup* et le son résultant, et par conséquent sur le meilleur choix de *pickup* qu'un guitariste puisse faire.

Il semble légitime qu'un grand nombre de travaux se soit concentré sur le transducteur mécano-électrique de cet instrument électroacoustique, surtout qu'il est l'objet de l'innovation majeure ayant donné naissance à l'instrument que nous étudions ici. A notre connaissance, la première étude scientifique sur la guitare électrique est [Queen 1966] et passe très rapidement sur la partie mécanique (résumée à la vibration d'une corde fixe à ses deux extrémités) pour s'attacher à la description du fonctionnement du *pickup* et du système amplificateur.

La description du phénomène d'induction créé par le mouvement de la corde à la proximité du *pickup* est faite dans [Lotton 2008b; French 2009; Zollner 2014]. La caractérisation des *pickups* est communément effectuée par la mesure de son impédance électrique [Jungmann 1994], c'est-à-dire la mesure du rapport entre la tension aux bornes du *pickup* et le courant circulant dans la bobine. Cependant, comme le notent [Lihoreau *et al.* 2014], la considération de la seule impédance électrique est limitée dans la mesure où elle ne rend pas compte de la fonction de transfert entre le mouvement de la corde et la tension de sortie de *pickup*. Cette fonction de transfert est pourtant un élément essentiel de l'effet du *pickup* sur la sonorité. A notre connaissance, seules deux études ont proposé un modèle [Lemarquand & Lemarquand 2007; Horton

& Moore 2009] complet de fonctionnement du *pickup* de guitare électrique, donnant la tension de sortie en fonction des positions relatives de la corde et des plots aimantés des *pickups*. Des études au LAUM [21] sont en cours pour obtenir le pendant expérimental de ces résultats. On note également des études visant à simuler le comportement des *pickups* pour produire des sons de synthèse : [Lindroos *et al.* 2011].

1.2.1.2 Les effets

Plusieurs origines peuvent être trouvées à l'usage des effets transformant le signal :

- la constation, puis l'appropriation comme moyen expressif, de « dysfonctionnements » ou de comportement non-attendu des amplificateurs : c'est là l'origine de la distorsion (*distortion*) qui fut découverte et exploitée lors du jeu à fort volume ou de dégradations diverses du matériel [Navarret 2013a],
- la découverte d'outils de modulation du signal : effets *tremolo* et *vibrato* (décrit physiquement par [Queen 1966]), réverbération à ressort ou à plaque (modélisée physiquement et simulée par [Arcas Castillo 2009]),
- la recherche artistique lors du travail en studio d'enregistrement : effets de délai (*delay*), d'écho (*echo*).

Ces effets et les autres ont ensuite été reproduits au format « pédale » pour pouvoir garantir une exploitation répétable et fiable de l'effet à des fins artistiques. Depuis l'intérêt manifesté par les fabricants pour la synthèse d'effets et traitements, notamment pour re-créer les effets analogiques « d'époque », les effets et traitements du signal issu du *pickup* sont relativement bien représentés au sein des problématiques de recherches académiques traitant de la guitare électrique. Citons [Holters & Zölzer 2011; Macak & Schimmel 2010; Kröning *et al.* 2011] qui modélisent numériquement des pédales d'effet classiques, d'après des méthodes exposées notamment dans [Zölzer 2002; Smith 2007 2008], ou [von dem Knesebeck & Zölzer 2010] pour qui la simulation d'effets en temps réel est un objectif nécessitant le développement d'algorithmes de détection de hauteur.

1.2.1.3 L'amplification

L'amplificateur est le dernier objet de la chaîne électroacoustique de la guitare électrique. Son importance est bien entendue capitale et des marques comme *Fender*, *Marshall*, *Vox*, *Mesa Boogie*, *Laney* ou *Roland* ont au moins co-écrit les lettres de noblesses de la guitare électrique [Vinceman *et al.* 2012]. Des études physiques sont proposées par [Queen 1966; Zollner 2014]. Ces dernières années, quelques constructeurs, notamment *Line 6*, ont percé sur le marché en proposant des amplificateurs émulant numériquement les amplificateurs historiques. Il y a en parallèle un regain d'intérêt des guitaristes pour le son *vintage* de l'amplificateur à lampes par rapport à l'amplificateur à transistor. Des efforts sont faits pour proposer des modélisations réalistes d'amplificateurs à lampes fondées sur les équations de la physique, ce qui permettrait d'éviter aux guitaristes les inconvénients de ce type de matériel : encombrement, prix plus élevé, fragilité, temps de chauffe [Cohen & Hélie 2010; Macak & Schimmel 2011; Karjalainen & Pakarinen 2006; Pakarinen & Karjalainen 2010; Leach Jr. 1995; Yeh & Smith 2006].

1.2.2 Aspect mécanique

Nous avons vu en section 1.1.6 qu'une vision mécanicienne de la guitare électrique *solid body* pouvait considérer l'instrument comme un système couplé composé de cordes et d'une structure. Nous nous demanderons donc quels sont les outils mécaniques rendus disponibles par l'acoustique musicale pour

21. Laboratoire d'acoustique de l'université du Maine, Le Mans

l'étude du couplage entre corde et structure. Nous examinerons le précédent de la guitare classique, duquel la guitare électrique *solid body* hérite naturellement (couplage cordes–structure), mais se démarque également (rayonnement).

1.2.2.1 Couplage cordes–structure

[Gough 1981 1983] a proposé un modèle général de couplage entre corde et structure. Ce modèle, que nous utiliserons, a été repris par [Woodhouse 2004a] dans une formulation différente. Il permet de décrire analytiquement le couplage entre un mode de structure et un mode de corde, et de prévoir à partir de la connaissance du comportement dynamique des deux sous-systèmes isolés le comportement du système couplé. En particulier, la coïncidence fréquentielle entre un mode de structure et un mode de corde peut avoir deux effets différents sur les modes du système couplé selon les valeurs des paramètres modaux des deux sous-systèmes. Un cas, dit de couplage « fort » occasionne deux modes couplés qui diffèrent par leur fréquence et le phénomène de « note du loup » peut être engendré. L'autre cas, dit de couplage « faible » occasionne deux modes couplés qui diffèrent par leur amortissement, cela peut résulter en une « note morte » [22]. Des phénomènes voisins sont modélisés et mesurés par [Weinreich 1977] dans le cas du couplage de plusieurs cordes de piano via la table d'harmonie, par [Fletcher 1977] dans le cas du clavecin, ou par [Le Carrou *et al.* 2005 2009] dans le cas de l'étude théorique et expérimentale des vibrations par sympathie des cordes de harpe couplées par la table d'harmonie. [Woodhouse 2004ab] vérifie que les cas de couplage se produisant en guitare classique sont généralement des couplages faibles. Nous vérifierons qu'il en est de même pour la guitare électrique *solid body.* Une modélisation du couplage comme la connexion de la corde à la structure par un système ressort–amortisseur est proposée par [Antunes & Inácio 2007; Inácio *et al.* 260–286].

1.2.2.2 Le cas de la guitare classique

Il est désormais courant de caractériser la guitare classique par son analyse modale, c'est-à-dire par la mesure de ses caractéristiques vibratoires [Jansson 1983; Wright 1996; Lambourg & Chaigne 1993; French 2009]. En effet, comme nous avons vu, la connaissance des paramètres modaux permet d'expliquer le couplage entre corde et structure au niveau du chevalet, c'est-à-dire finalement comment la table d'harmonie va vibrer sous l'influence de la corde [Chaigne & Kergomard 2008; Woodhouse 2003 2004a; Lambourg & Chaigne 1993]. La connaissance des déformées et fréquences modales de la guitare, qui sont souvent celles de la table d'harmonie ou du système table d'harmonie–caisse de résonance, permet également de décrire le couplage vibro-acoustique entre la table d'harmonie et l'air environnant. Le rayonnement de l'instrument est lié à la dynamique de la structure de l'instrument [Hill & Richardson 2004]. [Elie 2012] a proposé de caractériser les guitares par paramètres vibratoires plus globaux, permettant la prise en compte des moyennes et hautes fréquences, d'une importance capitale sur le rendu sonore de l'instrument.

Quelques travaux ont étudié l'influence de l'ajout d'un élément lors de la construction de la guitare classique, notamment l'influence de l'ajout des barrages ou du chevalet [Torres & Boullosa 2009; Skrodzka *et al.* 2011]. L'ajout d'éléments de lutherie n'entre pas dans notre idée de comparer différentes déclinaisons d'un même élément de lutherie. La question de l'influence d'un changement dans les éléments de lutherie pour la guitare classique a été rarement posée. [Di Domenico *et al.* 1998ab] souhaitent étudier l'influence de la forme de la caisse d'une guitare classique : quatre guitares (à caisses respectivement carrée, triangulaire, octogonale et proche du dessin d'une guitare classique) très sommaires sont réalisées et leur son est comparé. La lutherie est cependant trop simplifiée et l'étude inachevée. Trois tables d'harmonie, réalisées

22. Il s'agit d'une note produite à un endroit particulier sur le manche, pour un accordage particulier, qui possède une décroissance anormalement courte par rapport aux notes voisines. On traduit « note morte » par *dead spot* en anglais.

chacune dans un bois différent, sont comparées selon le temps de décroissance des mesures vibratoires effectuées sur ces tables d'harmonie et la bande passante de ces mêmes mesures [Boullosa 2002] : il est possible d'identifier des comportements différents selon l'espèce de bois utilisée. [Meyer 1983a] étudie l'influence de la forme du chevalet sur les fréquences de résonance et le rayonnement de l'instrument. [French 2007] propose d'utiliser un modèle de guitare à deux degrés de liberté pour étudier la sensibilité du comportement modal à des modifications structurelles de l'instrument. Ces modifications sont potentiellement dues à la variation d'un même élément de lutherie (rosace de plus ou moins grande aire, table d'harmonie de plus ou moins grandes masse et raideur). Le modèle à deux degrés de liberté permet de prévoir l'influence d'une modification structurelle sur les premières fréquences de résonance de la guitare classique.

1.2.2.3 Le cas de la guitare électrique *solid body*

Si [Queen 1966], qui est la première étude en sciences de la nature à étudier la guitare électrique *solid body*, considère à bon droit la corde comme le moteur du son de l'instrument, il ne tient pas compte de la mobilité de la structure d'une guitare électrique *solid body* :

> *In the "solid body" only the strings and pickups are tone-producing; the body serves as a rigid anchor for neck, bridge, tailpiece, pickups, switches and controls. The "semi-hollow" guitar allows some mechanical and acoustic reaction to the strings and, more effectively, to the pickups, to modify the tone.* ([Queen 1966], p.3)

C'est donc naturellement que sa description de l'instrument considère une corde fixée solidement à ses extrémités dont la vibration est captée par un *pickup* puis amplifiée et rayonnée par un amplificateur muni d'un haut-parleur.

Des études consistant à reproduire par la synthèse le son de la guitare électrique minimisent également l'aspect mécanique de l'instrument : [Lindroos *et al.* 2011; Karjalainen *et al.* 2004] le limitent à un modèle de signal de la corde et de son excitation. Sans objectif de synthèse sonore, [Zollner 2014] se situe également dans la limitation à l'étude de la corde. La corde est bien entendu un élément fondamental, et il en sera question dans ce travail, notamment pour l'identification de l'amortissement intrinsèque de ses partiels [Valette 1995; Cuesta 1990].

Or les musiciens semblent sensibles à la lutherie et son influence sur le son final de l'instrument, donc sur la vibration de la corde. Une étude vibratoire de la structure de la guitare électrique *solid body* ne semble donc pas injustifiée. Les questions posées à l'acoustique sont différentes de celles qui sous-tendent les études vibratoires de la guitare classique. On peut trouver trois différences entre les problématiques liées à la guitare classique et celles liées à la guitare électrique :

- ➢ Alors que la plupart des études acoustiques sur la guitare classique se concentre sur le rayonnement acoustique et sonore de la table d'harmonie, les concepteurs de guitare électrique *solid body* ont fait en sorte d'évacuer cette complication dès le début de l'instrument. En effet, si la plaque épaisse constituant le corps de la guitare électrique *solid body* rayonne suffisamment pour permettre le travail quotidien du musicien souffrant de voisins sensibles, la projection acoustique de la guitare seule n'entre pas forcément dans les critères rédhibitoires lors de l'achat d'une guitare, et ne préoccupe en tout cas pas beaucoup les luthiers. Par conception, étudier le rayonnement de la guitare électrique *solid body* est un problème secondaire. Il pourra faire l'objet d'études futures, mais n'est pas essentiel dans la compréhension fondamentale de l'instrument que nous souhaitons avoir.
- ➢ Il est raisonnablement attendu d'une épaisse planche de bois une mobilité réduite :

  > *The string dynamics are the primary dynamic structural characterisic of electric guitars since the body is generally stiff and massive in comparison* ([French 2009], p.97).

> Il est attendu que la mobilité au chevalet soit réduite, et que le couplage entre corde et structure n'y soit guère efficace. C'est un des résultats principaux obtenus par [Fleischer & Zwicker 1998 1999]. Par construction, à la différence des instruments acoustiques où le couplage s'opère au niveau du chevalet [23], c'est essentiellement à l'extrémité de la corde située du côté du manche que le couplage se produit dans le cas de la guitare électrique *solid body*. [Fleischer & Zwicker 1998 1999] ont montré que les mesures de conductance colocalisée [24] aux endroits de contact entre corde et manche permettaient une claire caractérisation qualitative du phénomène de *dead spot*. Si le pic de la conductance mesurée à un certain endroit sur le manche coïncide fréquentiellement avec la note produite à cet endroit, alors un transfert privilégié d'énergie de la corde vers la structure peut survenir, causant une altération plus ou moins sévère de la décroissance de la note.

Ayant établi que la structure avait un rôle dans le son et qu'il était possible d'en rendre compte par des mesures mécaniques, il est possible d'envisager la vérification des croyances répandues au sein de la communauté des guitaristes électriques : la question de l'influence des éléments de lutherie sur le son peut donc être abordée d'un point de vue mécanique avec certaines garanties. Même French tempère ses propos :

> *While the sound is primarily electronic, it is not correct to say that the structure of the instrument has no effect at all. The choice of materials can color the sound and experienced players sometimes prefer specific materials.* ([French 2009] p.81)

Très peu d'études ont été consacrées à la dynamique de la guitare électrique *solid body*. [Fleischer 2005] est une étude semblable à [Fleischer & Zwicker 1998 1999], mais pour la basse électrique. Cet article propose par surcroît un modèle basique pour quantifier les observations qualitatives effectuées. [Russell *et al.* 2003] déterminent les déformées et fréquences modales de trois guitares bien différentes (les *solid body Epiphone Coronet* et *Gibson Explorer*, et l'*hollow body Gibson ES-335*) : des différences sont constatées (ce qui est attendu en considérant les grandes différences de géométrie, de matérieau et de conception entre les guitares testées), mais aucune interprétation n'est hélas proposée. Dans [Esposito *et al.* 2002; Esposito 2003], aucune différence significative n'est trouvée entre deux guitares de gammes différentes (une *Fender Stratocaster* et sa copie bon marché) ni dans les déformées modales identifiées, ni dans les spectres des enregistrements aériens de sortie de haut-parleur d'amplificateur lorsqu'un guitariste jouait des pièces musicales.

Les études de référence, tant par la méthodologie que par les résultats, demeurent celles de [Fleischer & Zwicker 1998 1999] : les deux modèles canons de guitare électrique *solid body* sont étudiés, et un lien entre les mesures mécaniques et le son est proposé. On peut critiquer en revanche que la comparaison de modèles de guitares si différents (*Fender Stratocaster*, *Gibson Les Paul* et *Gibson Explorer*) mène à des conclusions concernant un élément de lutherie. En effet, [Fleischer & Zwicker 1999] imputent l'apparition ou le comportement de certains modes de torsion du manche à la seule forme de la tête des guitares : une tête asymétrique (sur la *Stratocaster* et l'*Explorer*) serait la cause d'une séparation d'un pic de conductance correspondant à un mode de torsion. Cette séparation ne se manifeste pas pour la *Les Paul* à tête symétrique. S'il est plus que probable que la symétrie de la tête influe sur le comportement du manche, notamment en torsion, il est difficile de conclure de manière certaine quand tous les autres

23. A notre connaissance, deux études ont néanmoins étudié le couplage au niveau du manche dans le cas de la guitare classique : [García-Máyen & Santillaán 2011] qui confirment que le couplage corde–manche n'a pas d'influence pour la puissance acoustique rayonnée, et [Boullosa 2003] qui montre qu'en certaines frettes aigues, le couplage corde–manche n'est pourtant pas négligeable.

24. Cette notion sera précisée au chapitre 6, mais on peut déjà donner des éléments : la mobilité est le rapport entre la vitesse de vibration d'une structure et la force qui lui est appliquée, la conductance est la partie réelle de cette mobilité. Cet indicateur quantifie la propension à vibrer d'une structure et est classiquement utilisé pour caractériser les couplages mécaniques entre sous-structures. Le terme « colocalisé » indique juste que les points d'application de la force et de mesure de la vitesse de vibration sont confondus.

éléments de lutherie (nous pensons au sens de coupe du bois, à la symétrie des corps, à la jonction du manche au corps, aux essences de bois) opposent les guitares. Il incombe à d'autres études, cette thèse en première ligne, de lier lutherie et son.

Concernant justement le questionnement des éléments de lutherie, seules trois études sont à signaler :

- [Mottola 2007] traite de la jonction du manche au corps. Trois exemplaires d'une guitare simplifiée dans sa construction et ses formes sont réalisés. D'une des deux cordes de chaque instrument sont enregistrés des signaux via un *pickup*. Le temps de décroissance de ces signaux est analysé. Les instruments sont d'abord faits d'une seule pièce de bois (réalisation simulant une guitare à manche traversant), puis sciés en deux avant vissage des parties séparées obtenues (on se rapproche d'une guitare à manche vissé), et finalement le sciage renouvelé suivi du collage des parties séparées (construction assimilée à une guitare à manche collé). La principale réserve que nous formulons sur ce travail est l'utilisation d'un objet relativement éloigné d'une guitare.
- Comme un prélude au présent travail, [Le Carrou *et al.* 2010] ont étudié le comportement vibratoire de trois guitares construites à l'identique étant chacune faite d'un matériau de corps différent : médium [25], acajou et frêne. Il est montré que tant au niveau de la base modale que des conductances mesurées sur le manche, le matériau du corps guidait le comportement en torsion du manche. Il est notamment montré qu'en terme de « pilotage du manche en torsion », un corps en médium — qui est un matériau isotrope — se détachait nettement des corps en frêne ou acajou — qui sont des matériaux orthotropes. Entre les guitares faites des bois « classiques » (frêne et acajou), des variations dans la dynamique de l'instrument sont également trouvées.
- Dans [Pereira *et al.* 2010], il a été construit neuf guitares similaires, différant également en l'essence du bois utilisé pour le corps. Des sons sont enregistrés par le *pickup* de chaque guitare lorsque l'excitation est réalisée soit par un balancier mécanique muni d'un médiator, soit par un guitariste. La comparaison des spectres calculés sur les enregistrements n'a pas permis de dégager des différences entre les guitares.

1.2.3 Aspect perceptif

Il existe en acoustique musicale une longue tradition consistant à étudier la manière dont les auditeurs (que ce soit le musicien ou le public) appréhendent le son des instruments de musique. La problématique peut souvent s'exprimer ainsi : quels sont les attributs du son qui permettent de juger de la qualité d'un instrument ?

Le paradigme des études de la perception des instruments de musique est bien souvent celui de la psychoacoustique, qui consiste à tester la sensibilité des auditeurs à des paramètres strictement issus de la physique et de l'acoustique [Caclin *et al.* 2005]. Ainsi [Fletcher *et al.* 1962] synthétisent des sons de piano en faisant varier les temps d'attaque et de décroissance de chaque partiel. Les différents sons sont jugés par des sujets. Dans la même démarche, [Järveläinen *et al.* 2001] synthétisent des sons de corde vibrante en faisant varier le facteur d'inharmonicité, en vue d'identifier le seuil de détection de l'inharmonicité. [Woodhouse *et al.* 2012] se posent la question de la perception des paramètres mécaniques qui sont mesurés sur des guitares classiques : fréquence et amortissement des modes de structure, tension, raideur et amortissement des cordes. La synthèse de sons de guitare leur permet de faire varier à volonté les valeurs de chacun de ces paramètres mécaniques. [Fritz *et al.* 2012] proposent, au moyen d'une synthèse fondée sur des mesures vibratoires, d'étudier la corrélation entre des descripteurs verbaux et les niveaux de mobilité de violons dans certaines bandes de fréquence.

Ces études sont riches d'enseignement en ceci qu'elles permettent de relativiser, de corroborer, ou encore mieux, d'orienter les études mécaniques. En revanche, il subsiste toujours un doute quant à la place

25. Il s'agit d'un matériau constitué de fibres de bois compressées et collées.

occupée par des paramètres issus de la physique dans la construction du jugement du musicien en situation habituelle de jeu (voir section 2). Elles comportent peut-être un risque lorsqu'elles sont employées sur un instrument à propos duquel encore très peu d'études préliminaires d'identification des stratégies d'écoute et des critères d'évaluation utilisés par les musiciens ont été entreprises, ce qui est le cas de la guitare électrique. Cet instrument se distingue par exemple du violon, qui dispose d'une riche littérature permettant de calibrer les études et d'imposer des critères d'écoute au sujet (comme la qualité globale de l'instrument, sa « jouabilité », sa « brillance » ou sa « projection ») [Wollman 2013]. Nous verrons que notre démarche s'inscrit en complément de la démarche psychoacoustique, en laissant les musiciens définir eux-mêmes les aspects du ressenti sur lesquels ils se focalisent.

Si les études perceptives sur la guitare classique sont relativement nombreuses [French 2009; Wright 1996; Traube 2004; Orio 1999; Woodhouse *et al.* 2012; Meyer 1983b], elles sont plutôt rares dans le cas de la guitare électrique *solid body*.

[Atsushi & Martens 2005] proposent, dans le but de rendre le contrôle des pédales d'effet plus spontané, de faire évaluer par des auditeurs la qualité d'un son de guitare passé au travers d'un pédalier générateur de trois effets de distorsion différents. Par traitement informatique, les trois sons sont modifiés de manière à varier leur *sharpness* (qui pourrait être traduit par « acuité »). La première phase d'évaluation est un test d'écoute au casque et se déroule selon la méthode des triades : les stimuli sont présentés par groupes de trois et le sujet doit désigner la paire la plus semblable et la paire la plus dissemblable. Ces mêmes sons sont ensuite à évaluer selon des échelles sémantiques. L'évaluation par le sujet se situe à l'intérieur de chacune de ces échelles, qui va d'un mot à son contraire supposé. Dans une même dynamique, [Martens & Atsushi 2006] propose de faire classer à des sujets des sons d'effets fondés sur des superpositions de répétitions du signal original à différent décalages temporels (modulations) selon trois catégories figées *a priori* : « la modulation est trop fine pour pouvoir être utilisée à des fins musicales », « la modulation est utilisable à des fins musicales » ou « la modulation est trop extrême pour être utilisée à des fins musicales » (traduction libre par nos soins). D'autres études des mêmes auteurs présentent des objets d'étude, problématiques et méthodes très semblables [Atsushi & Martens 2001].

Encore moins d'études ont concerné la perception de l'élément du réseau de la figure 1.1 constitué par la guitare elle-même. [Esposito 2003] propose de comparer trois *Stratocaster* de trois époques et gammes de prix différentes au moyen d'un test d'écoute. Un extrait sonore est joué sur chacune des guitares et le son rayonné par un amplificateur installé dans une chambre anéchoïque est capté au moyen d'une tête artificielle équipée d'un microphone de mesure. Le jury, composé de musiciens et de non-musiciens, doit désigner dans chaque paire de stimuli le stimulus « sonnant le mieux » (« *best-sounding* »). Une tentative de corréler jugements de qualité sonore et calcul d'indicateurs psychoacoustique est ensuite tentée : aucun résultat clair ne semble se dégager de cette étude.

Ces trois études ont le mérite de poser la question de la perception du son produit par la guitare électrique au sens large. Elles répondent chacune à des problématiques différentes : trouver ce qui caractérise perceptivement une guitare de luxe d'une guitare bas de gamme [Esposito 2003] ou identifier les attributs perceptifs les plus signifiants pour proposer des boutons de contrôle des pédales d'effet plus spontanés [Atsushi & Martens 2005]. Elles semblent en revanche malheureusement ne pas mesurer la spécificité de l'instrument et *a fortiori* de son instrumentiste. Dans ces études :

- ➢ Il nous est offert la seule garantie que les sujets interrogés sont habitués à écouter régulièrement des musiques amplifiées, ceux-ci ne sont pas forcément praticiens réguliers de la guitare électrique *solid body*. Il est délicat de demander à un non-musicien (et *a fortiori* à un non-guitariste électrique) de s'exprimer sur la qualité musicale de guitares électriques. De plus, la modalité de stimulation sensorielle est une écoute au casque, donc pas forcément représentative des habitudes d'écoute d'un public de musiques amplifiées.
- ➢ Il n'est pas assuré que les hypothèses présidant aux tests mis en place soient vérifiées pour des

guitaristes électriques : rien n'indique que l'attribut *sharpness* corresponde à une réalité perceptive pour les utilisateurs avertis de guitares électriques. Il en va de même pour les échelles sémantiques proposées unilatéralement aux sujets.

- ➢ Enfin, il est toujours épineux de vouloir corréler un jugement de qualité produit par un humain, jugement par essence holistique et complexe, à un nombre réduit d'attributs physiques simples et analytiques, souvent supposés indépendants les uns des autres et indiscutablement pertinents d'un point de vue perceptif. De telles méthodes psychophysiques sont valables — et peuvent donner des résultats très féconds — à la condition que les paramètres étudiés soient pertinents pour les sujets.

L'étude perceptive présentée dans cet ouvrage propose, en la présence d'un instrument nouveau, d'étudier la perception qu'ont les guitaristes électriques de leur instrument. Constatant qu'à l'exception de [Navarret 2006 2009] dont il sera question au chapitre 2, aucune étude scientifique n'a été effectuée en ce sens [26] (c'est-à-dire considérant l'expertise des musiciens eux-mêmes), que la guitare électrique *solid body* s'est constituée comme un instrument autonome du point de vue organologique [Navarret 2013a], et que la communauté des guitaristes électriques se distingue des autres communautés de musiciens, il ne nous est donc pas possible de calibrer et de formuler des hypothèses fortes sur la perception des guitaristes électriques. Il n'y a *a priori* pas de raison pour que la cognition et la perception de la guitare électrique *solid body* par son instrumentiste s'organisent de la même manière que celle du guitariste classique sur son instrument. Nous proposerons donc dans la partie II d'élaborer un protocole de test permettant d'appréhender la structure des connaissances et des ressentis des guitaristes électriques, prenant en compte les particularités de la guitare électrique *solid body* et de son instrumentiste.

La production verbale est un des moyens d'exprimer un ressenti. Cette idée n'est pas nouvelle en acoustique musicale, et on peut citer :

- ➢ [Traube 2004] propose une liste d'adjectifs dans laquelle des guitaristes classiques doivent choisir ceux qu'ils utilisent. Les guitaristes peuvent aussi rajouter des adjectifs ne figurant pas dans la liste. Les guitaristes doivent ensuite définir les adjectifs sélectionnés en donnant des synonymes, antonymes, en expliquant comment produire des sons décrits par ces adjectifs.
- ➢ [Fritz *et al.* 2012] collectent des mots décrivant le timbre du violon lors d'entretiens avec des violonistes. D'autres violonistes sont ensuite chargés d'organiser plusieurs fois ces mots selon leur distance sémantique, en pensant à chacun de ces contextes particuliers : jugement de la qualité globale du violon, de ses cordes graves, de ses cordes aigues ou de sa jouabilité.
- ➢ [von Bismarck 1974] étudie la corrélation entre l'enveloppe spectrale de sons de synthèse à hauteur et sonie constantes, et des mots reportés dans la littérature comme décrivant des stimuli aussi divers que des sons de sonar ou de parole.

La collection de mots, leur tri ou leur définition lors des deux premières études se faisant hors d'un contexte de jeu ou d'audition, on se focalise de fait davantage sur la mémoire des instrumentistes que sur l'expérientiel. La troisième étude, quant à elle, propose de qualifier des stimuli sonores en utilisant des mots d'un autre champ lexical. Nous proposons d'accéder au ressenti des musiciens par l'étude linguistique de leur discours, qui sera produit lors d'une mise en situation habituelle des guitaristes (pendant le jeu des guitares, ou lors d'une tâche d'écoute par un moyen de diffusion familier), et de leur laisser choisir des mots adéquats pour qualifier les guitares ou le son.

26. Notons l'existence d'une étude en ergonomie [Marmaras & Zarboutis 1997] prenant en considération des contraintes ergonomiques et bio-mécaniques pour améliorer la conception de l'instrument et réduire les pathologies induites par un jeu trop intense sur des instruments pas forcément adaptés.

1.3 Positionnement de la thèse

1.3.1 Problématique

La problématique de cette thèse est :

> **La qualification et la quantification de l'influence des éléments de lutherie de la guitare électrique *solid body* sur son son.**

Répondre à cette problématique nécessite, par des approches mécanique et perceptive menées en parallèle, de traiter les questions listées ci-dessous, qui sont toutes motivées par des demandes des fabricants ou utilisateurs de guitare électrique *solid body*.

➢ Quelle est la part de mécanique dans un instrument électroacoustique ?

Certains guitaristes estiment que la qualité sonore d'une guitare électrique *solid body* provient avant tout du choix de ses composants électroniques et de l'excellence de ses *pickups*. D'autres guitaristes, sans nier l'importance de l'électronique, tempèrent ces affirmations en mettant en avant le fait que les éléments de lutherie contribuent au son de l'instrument [Navarret 2013a]. On peut se demander quelle est la part de la lutherie — au sens traditionnel du terme, c'est-à-dire en ne tenant pas compte de l'électronique — dans le son de l'instrument. En quoi les éléments de lutherie peuvent-ils influer sur le son d'un instrument électroacoustique conçu pour ne pas avoir de rayonnement acoustique ?

Nous allons montrer que bien que l'instrument ait une forte dimension électroacoustique, la qualité de fabrication mécanique (facture et gestes, matériaux, assemblage, procédés industriels, etc.) joue un rôle déterminant dans le son, à la fois mécaniquement et perceptivement.

➢ Les éléments de lutherie sont-ils perceptibles ?

Nous avons vu au cours de cette introduction que chaque élément de lutherie est réputé avoir une contribution très précise au son de la guitare électrique *solid body*. Cette réputation est hélas souvent sous forme de ouï-dire, de légende ou de slogan publicitaire. Loin de douter de ces savoirs de praticiens de la musique souvent fruits d'une longue expérience, nous cherchons au cours de ce travail de thèse à leur donner une explication et un statut scientifique. Il importe d'accéder au ressenti des guitaristes construit à partir de leur expérience immédiate et de leur connaissance accumulée. Cela nécessite le développement d'une méthode d'interrogation des guitaristes qui soit raisonnable, écologique et qui n'influence pas le musicien, tout en tenant compte de ses spécificités : culture de musiques populaires, écoute de l'instrument à travers les moyens de reproduction sonores d'amplification.

Nous verrons qu'il est possible de trouver dans le ressenti des guitaristes des invariants perceptifs à certains éléments de lutherie.

➢ Comment mener une étude utile pour le luthier et réaliste du point de vue de la facture ?

Le questionnement sur l'influence de chaque élément de lutherie est précisément formulé par les luthiers. Par leur expérience, ces derniers ont développé un grand savoir-faire et possèdent une très bonne intuition sur les éléments de lutherie. Une étude scientifique peut néanmoins compléter et asseoir les connaissances empiriques des luthiers. Une étude mécanique peut permettre de systématiser certains gestes et décisions et d'ouvrir des pistes d'innovation. Une étude perceptive peut contribuer au dialogue qui existe déjà entre les musiciens et leurs luthiers. La connaissance du ressenti des guitaristes peut également cadrer les recherches sur la lutherie en indiquant des directions ratifiées par les musiciens.

Si l'étude d'instruments issus d'une production artisanale nous permet de traiter des éléments de lutherie de manière analytique sur de véritables instruments, et de proposer des outils et résultats aux

luthiers, nous ne devons pas oublier la dimension industrielle de la guitare électrique *solid body*. L'opportunité nous a été donnée d'effectuer des mesures vibratoires sur un grand nombre de guitares issues d'une production industrielle. Un protocole de mesures a été développé dans l'optique d'être appliqué en atelier ou en usine : le nombre de mesures est réduit, afin de ne pas perturber la construction et la qualité de l'instrument qui sera vendu. Fort des savoirs acquis grâce aux études sur des instruments artisanaux, l'idée est de quantifier la variabilité des paramètres mécaniques au sein d'un grand corpus de guitares réputées identiques. Cette variabilité peut être comparée aux jugements des guitaristes qui sont capables d'identifier chaque guitare comme ayant sa personnalité, même au sein d'une série de guitares nominalement identiques.

1.3.2 Hypothèses générales

L'acoustique musicale est une discipline permettant d'étudier des objets complexes (les instruments de musique) tout en conservant une vision globale de ceux-ci. C'est une richesse en ceci que la pluridisciplinarité de l'étude est naturelle car il nous est permis facilement d'étudier l'objet selon plusieurs angles, avec plusieurs méthodes et démarches scientifiques. Cette approche pluridisciplinaire qui caractérise cette thèse n'est pas sans nécessiter des hypothèses plus ou moins fortes, ce qui ne contrarie pas la démarche scientifique, du moment qu'elles sont clairement identifiées.

Nous avons fait le choix d'étudier des problématiques formulées par les luthiers et les musiciens. Ceci implique que les objets d'étude de cette thèse soient des guitares électriques *solid body* réalistes, c'est-à-dire des objets sur lesquels les guitaristes électriques peuvent exercer un jugement expert, habituel et naturel. De plus, les éléments de lutherie qui seront considérés dans ce travail sont *a priori* pertinents pour le luthier et pour le musicien. Il résulte de ce choix que l'objet d'étude est considéré dans toute sa globalité et sa complexité. Des limites doivent donc cadrer l'étude mécanique de l'instrument. En particulier, cela nécessitera la simplification de l'instrument en un système couplé cordes–structure qui ne prendra en compte que des couplages linéaires et où l'interaction mécanique entre le musicien et son instrument ne sera pas considérée.

1.3.3 Organisation du manuscrit

La suite du manuscrit s'organise en deux grandes parties. Ces parties se composent de chapitres, qui sont tantôt rédigés en français, et tantôt en anglais sous forme d'article de journal.

La partie II approche l'instrument et ses éléments de lutherie par la perception. Le chapitre 2 cadre nos études perceptives dans le champ de la psychologie en exposant divers courants et méthodes existants. Après avoir argumenté en faveur d'une approche cognitive située, le chapitre 3 détaille les méthodes de test perceptif mises en place ainsi que les méthodes d'analyses. Le chapitre 4 présente sous forme synthétique une étude perceptive du matériau de la touche : par un test de catégorisation libre puis de verbalisation libre en phase de jeu, la sensibilité de guitaristes professionnels à un changement de matériau de touche est testée. La méthode d'analyse des verbalisations introduite dans cette partie permet à ce travail d'avoir une portée bien plus générale que la seule étude de la perception des bois de touche. L'analyse sémantique du discours des musiciens permet de connaître et comprendre l'organisation et la restitution verbales des connaissances et ressentis des guitaristes électriques professionnels à propos de leur instrument. Ceci permet donc de calibrer de futures études perceptives concernant guitariste et guitare électriques (chapitre 5).

La partie III est consacrée à l'étude mécanique des éléments de lutherie, effectuée en parallèle de l'étude perceptive. Le parti pris des chapitres 6 à 8 est d'étudier des guitares électriques de construction artisanale. En effet, ces chapitres prétendent aborder, par une approche résolument expérimentale, la

question de l'influence des éléments de lutherie sur le comportement vibratoire de la guitare électrique *solid body* et sur le son. La solution envisagée pour ce faire est de réaliser des mesures sur des guitares entre lesquelles un seul élément de lutherie varie : de telles guitares ne sont pratiquement pas existantes dans l'industrie. Le chapitre 6 plante le décor d'une étude mécanique de la guitare électrique *solid body* : une simplification de la structure complexe de l'instrument mène à un modèle de couplage fondé sur des valeurs expérimentales. Le chapitre 7 s'insère dans le cadre d'étude précédemment défini pour étudier en détail l'influence du matériau de la touche sur le comportement vibratoire de l'instrument. Le chapitre 8 reprend les études sur la touche et la jonction du manche au corps. Il est fait le constat que des différences mécaniques sont trouvées entre des guitares à élément de lutherie variant, ceci confirmant l'influence des éléments de lutherie sur le son. Mais des différences mécaniques ont aussi été constatées au sein d'un même lot de guitares nominalement identiques. Ceci va dans le sens de l'appréciation par les musiciens de chaque guitare comme un individu. Pour connaître les origines de la variabilité inter-individuelle, le chapitre 9 organise une étude de guitares artisanales en cours de construction. Il est possible d'identifier la matière première et le geste du luthier comme sources de variabilité entre deux guitares qui sont destinées à être identiques. Enfin, le chapitre 10 propose de revenir à une réalité organologique et économique, et de recentrer l'étude sur des guitares industrielles. La variabilité inter-individuelle de guitares issues de la même chaîne de production est quantifiée et comparée à la variabilité provoquée par le changement d'un élément de lutherie. Ces résultats sont confrontés aux pratiques des guitaristes, qui savent appréhender les différences entre les guitares, qu'elles soient dues aux décisions de lutherie, aux matières premières ou au procédé de fabrication.

Enfin, la partie IV conclut cet ouvrage en en rappelant les principaux résultats ainsi que les limitations et perspectives associées à ce travail.

Deuxième partie

Approche perceptive

Avant-propos

Les approches perceptive et mécanique de la guitare électrique *solid body*, qui constituent les deux axes de ce manuscrit, ont été élaborées concomitamment lors de ce travail de thèse. Un projet de durée plus longue aurait permis d'envisager soit d'achever une description mécanique de l'instrument avant de la soumettre au jugement des musiciens, soit, considérant la nouveauté de l'instrument en tant qu'objet d'études scientifiques, de cerner la description perceptive de la guitare électrique pour orienter les études mécaniques. Cela n'a pas été le cas lors de cette thèse, si bien qu'études perceptive et mécanique se sont déroulées strictement en parallèle dans ce travail. Avec le recul, cela a finalement permis un dialogue et un enrichissement mutuel entre les deux approches. Dans l'élaboration de chaque méthode et la construction de chaque expérience, mécanique et perception se sont conciliées pour tenter de créer et maintenir les conditions d'une compréhension et d'une articulation commune. Pour les besoins de l'exposé, les deux approches sont néanmoins relatées de manière successive, et nous avons essayé d'insister sur les liens entre perception et mécanique.

Cette partie montre une approche de la guitare électrique *solid body* par la perception. Elle traite de l'étude qui a été menée sur la perception de la guitare électrique *solid body* par son instrumentiste. Le chapitre 2 situe la démarche que nous avons utilisée dans le champ de la psychologie et de son application à l'acoustique musicale. Nos choix méthodologiques sont orientés et argumentés par un positionnement dans certains cadres théoriques. Le chapitre 3 détaille les problématiques, méthodes expérimentales et méthodes d'analyse qui sont utilisées : tâche de tri libre et analyse arborée d'une part, tâche de verbalisation libre en situation de jeu et analyse linguistique d'autre part. Le chapitre 4 expose une vision synthétique de l'étude perceptive du matériau de la touche des guitares électriques *solid body* : ont été comparées des guitares différant par leur matériau de touche (ébène ou palissandre), tous les autres éléments de lutherie étant les plus identiques possible par ailleurs. Enfin, le chapitre 5 propose quelques axes de réflexion supplémentaires et une conclusion de la partie.

Une vision de l'étude perceptive du matériau de la touche des guitares électriques des chapitres 3 et 4 peut être proposée à la lumière de la récursivité et de l'échange d'hypothèses entre approches mécanique et perceptive. Les hypothèses du luthier et du mécanicien proposent au musicien de tester des guitares qui diffèrent par un paramètre de lutherie (mécanique). Il s'agit donc de tester la sensibilité du musicien au changement d'un paramètre mécanique. Une analyse des verbalisations permet de valider ou non les hypothèses (physiques) de lutherie, et d'en proposer d'autres, conformes à la perception des musiciens, à réinjecter comme hypothèses, heuristiques, dans de nouvelles études mécaniques. « La boucle est bouclée » et une combinaison constructive des approches perceptive et vibratoire est mise en place.

Chapitre 2

Positionnement de la démarche

L'approche perceptive développée dans ce travail de thèse entend s'inscrire dans un cadre de pensée existant et s'inspirer des méthodes associées. Nous allons voir que la démarche scientifique que nous nous proposons de suivre n'est pas classique en acoustique musicale, aussi il nous a semblé important de proposer dans ce chapitre une synthèse des démarches et méthodes existant en psychologie de la perception. Nous montrons comment nous nous les sommes appropriées et comment nous nous inscrivons dans une tradition de psychologie et linguistique cognitives, dont l'application à l'acoustique musicale est le fruit notamment des travaux précédents de l'équipe LCPE [1] et de l'équipe LAM de l'Institut Jean le Rond d'Alembert. L'objet d'étude de cette thèse qui est présentée en sciences mécaniques est un objet culturel dont la finalité est d'être joué par des musiciens : il nous a donc semblé nécessaire d'élaborer une approche perceptive de cet objet en parallèle et au même niveau d'importance que son approche mécanique, afin d'étendre la portée et de fixer les objectifs finaux de cette dernière.

2.1 Les études perceptives en acoustique musicale

Cette section donne une description non exhaustive des démarches qui sont utilisées en acoustique musicale. Avant de présenter notre propre démarche, nous la situons en regard de deux démarches utilisées pour prendre en compte les aspects perceptifs de la qualité des instruments de musique :

- La démarche psychophysique (section 2.1.1), la plus largement répandue, à l'origine de la démarche scientifique en psychologie de la perception dès la fin du XIXe siècle ([Fechner 1860] cité par [Bonnet 1986]) qui évalue la sensibilité des sujets à des paramètres physiques.
- Les limites de cette démarche pour l'évaluation globale de la qualité sonore ont plus récemment conduit les recherches en psychoacoustique à se tourner vers les procédures d'analyse sensorielle (section 2.1.2).

Nous expliciterons enfin les caractéristiques de l'approche cognitive qui s'inscrit dans les champs de la psychologie et de la linguistique cognitives (section 2.1.3).

2.1.1 La psychophysique

L'approche psychophysique se propose d'établir un lien entre des paramètres physiques contrôlés et l'effet perceptif qu'ils produisent sur le sujet. C'est donc la physique (ou l'acoustique, dans le cas d'une approche psychoacoustique) qui détermine les paramètres sur lesquels les sujets sont invités à émettre leur jugement. Les paramètres testés issus du paradigme de la physique contemporaine sont les propriétés et dimensions analytiques des objets physiques, ce qui a des implications importantes sur la description psychologique des phénomènes perceptifs :

- Les paramètres testés sont pertinents (et en relation avec des concepts eux-mêmes pertinents) pour le physicien, mais rien ne permet de dire qu'ils sont *a priori* pertinents pour le sujet sensible, qui

1. « Language, Cognition, Pratiques et Ergonomie », laboratoire CNRS qui a rejoint le LAM (à l'époque « Laboratoire d'Acoustique Musicale » et depuis 2007 équipe « Lutheries, Acoustique, Musique » de l'institut Jean Le Rond d'Alembert, sous la tutelle de l'UPMC, du CNRS et du ministère de la culture et de la communication) en 2003

n'a pas nécessairement acquis la même connaissance abstraite des phénomènes qu'il perçoit.

➢ L'approche analytique des sciences physiques vise à ce que chaque paramètre physique soit mesurable indépendamment des autres : à supposer que ces paramètres physiques soient pertinents pour le sujet, rien n'indique non plus leur indépendance mutuelle dans le ressenti du sujet.

Le cadre théorique de la psychophysique permet l'élaboration de méthodes efficaces. Or, l'approche psychophysique ne peut être utilisée que lorsqu'elle est calibrée par une étude préalable du ressenti des sujets. Dans notre cas, fort peu de recherches ont eu pour objet l'identification des paramètres pertinents pour décrire et quantifier la perception qu'ont les guitaristes électriques de leur instrument, à partir de leur ressenti. Le test de paramètres sonores soit issus de la description physique des sons comme l'intensité sonore, la hauteur, la rugosité, etc., soit prouvés comme pertinents dans le cadre d'autres instruments, comme la richesse ou la projection des violons [Saitis *et al.* 2012], sans preuve que ceux-ci soient pertinents et utilisés par les guitaristes électriques pour décrire et évaluer leur instrument, risque d'induire de la part des sujets des traitements spécifiques des stimuli en tant qu'« artefacts étranges, inhabituels » et non reconnus, parce que non perçus ou éprouvés antérieurement et non associés, pour eux, à une signification [Dubois 2009a]. La description du ressenti de tels stimuli non reconnus par le sujet-expert risque de plus de produire un discours de sens commun ne reflétant en rien la subjectivité qu'on cherche à atteindre lors d'études en psychologie, ou visant à répondre comme « bonne réponse » la représentation du monde de l'expérimentateur.

2.1.2 L'analyse sensorielle

Nous nous appuyons sur la description faite par [Giboreau *et al.* 2009]. L'analyse sensorielle s'est développée aux Etats-Unis d'Amérique dans les années 1970 principalement dans l'industrie agro-alimentaire. Dans cette démarche centrée sur le produit, il s'agit d'étudier celui-ci par des mesures psychologiques et physico-chimiques, puis de relier ressenti humain et paramètres de composition physico-chimique pour proposer des améliorations du produit. De la constatation des limites des méthodes psychophysiques pour appréhender la perception humaine de produits alimentaires de grande consommation, qui s'exerce sur un objet global plutôt que décomposé analytiquement, sont nées les pratiques de l'analyse sensorielle.

L'analyse sensorielle vise à établir le « profil sensoriel » du produit étudié, pour comparaison avec ses propriétés physico-chimiques. Pour cela, un panel de sujets (consommateurs) est formé, qui doit juger d'un certain nombre de déclinaisons du produit. La phase cruciale de l'analyse sensorielle est le choix des « descripteurs » qui seront utilisés pour évaluer les produits du test : c'est la phase de « génération de termes ». L'approche classique est dite « approche monadique » car les produits sont présentés un par un aux sujets, qui doivent produire le plus grand nombre possible de mots pour décrire chacun de ces objets [2]. L'animateur du panel a la responsabilité de proposer une réduction de l'ensemble des descripteurs, à travers la négociation sur des mots consensuels. La réduction de l'ensemble des descripteurs est ensuite discutée puis approuvée par le panel. Le test proprement dit commence ensuite : les sujets doivent exercer leur jugement sur les produits selon les descripteurs définis et normés par consensus.

Comme on le constate, le discours de l'analyse sensorielle est nécessairement normatif. De par la formation même des experts en analyse sensorielle, le dialogue avec les scientifiques est facilité. Du point de vue qui nous concerne ici, nous pouvons reformuler ces processus en considérant que le travail des

2. Des approches par catégorisation ont également été mises en œuvre pour la phase de génération de termes : les objets sont présentés et doivent être groupés en autant de groupes que voulu par le sujet. Chaque groupement de produits doit ensuite être jugé et décrit. Cette approche se révèle moins efficace [Giboreau *et al.* 2009] que l'approche monadique, car elle suscite un jugement portant sur les attributs partagés par les différents objets d'une catégorie. Ce jugement se situe donc à un niveau d'abstraction plus haut, contrairement à l'approche monadique, qui favorise des descriptions comparatives et individuelles des objets qui sont présentés successivement.

« panelistes [3] » est de construire et négocier la valeur référentielle de « mots » qui deviennent alors des « termes » [Dubois & Giboreau 2006]. Ainsi chaque sujet du panel utilisera le lexique de la même façon que son collègue : l'idiosyncrasie (l'usage propre à un locuteur des ressources lexicales partagées d'une langue) est écartée, et les analyses quantitatives sont directement accessibles, notamment sous forme de statistiques. En analyse sensorielle, l'organisation des connaissances des individus et leur expression en discours ne sont ni explicitées ni théorisées dans les domaines de la psychologie de la perception ou de la terminologie en linguistique.

2.1.3 Une approche cognitive : la psycholinguistique

La psychologie cognitive contemporaine étudie la perception dans son lien avec la mémoire et les connaissances [Guastavino 2003]. Si dans les cadres de la psychophysique et de l'analyse sensorielle, la perception est envisagée comme un ensemble de processus « *bottom-up* » (les propriétés des stimuli déterminent seuls la perception, et c'est la combinaison de sensations élémentaires qui est porteuse de sens), l'approche cognitive incorpore les processus dits « *top-down* » (la perception est aussi bien le résultat du stimulus que de son appréhension dans le contexte des connaissances mémorisées du sujet, le stimulus est appréhendé comme un élément d'un tout) [Guastavino 2003]. C'est cette approche que nous utiliserons. Elle nous permet de dépasser une conception de l'humain sensible comme un « système de traitement de l'information », et de le penser au contraire comme un « producteur de significations » [Bruner 1990; Dubois 2009a]. Ces significations produites par l'humain se construisent en relation avec la perception immédiate d'une stimulation mais aussi avec la mémoire liée aux expériences perceptives antérieures. On peut penser que le moyen d'expression privilégié de ces significations, donnant accès à la connaissance et à la construction de la perception, est le discours. Une étude linguistique du discours permet de prendre en compte les spécificités de l'utilisation du langage propre à chaque sujet (voir la section 2.2.3), là où les démarches de psychophysique et d'analyse sensorielle favorisent les acceptions de sens commun et une sémantique *a priori* normée au sein d'une communauté d'experts (analyse sensorielle) ou de scientifiques (sciences de la nature). En bref, l'approche cognitive que nous nous proposons de suivre intègre l'analyse psychologique du ressenti de l'humain, en tant qu'objet psychologique, au travers de son expression en discours, analysé scientifiquement par la linguistique [Dubois 2009a].

2.2 Une approche située de la perception musicale

Notre but est d'étudier la perception qu'a le musicien (dans une forme particulière qui est celle du guitariste électrique) de son instrument. Cette étude est dite « située », c'est-à-dire que la perception du musicien est étudiée *in situ*, en situation, de jeu habituel notamment. Etudiant la perception de praticiens de la musique, il nous est essentiel de faire usage d'une approche de la perception liée à l'action : le sujet n'est pas un simple récepteur d'informations, il participe à et évolue avec son environnement, et sa perception est orientée par ses actions, buts et usages. Ces remarques sont liées à la notion de « validité écologique » d'une expérience en psychologie, et des précisions sont apportées à ce sujet en section 2.2.1. En situation ordinaire, l'humain utilise ses connaissances structurées selon les catégories dites « naturelles » : c'est l'objet de la section 2.2.2. Enfin, notre démarche utilisant ces concepts de validité écologique et de catégories naturelles s'inscrit dans le champ de la psychologie et de la linguistique cognitives, c'est ce dont il est question en section 2.2.3.

3. Nous utilisons cet anglicisme pour désigner le participant à un panel de consommateurs.

2.2.1 La notion d'écologie des situations expérimentales

La notion de « validité écologique » des situations expérimentales a été premièrement introduite par Gibson pour des expériences concernant des stimuli visuels [Gibson 1986], mais est préfigurée par [Brunswik 1943 1952 1956] (cités par [Guastavino 2009]). Nous nous appuyons sur les travaux de [Guastavino 2003 2009; Cance 2009] pour présenter cette approche.

La validité écologique d'une situation expérimentale découle du questionnement sur la validité de l'utilisation de stimuli analytiques et contrôlés dans l'expérience elle-même. En effet, dans ce contexte, le stimulus n'a pas de signification intrinsèque : la signification qui lui est donnée dépend de l'environnement dans lequel le sujet évolue, des connaissances préalables du sujet, de la tâche à effectuer et du degré d'expertise du sujet, qui sont égalemenent porteurs de sens et constructeurs de la perception et de l'interprétation des stimulations. Pour pouvoir être étudiés de manière contrôlée en laboratoire, les évènements de la vie extérieure au laboratoire qu'on souhaite étudier doivent être « re-présentés » [Cance 2009] sous forme de stimuli lors du test en laboratoire. S'assurer de la validité écologique du test en laboratoire, c'est s'assurer que des résultats de celui-ci peuvent être tirés des résultats valables en situation naturelle. Le dispositif expérimental, pour avoir une validité plus générale que le simple contexte de laboratoire, et ne pas susciter des comportements et traitements spécifiques et artificiels contraints par une situation expérimentale trop éloignée des situations habituelles pour le sujet, doit :

- « être conscient » qu'il constitue la réalisation (artefact) de la connaissance du monde qu'en a l'expérimentateur. L'expérimentateur doit donc s'assurer que sa connaissance du monde prend en compte la connaissance du monde qu'en ont les sujets de l'expérience à concevoir. C'est un des sens du travail de [Guastavino 2003; Guastavino *et al.* 2005], où il a été montré notamment qu'une reproduction exacte (du point de vue physique) de stimuli sonores n'était pas forcément adaptée à toutes les tâches de jugement, et que d'autres moyens de reproduction étaient plus efficaces dans certains contextes ;
- situer le sujet en interaction avec son environnement, notamment restituer sa position d'« observateur actif » et non de « récepteur passif » [Cance 2009] ;
- situer le sujet dans le cadre de la réalisation d'une tâche précise et habituelle (une tâche pour l'exécution de laquelle le sujet est justement expert) ;
- re-présenter l'objet d'étude sous une forme familière pour le sujet, et en contexte normal d'utilisation ou de confrontation.

Comme le résume [Guastavino 2009], « le dispositif expérimental doit être adapté aux expériences sensibles des participants, notamment à leur domaine d'expertise ». La perception s'effectuant non seulement suivant des processus *bottom-up*, mais aussi suivant des processus *top-down*, elle est influencée par la mémoire du sujet : celle-ci, s'étant nourri de toutes les expériences sensibles du sujet, est nécessaire à la compréhension des stimuli. Le fonctionnement normal de cette mémoire et de ses interactions avec la perception n'est assuré que si la situation expérimentale a un degré suffisant de validité écologique.

2.2.2 La perception et les catégories sémantiques naturelles

L'introduction du concept de catégorie sémantique naturelle fournit un cadre théorique qui permet d'appréhender scientifiquement la perception holistique que l'humain a d'un objet de son environnement ordinaire. En effet, lorsqu'il a à juger d'un objet stimulant ses sens, le sujet sensible n'utilise pas l'approche analytique du physicien. Sa connaissance qui lui permet d'exercer son jugement s'est construite par ses différentes expériences lors de ses confrontations successives avec des objets plus ou moins proches de celui qui est actuellement à juger. Une de nos hypothèses est que la perception du guitariste électrique expert n'est pas organisée autrement.

La notion de catégorie naturelle s'est construite dans les années 1970 en psychologie cognitive [Rosch

& Lloyd 1978; Dubois 1991] à partir de la critique de la notion classique de catégorie, héritée de Platon et Aristote, qui a donné au XXe siècle la notion de catégorie logique ou formelle, et qui s'était imposée en psychologie à travers le modèle des ordinateurs. Des synthèses de ces deux notions peuvent être trouvées dans [Lakoff 1990]. [Dubois 1991] résume les différences entre les structures des catégories naturelles et celles des catégories logiques ou formelles d'après [Rosch & Lloyd 1978] :

1. Les objets des catégories naturelles sont constitués et décrits par des corrélats d'attributs et des ressemblances perceptives, alors que les objets des catégories formelles le sont par des listes de propriétés ou dimensions indépendants les uns des autres. L'approche par les catégories naturelles permet de rendre compte de l'aspect *a priori* interdépendant des attributs perceptifs. (Par exemple la catégorie des « chiens » s'oppose à celle des « oiseaux » par les corrélats [poils / quatre pattes / marche] contre [plumes / deux pattes / vole]. Il n'existe en revanche pas de catégorie naturelle où figure l'individu décrit par le corrélat [poils / trois pattes / nage]. Il existe donc des discontinuités dans la distribution des attributs et de leurs valeurs.)

2. L'appartenance d'un objet à une catégorie naturelle est déterminée par des discriminations inter-catégorielles et des similitudes intra-catégorielles, tandis que l'appartenance d'un objet à une catégorie logique est réglée par des conditions d'appartenance nécessaires et suffisantes. L'approche par les catégories naturelles permet de prendre en compte la diversité des objets, les incertitudes qui peuvent exister quant à leur classement dans certaines catégories et la variation inter-individuelle.

3. A l'intérieur d'une catégorie formelle, les objets sont tous équivalents (la condition nécessaire et suffisante d'appartenance à cette catégorie en est garante), alors que les objets d'une catégorie naturelle se distinguent par leur degré de typicalité (un objet est plus ou moins typique ou représentatif de sa catégorie : le canari est souvent perçu comme un meilleur prototype que l'autruche pour la catégorie « oiseaux »). Cette notion de typicalité souscrit au principe d'« économie cognitive » [Rosch & Lloyd 1978] qui consiste à nommer et penser une catégorie à partir de son prototype, ou objet le plus typique. Le prototype de chaque catégorie sémantique dégagée aux chapitres 3 et 4 sera appelé « méta-critère » (« *meta-criterion* ») ou « étiquette » (« *label* »), permettant d'unifier la diversité lexicale des critères d'évaluation des guitares.

La notion de catégorie formelle a permis de développer le discours et le formalisme scientifiques. Mais elle n'est pas adéquate pour représenter la structure des connaissances ordinaires en mémoire humaine, que ce soit dans les catégories de stimuli perçus ou dans les catégories sémantiques formulées en discours. Ces catégories sont mieux décrites dans le cadre des catégories naturelles, qui permettent de rendre compte de la variabilité inter-individuelle, du « flou » des frontières inter-catégorielles et de l'entrelacement des attributs perceptifs.

2.2.3 L'expression de la subjectivité : mots et discours

En tant qu'objet de mémoire, les catégories naturelles ne sont cependant pas directement accessibles à l'observation. L'idée de la méthode que nous avons reprise est de s'inscrire dans le champ de la linguistique cognitive utilisant les données verbales pour accéder au ressenti des musiciens. La démarche scientifique est celle de la linguistique, elle a vocation à objectiver les mesures d'un objet psychologique (le ressenti, donc le subjectif) à partir d'un « instrument de mesure » que constitue le discours. Nous commençons par exposer très brièvement deux visions de la sémantique et comment nous utiliserons une sémantique « différentielle » pour nos travaux. Nous poursuivons par un rappel succinct des spécificités du langage et de la manière dont la linguistique peut nous permettre d'objectiver le ressenti à travers son expression en discours.

2.2.3.1 Sémantique référentielle et sémantique différentielle

La sémantique est l'« étude scientifique du sens des unités linguistiques et de leurs combinaisons » [4]. C'est donc la branche de la sémiotique (étude scientifique des systèmes de signes et de communication) qui étudie plus précisément les langues. Il existe schématiquement deux traditions théoriques en sémantique :

La sémantique référentielle est la sémantique classique, héritée d'Aristote et dont la pérennité est assurée par la sémantique formelle fondatrice de l'intelligence artificielle. Cette théorie stipule qu'il existe une réalité extra-linguistique qui contraint le signe (le mot). En d'autres termes, il y a adéquation entre le mot, la chose et le concept. La langue décrit la réalité du monde, qui est unique.

La sémantique différentielle est introduite au début du XXe siècle par les travaux de [de Saussure 1955], qui scinde le signe en deux entités : le « signifiant » et le « signifié ». Le signifiant est le mot ainsi qu'il est écrit ou prononcé, tandis que le signifié renvoie au concept correspondant. Ici, c'est le couplage de la forme linguistique et de la signification qui lui est associée à l'intérieur d'un système linguistique qui contraint la conceptualisation du monde. Il n'y a plus de correspondance univoque entre concept et mot.

Le discours scientifique, en tant que discours de spécialistes, peut être expliqué par la sémantique référentielle, car celle-ci propose que la signification des mots soit explicitement définie et acceptée par les locuteurs de la discipline. L'élaboration d'un vocabulaire normatif par un consensus explicite trouvé parmi les membres d'une même communauté de locuteurs permet d'éviter les variations individuelles dans l'utilisation des ressources lexicales. La psychophysique qui propose d'utiliser les paramètres de la physique, donc une sémantique normée et figée, et l'analyse sensorielle qui propose d'accorder (et d'imposer) une valeur référentielle aux mots utilisés lors des tests, font usage, raisonnablement et à juste titre, de la sémantique référentielle.

Contrairement au discours scientifique par exemple, qui se norme intentionnellement, le discours de sens commun, tout comme le discours des musiciens, se construit à partir d'expériences sensibles, partagées ou non entre les membres d'une communauté de locuteurs. Le cadre théorique de la sémantique différentielle se prête davantage à l'explication de ce genre de discours, car elle permet de rendre compte des variations inter-individuelles entre locuteurs. Le sens des mots se définit par consensus implicite entre les locuteurs et non par référence à un concept préexistant.

Nous essayons d'identifier, parmi les signifiants utilisés, les signifiés communs aux locuteurs d'une communauté de locuteurs, celle des guitaristes électriques. Notre but est donc, à partir de l'analyse de la sémantique différentielle des praticiens experts de la guitare électrique, d'obtenir une sémantique référentielle de leur discours, en en dégageant les termes et concepts partagés.

2.2.3.2 L'expression du subjectif et son objectivation

En psychologie, est « subjectif » tout ce qui se rapporte au ressenti du sujet. Loin d'opposer l'objectif immuable et fiable procuré par les instruments de mesure physique au subjectif imprécis et fluctuant de manière non maîtrisée (variations inter- et intra-individuelles du ressenti), c'est toute la richesse et la diversité du subjectif que nous entendons recueillir, comprendre, puis objectiver afin d'accéder aux structures cognitives de la perception des sujets.

Comme énoncé en section 2.1.3, notre « instrument de mesure [5] » du subjectif est le discours, et notre démarche scientifique pour objectiver le subjectif à partir du discours est celle d'une sémantique linguistique [Dubois 2009a]. Cette discipline, déjà mise en œuvre dans différents domaines sensoriels,

4. *Le petit Larousse illustré 2013*, sous la direction d'I. Jeuge-Maynart, éditions Larousse, Paris, France.

5. Afin de rendre observable le psychologique et le subjectif, nous avons besoin d'instruments de mesure, à l'instar des sciences de la nature qui ont besoin d'instruments de mesure physiques pour rendre observables les phénomènes physiques.

permet de prendre en compte les aspects en apparence imprécis et variables qui viennent lors de l'étude comparée du discours de plusieurs locuteurs. Les points que se propose de résoudre la linguistique sont les spécificités du langage qui posent problème lorsqu'on souhaite, à juste titre, disposer d'une sémantique référentielle et normée, par exemple dans le cadre de démarches psychophysiques ou d'analyse sensorielle. Dans toute communauté de locuteurs (et nous faisons l'hypothèse que la communauté des guitaristes électriques ne déroge pas à ce comportement), le sens des mots utilisés par les locuteurs individuels dépend :

de la langue : La langue utilisée pour penser et formuler son ressenti revêt évidemment une grande importance. Par exemple, notons que si le français — la langue utilisée lors des tests perceptifs dont traite cette thèse — permet d'exprimer avec une grande précision et en réduisant les variations inter-locuteurs les couleurs et les sensations visuelles, il n'en est pas de même pour les sensations auditives. Pour pallier l'absence de formes lexicales simples, les locuteurs empruntent à d'autres champs lexicaux (par exemple un son « brillant », un son « aigre », un son « perçant ») ou décrivent la source du son plutôt que le son lui-même [Dubois 2000] ;

du locuteur : Chaque locuteur utilise de manière spécifique les ressources linguistiques d'un langage : cette utilisation est pilotée par son expérience, ses affects. C'est ce phénomène d'« idiosyncrasie » qui fait que chaque locuteur peut utiliser les ressources de la langue selon sa propre sémantique ;

du contexte : C'est là l'apanage du « discours de spécialiste » : parmi une communauté de spécialistes d'un domaine, l'usage des mots est codifié et leur sens a été tacitement négocié entre les locuteurs. Il existe au sein de telles communautés des consensus quant à l'utilisation de certains mots pour exprimer certains concepts : ces « mots » deviennent des « termes ». Ainsi, le même signifiant peut se référer à des signifiés très différents pour un locuteur appartenant à une communauté d'acousticiens et un autre appartenant à une communauté de musiciens. Un exemple courant d'une telle négociation du sens attribué aux mots au sein d'une communauté de spécialistes est la distinction très précise que font les physiciens entre la « masse » et le « poids », deux mots qui sont pourtant synonymes à l'extérieur de la communauté des physiciens. De plus, l'usage d'un même mot par un même locuteur selon qu'il est en situation de jeu ou dans une situation de vie plus commune pourra faire référence à des sensations ou expériences totalement distinctes.

Ainsi que l'exprime [Guastavino 2009] :

> *La pensée est contrainte de s'inscrire et de s'objectiver par des sons, par une syntaxe et un lexique avec toutes les relations internes qui la structurent, qui relèvent de la langue partagée mais aussi d'un lexique personnel car chacun de nous a intériorisé une compétence lexicale à la fois particulière et partagée [par un locuteur avec différentes communautés de locuteurs, note de l'auteur]. Il y a donc à la fois ce que l'individu veut dire, mais aussi ce qu'il sait dire et ce qu'il peut dire, compte tenu de sa compétence particulière et des contraintes de la langue.*

La discipline scientifique qu'est la linguistique cognitive contemporaine nous permet d'appréhender l'ensemble des variations individuelles quant à l'expression du subjectif par le discours, d'en tenir compte dans notre recherche des régularités inter-locuteurs et d'objectiver le subjectif.

2.3 Conséquences méthodologiques

Considérant le choix que nous avons effectué parmi les différentes démarches scientifiques et cadres théoriques disponibles en psychologie et en linguistique, nous en exposons brièvement les conséquences méthodologiques. Les méthodes elles-mêmes sont largement présentées aux chapitres 3 et 4, ainsi cette section sera brève.

2.3.1 Le tri libre

Une méthode de tri libre permet de s'inscrire dans le cadre théorique validé de l'organisation cognitive en catégories naturelles. Cette méthode a été développée à l'origine pour des catégories d'objets biologiques (par exemple pour représenter une taxinomie des espèces vivantes). Notre utilisation de cette méthode est décrite en sections 3.2.2 et 4.2.2 et il n'en est donc fait en cette section qu'une brève description. [Gaillard 2009] propose une vision synthétique de cette méthode adaptée aux objets acoustiques. Une tâche de tri consiste classiquement à présenter simultanément les stimuli étudiés et à demander au sujet de les grouper (le plus souvent, on demande de classer dans le même groupe les stimuli qui se ressemblent). L'aspect « libre » de la tâche consiste à laisser le sujet maître des catégories qu'il réalise : il utilise les critères qu'il choisit, il réalise autant de catégories qu'il le souhaite. Une procédure de tri libre, en ceci qu'elle respecte les principes de la catégorisation naturelle, est relativement accessible et familière pour les sujets, d'autant plus que l'objet d'étude s'y prête. Ainsi, comme on le verra en sections 3.2.2 et 4.2.2, nous faisons l'hypothèse que le guitariste électrique est capable de différencier des guitares électriques différant par leur matériau de touche, et que la présentation de stimuli sonores produits par des guitares de lutherie différentes donnera lieu à une catégorisation comportant autant de groupes que de lutheries.

Les catégories naturelles étant structurées par des ressemblances à des prototypes, l'analyse des résultats d'une tâche de catégorisation libre traduit les ressemblances en termes de distance, et utilise des méthodes d'analyses non dimensionnelles, telle l'algèbre des arbres additifs, qui tient compte de la structure d'espace catégoriel régissant, d'après la théorie que nous avons choisie, la représentation en mémoire de la perception humaine. Des références à ce sujet sont données aux chapitres suivants, mais on peut d'ores et déjà se référer à [Poitevineau 2009].

Nous finissons par une précision de terminologie. Pour une catégorie donnée, on appelle :

description en extension la description de la catégorie par l'énumération des objets lui appartenant (cette description est représentée par les arbres additifs) ;

description en intension la description de la catégorie par l'énumération des attributs communs aux objets lui appartenant (cette description est accessible par l'analyse des verbalisations accompagnant la tâche de tri).

2.3.2 La tâche de jeu et verbalisation libre

Dans notre démarche, le discours est le vecteur de la subjectivité, c'est grâce à lui que nous avons accès aux ressentis et connaissances du sujet. Nous souhaitons donc accéder aux connaissances et ressentis du sujet lui-même, et non à des connaissances partagés et de sens commun. A l'instar de la tâche de tri libre, il est extrêmement important que la tâche de verbalisation proposée au sujet soit également libre et n'impose aucune normalisation du discours.

Une remarque valable également pour la tâche de tri libre est qu'il n'est pas inutile d'insister, lors de l'exposition des consignes régissant les tâches des tests perceptifs, sur l'importance du ressenti du musicien lui-même. Les consignes comprennent donc à volonté des formules telles que « selon vous », « d'après votre ressenti », etc. [Guastavino 2009]. Il est également dit au sujet que les tâches qui lui sont proposées n'attendent ni bonne, ni mauvaise réponse (et parfois pas de réponse du tout, si la tâche s'avère non pertinente pour le sujet expert).

Enfin, nous nous inscrivons dans une démarche expérimentale située, c'est-à-dire que nous proposons au sujet de verbaliser son ressenti lorsqu'ils est amené à réaliser la tâche pour laquelle il est expert : jouer de la guitare. La phase de jeu est également libre, afin de laisser le guitariste utiliser son instrument comme à son habitude.

2.4 Positionnement de l'étude perceptive dans le cas de la guitare électrique *solid body*

Les études de [Navarret 2006 2009] permettent d'avoir un aperçu de la richesse et de la spécificité du vocabulaire des guitaristes électriques quand il leur est demandé leur avis sur leur instrument. Relatant un entretien lors d'un test de trois guitares différant par le matériau de leur corps, cette étude montre bien la complexité des verbalisations des joueurs de guitare électrique, et la réelle difficulté à les interpréter en l'absence de connaissance préalable du cadre sémantique du discours des musiciens. Ainsi, le guitariste électrique parle souvent de « *sustain* », mot qui semble être spécifique aux guitaristes électriques : ce mot qui semble omniprésent dans la description du son d'une guitare électrique revêt-il une signification partagée dans la communauté ? Qu'est-ce qu'un son « claquant » ? Comment expliquer la diversité des critères utilisés et des jugements exprimés lors de jeu en son « clair », en son « saturé », ou non branché ?

Compte tenu de la spécificité de l'instrument et de l'absence d'étude préalable calibrant les sensations et le vocabulaire des guitaristes électriques, nous sommes contraints de ne faire aucune hypothèse sur les critères utilisés par les guitaristes électriques ou sur la signification des mots qu'ils emploient [6]. Nous mettons alors en place une méthode de psychologie expérimentale s'inscrivant dans les cadres théoriques de la cognition située, de la catégorisation naturelle, de l'écologie et se situant dans le champ de la psycholinguistique pour accéder au ressenti des guitaristes électriques via l'analyse de leur discours. Le chapitre 3 détaille la méthode expérimentale, alors que le chapitre 4 donne une vue synthétique de l'étude effectuée. Enfin, le chapitre 5 résume et conclut l'approche perceptive de la guitare électrique et de ses éléments de lutherie, qui s'est construite en parallèle de l'approche mécanique exposée en partie III : les deux approches sont complémentaires et se sont enrichies mutuellement au cours de ce travail de thèse.

6. [Fritz *et al.* 2012] notent bien que la sémantique des mots dépend du contexte : pour les mêmes violonistes, le sens des mots peut différer selon l'objet à qualifier (la qualité sonore des cordes graves ou aigues par exemple). Il y a donc fort à parier que cette sémantique mouvante soit constatée *a fortiori* si on considère un autre instrument (la guitare électrique) ou une autre population (les guitaristes électriques).

Chapitre 3

Démarche expérimentale

On pourra constater que les protocoles expérimentaux et les méthodes d'analyse décrits dans ce chapitre s'inscrivent pleinement dans les cadres théoriques exposés et choisis au chapitre précédent. Ainsi, l'accent a été mis sur l'approche située de l'étude cognitive, sur le respect de l'organisation cognitive en structures catégorielles, sur l'écologie de la situation expérimentale et sur l'utilisation des méthodes de la psycholinguistique pour accéder au et objectiver le subjectif.

Ce chapitre est composé de deux parties. La première partie relate une première expérience dans notre recherche sur les aspects perceptifs de la guitare électrique *solid body* (section 3.1). Certains résultats de cette première expérience, qui a constitué la base expérimentale de la troisième partie des travaux de thèse de [Navarret 2013a] et des travaux de master de [Paté 2011], ont servi à la mise en place de l'expérience qui est au cœur du présent volet de cette thèse, et qui est présentée en section 3.2.

3.1 La jonction du manche au corps – Une première étude

L'étude perceptive présentée dans cet ouvrage découle d'une étude préliminaire réalisée en 2011. Le cadre en était la thèse universitaire de Benoît Navarret et le stage de Master 2 d'Arthur Paté. L'étude est largement relatée dans [Navarret 2013a; Paté 2011; Paté *et al.* 2012b], ainsi il n'en sera fait ici qu'un bref exposé.

3.1.1 Contexte et problématique

Cette première étude perceptive avait deux objectifs. Un objectif s'inscrivait dans la problématique de la thèse de Benoît Navarret et visait à accéder aux représentations collectives de la guitare électrique *solid body* chez les guitaristes électriques via la citation de modèles de références, d'après le discours des musiciens. Le deuxième objectif était lié à un sujet de recherche émergeant alors au sein de l'équipe LAM de l'Institut Jean le Rond d'Alembert : l'influence des éléments de lutherie sur le comportement vibratoire de la guitare électrique *solid body* et sur le ressenti du musicien, qui a résulté en la présente thèse. C'est ce deuxième objectif qui nous intéresse ici.

L'élément de lutherie étudié était alors le mode de jonction entre le corps et le manche. En lutherie de guitare électrique, cette jonction peut être traditionnellement réalisée de trois manières. Le manche et le corps peuvent être faits dans deux pièces de bois différentes, dans ce cas manche et corps sont soit vissés (technique employée pour les modèles de référence *Stratocaster* et *Telecaster* du constructeur *Fender*), soit collés (technique employée pour les modèles de référence *Les Paul* et *SG* du constructeur *Gibson*). La construction peut aussi être de type « manche traversant », c'est-à-dire qu'une seule pièce de bois est utilisée pour aller de la tête à l'extrémité opposée du corps, deux « ailes » de bois étant rajoutées sur les côtés du corps afin de compléter sa forme. Des neuf guitares spécialement construites pour l'étude par les neuf apprentis luthiers (classe de BMA) de l'année universitaire 2010–2011 à l'Itemm et étudiées mécaniquement (voir le chapitre 8), trois ont été soumises au jugement des musiciens. Une avait un manche collé (C), une autre un manche vissé (V), et la dernière un manche traversant (T), tout

étant fait pour que les guitares soient les plus identiques possible par ailleurs : mensurations de la *Gibson Les Paul Junior DC*, bois issus des mêmes lots, utilisation des mêmes machines et outils par tous les apprentis-luthiers sous la même supervision pédagogique et dans les mêmes lieux aux mêmes moments (hygrométrie et température étaient donc similaires). Précisons que la conception des guitares a permis de dissimuler la jonction du manche au corps aux yeux des guitaristes (voir la figure 8.4 au chapitre 8) : le test peut donc être qualifié de « test à l'aveugle » sans qu'il ait été besoin de recourir à des artifices tels qu'un assombrissement de la salle de test. Il s'agissait de tester si les guitaristes étaient sensibles aux variations de cet élément de lutherie, et, si oui, de savoir comment ils exprimaient leur sensibilité.

Le protocole de test mis en œuvre était de type « jeu et verbalisation libres » : chacun des vingt-deux guitaristes [1] ayant participé avait accès aux trois guitares, pouvait en jouer à volonté dans un ordre qu'il décidait. Le choix lui était laissé de jouer les guitares non-branchées (« acoustique ») ou branchées à l'amplificateur *Fender Blues Junior* en utilisant ou non une pédale de distorsion *Ibanez Tube Screamer*. Un guitariste en situation de test est représenté en figure 3.1. L'unique directive reçue par chacun des guitaristes était d'exprimer librement son ressenti lors du jeu des guitares. Aucun critère de jugement, aucun vocabulaire, aucune démarche n'ont été imposés ni même proposés. L'idée était de placer le guitariste dans la situation la plus habituelle possible, en témoigne la consigne qui lui était donnée :

> *Nous allons te demander de tester ces guitares comme si tu étais dans un magasin en vue d'un achat ou d'un concert par exemple.*

De l'expression verbale des premiers ressentis du sujet est née un dialogue entre le guitariste et les expérimentateurs (Benoît Navarret et moi-même). Le rôle des expérimentateurs était de relancer le guitariste, notamment en lui demandant de reformuler son vocabulaire, d'expliciter les mots qu'il employait, de détailler sa méthode de test de guitares, etc., tout cela sans jamais utiliser de vocabulaire qui n'ait été précédemment employé par le guitariste lui-même, ce afin d'être le moins suggestif possible. Les entretiens ont été enregistrés et retranscrits par Benoît Navarret pour son travail de thèse. Les analyses ont été réalisées par Benoît Navarret et moi-même. En ont été tirées [Navarret 2013a] une cartographie des modèles de guitare électrique forgeant la mémoire et les références des guitares électriques, ainsi qu'une description des protocoles de test utilisés par ces mêmes musiciens. Le paragraphe 3.1.2 indique les résultats de cette étude préliminaire qui sont exposés dans [Paté 2011; Paté *et al.* 2012b] et réutilisés lors du test de 2013 sur le matériau de touche.

3.1.2 Résultats

A l'issue de la phase de jeu et de verbalisation, c'est-à-dire en marge des données verbales utilisées par [Navarret 2013a], il a été demandé à chaque guitariste une tâche écrite de synthèse. Elle constistait à remplir des fiches d'évaluation pour chacune des guitares. Ces fiches d'évaluation sont décrites dans [Paté 2011; Paté *et al.* 2012b]. De manière générale, il s'agissait pour le guitariste de choisir autant de critères (l'expérience a montré que les guitaristes électriques choisissaient entre un et quatre critères lors d'une telle tâche) qu'il le souhaitait et de juger les guitares selon ces critères au moyen d'échelles libres. La seule contrainte était que les critères devaient avoir été pertinents pour le guitariste lors de son test des guitares. L'analyse des fiches d'évaluation a fait l'objet d'autres travaux [Paté 2011; Paté *et al.* 2012b]. La diversité apparente des critères choisis rend difficile la comparaison inter-guitaristes (et par là la généralisation des résultats), et la relative difficulté éprouvée par les guitaristes pour l'exécution d'une

1. Ces vingt-deux guitaristes étaient des professionnels et des amateurs, tous joueurs de guitare électrique spécifiquement. Nous qualifions de « professionnel » un guitariste qui vit d'une activité liée à la guitare électrique : concerts, pédagogie, tests de matériel, enregistrements, etc. En conséquence, l'amateur, même si ses niveaux technique et musical peuvent être meilleurs que ceux d'un professionnel, sera celui dont l'activité principale n'est pas directement liée à la pratique de la guitare électrique.

FIGURE 3.1 – Un guitariste participant à la première étude perceptive de 2011 portant sur la jonction entre le manche et le corps.

telle tâche de jugement sur échelle libre (où le critère de jugement est lui-même libre) nous conseille de proposer aux musiciens d'autres manières d'évaluer les instruments.

Ce qui nous intéresse pour la présente étude est le corpus constitué par les critères choisis par les vingt-deux guitaristes. Ces critères sont récapitulés dans le tableau 3.1. Ces formes lexicales ont été utilisées comme « amorces » lors de la recherche de mots dans le corpus issu des verbalisations (voir section 3.2.2.2) du test principal de cette thèse, présenté en section 3.2. Ces critères ont également pu, d'après les analyses présentées dans [Navarret 2013a; Paté *et al.* 2012b] être regroupés en cinq catégories dénommées « équilibre », « *sustain* », « brillance », « confort de jeu », et « attaque ». Ces dénominations sont le choix délibéré de l'expérimentateur. Sachant que ces catégories représentent des concepts ou ressentis pertinents pour les guitaristes électriques, elles sont utilisées lors de l'entretien de l'étude perceptive sur le matériau de touche pour engager la conversation entre le musicien et les expérimentateurs, comme détaillé en section 3.2.3.

3.2 Le matériau de la touche

Les résultats principaux du test perceptif sur le matériau de touche sont exposés de manière synthétique au chapitre 4. Néanmoins, la méthode d'analyse linguistique ayant permis d'obtenir ces résultats n'est pas classique dans le domaine de l'acoustique et le format d'article ne permet pas que sa description soit très détaillée. Cette section se permet donc une exposition de l'étude, de ses protocoles expérimentaux et de ses méthodes d'analyse, incluant les étapes intermédiaires, notamment dans le souhait pédagogique que les méthodes puissent être réutilisées dans d'autres études.

L'élément de lutherie concerné cette fois est le matériau de la touche, qui apparaît comme essentiel pour les guitaristes électriques.

3.2.1 Problématique

La question directrice de l'étude se formule ainsi :

Table 3.1 – Vocabulaire utilisé dans les fiches d'évaluation remplies à l'issue de la première expérience portant sur la jonction du manche au corps. Ces mots sont utilisés comme amorces pour recueillir les mots dans le corpus de retranscriptions des entretiens portant sur le matériau de la touche. Etant utilisés comme amorces, ces mots sont présentés en ordre arbitraire sans mention de leur nombre d'occurrences. Remarquons l'omniprésence des formes nominales au sein de cette liste de mots. Cela est très probablement dû au fait qu'il est demandé aux guitaristes de fournir des « critères », le mot « critère » étant lui-même une forme nominale.

confort, homogénéité, *sustain*, sensibilité à la dynamique, toucher, son clair, son saturé, évaluation poids, sustain, pureté, clarté, équilibre harmonique (spectral), clarté acoustique (non branché), clefs, mécaniques d'accord, équilibre sonore, manche, sonorité, réglage, jouabilité, rendu sonore, jeu en accord, polyphonique, solo rock, grave de l'instrument, spectre sonore, résonance, attaque du son, balance spectrale, vie du son, profondeur, brillance, *sustain*, esthétique et caractéristiques, équilibre tonal, niveau sonore, agressivité de l'aigu (cordes si mi), masse, réglage du manche, poids, réponse aux doigts sur le manche (main gauche, main droite), hauteur du sillet de tête, variété de timbre, justesse et tempérament, son, expressivité de l'instrument, lutherie, objet, physique, couleur, facilité de jeu

➢ Un changement du bois de la touche est-il perceptible par le guitariste électrique ?

Découlant de cette interrogation, et en tenant compte des constatations des chapitres précédents, viennent naturellement les deux questions secondaires suivantes :

➢ Comment les guitaristes électriques décrivent-ils le son (et le ressenti) en général ? (Comment calibrer le discours des guitaristes électriques, en extraire les invariants ?)

➢ Comment les guitaristes électriques décrivent-ils le son (et le ressenti) de différents matériaux de touche en particulier ? (Comment réutiliser notre compréhension du vocabulaire des guitaristes pour la caractérisation perceptive de l'élément de lutherie considéré ?)

Ces questions peuvent se reformuler en :

1. Les guitaristes électriques sont-ils capables de faire perceptivement la différence entre une touche en ébène et une touche en palissandre ?
2. Si oui, à quel(s) critère(s) font-ils appel pour caractériser les deux constructions ?
3. Peut-on avoir accès à ces critères au travers d'une analyse linguistique de leurs verbalisations ?

Le travail des apprentis-luthier de l'Itemm (classe de BMA de l'année scolaire 2011–2012) nous a fourni six guitares copies de *Gibson Les Paul Junior* qui sont les plus identiques possible et ne comportent qu'une seule différence intentionnelle de lutherie : le matériau de la touche. Trois guitares (appelées G1, G3 et G5) ont une touche en ébène (en anglais *ebony*), et trois guitares (appelées G2, G4 et G6) une touche en palissandre (en anglais *rosewood*). Deux tests successifs sont proposés aux guitaristes : un test de catégorisation libre d'extraits sonores, présenté en section 3.2.2, puis un test de verbalisation libre en situation de jeu, présenté en section 3.2.3. Dix guitaristes professionnels [2] ont pris part à l'étude.

2. Notons que le test de catégorisation libre a été reproduit sur une population de neuf guitaristes amateurs. Ceci a fait l'objet du stage d'Elsa Jauffret, étudiante en L3 sciences et musicologie à l'UPMC et Paris-Sorbonne, du 25 févier au 28 mars 2014. Les données sont en cours d'analyse.

3.2.2 Catégorisation libre

Premièrement un test d'écoute sous la forme de trois tâches consécutives de catégorisation libre est proposé à dix guitaristes électriques. Cette section rappelle la procédure, la méthode d'analyse, certains résultats, et donne quelques éléments complémentaires à la partie développée du chapitre 4. Nous avons construit le matériel expérimental d'une tâche de catégorisation libre sur la base des catégories de la lutherie ou de la mécanique : guitares à touche en ébène ou guitares à touche en palissandre. Il s'agit de savoir si les catégories des guitaristes sont les mêmes que celles des mécaniciens ou des luthiers.

3.2.2.1 Protocole expérimental

Chacune des trois tâches correspond à l'utilisation d'une phrase musicale de style différent. La procédure suivante est donc répétée trois fois :

Avant les tests, enregistrement : la phrase musicale est interprétée par Benoît Navarret sur chacune des guitares dont la sortie du *pickup* est enregistrée via un boîtier de direct (*DI box*) envoyant le signal vers une carte son d'ordinateur (enregistrement) et vers un amplificateur (retour auditif pour plonger le guitariste enregistrant dans une situation habituelle). Deux enregistrements informatiques sont dupliqués (copie du fichier) : ils constituent des « leurres » (*replicas*) pour évaluer l'adaptation du test. Au final, huit enregistrements de la phrase musicale sont disponibles : six guitares et deux leurres.

Pendant chaque test, rediffusion et jugement : les extraits sont envoyés par la carte son vers une boîte de *re-amping* (*re-amp box*, qui est l'inverse une boîte de direct) qui adapte le signal pour le transmettre à l'amplificateur. Le sujet est face à une interface informatique [3] sur laquelle chacun des extraits est symbolisé par une icône. Le guitariste est libre de re-diffuser chaque enregistrement et de déplacer les icônes dans le plan de l'interface graphique. La consigne suivante lui est exposée :

> *pouvez-vous regrouper les extraits qui vous semblent se ressembler, et distinguer dans des groupes différents les extraits qui vous semblent différents ? Vous faites autant de groupes que vous le souhaitez.* (expérimentateurs) [4]

Les catégories sont ainsi définies en extension. La deuxième consigne est :

> *Pouvez-vous maintenant décrire les critères selon lesquels vous avez différencié chacun des groupes ?* (expérimentateurs)

Ceci produit une définition en intension des catégories, c'est-à-dire une description de leurs propriétés.

On voit que la phase d'enregistrement et la phase de rediffusion s'assurent que le guitariste-expérimentateur ou le guitariste-sujet est placé dans des conditions écologiques d'écoute, à travers son amplificateur.

3.2.2.2 Méthode d'analyse

Il s'agit à présent d'analyser, pour chacune des trois tâches de catégorisation libre, les dix catégorisations produites ainsi que les descriptions associées.

3. Nous avons utilisé le logiciel *TCL-LabX* développé par Pascal Gaillard [Gaillard 2009]

4. Au cours de ce chapitre, les mots en italique désigneront les mots utilisés par les sujets. Lors de citations comme celle-ci, la citation en italique est suivie d'une note parenthésée indiquant quel sujet a prononcé la citation. La mention « (expérimentateurs) » indique une phrase des expérimentateurs. A l'intérieur des citations, les mots entre crochets sont de notre seul fait et apportent des précisions, notamment de contexte (quelle guitare est jouée).

Catégories La méthode d'analyse des catégories repose sur des travaux mathématiques [Barthélémy & Guénoche 1991] appliqués aux catégories naturelles de différentes modalités sensorielles, notamment de l'audition [Guyot 1996; Gaillard 2000; Guastavino 2003] et détaillée en section 4.3.1. A partir de la construction de la matrice de co-occurrences des stimuli (matrice prenant en compte tous les sujets, donc résultant d'un consensus), on calcule une mesure de dissimilarité qui est ensuite adaptée à une distance additive d'arbre. Cette distance permet la représentation des catégories consensuelles sous forme d'arbre.

Verbalisations L'analyse des commentaires associés à ces catégories est détaillée en section 4.4.1.2. En comparaison des verbalisations produites lors de la phase de jeu (section 3.2.3), les commentaires décrivant intensivement chaque catégorie se sont révélés succincts et souvent non sous forme de phrases auxquelles une analyse sémantique peut être appliquée. Leur caractère succinct peut s'expliquer par le fait que les commentaires de la catégorisation libre devaient se rédiger au clavier d'ordinateur, ce qui ne permet pas une aussi grande aisance que quand la verbalisation est orale. On peut aussi voir dans la concision la confirmation d'une remarque de [Giboreau *et al.* 2009] dans le cadre de l'analyse sensorielle :

> *[...] la diversité lexicale est plus grande lorsque chaque échantillon est décrit pour lui-même [dans notre cas, ceci sera rendu possible lors de la phase de jeu] que lorsque la description s'attache à un groupe de produits [c'est la description des catégories].* ([Giboreau *et al.* 2009], page 221)

Pour pouvoir analyser les commentaires des catégories, il a été fait l'hypothèse que les mots employés pour les commentaires associés aux catégories avaient la même signification que lorsqu'ils étaient employés lors de la tâche de jeu et verbalisation qui s'est ensuivi. Les descriptions de chaque catégorie ont donc été groupées d'après les catégories sémantiques dégagées du corpus des verbalisations en situation de jeu, ce qui nous permet la représentation synthétique des figures 4.6 à 4.8.

3.2.2.3 Résultats

Les arbres des figures 4.6 à 4.8 représentant les résultats des trois tâches de catégorisation libre, et les descriptions (exprimées à l'aide des méta-critères obtenus lors de l'analyse sémantique du corpus des verbalisations en phase de jeu) extensives de chaque catégorie, montrent que les partitions des guitaristes ne recouvrent pas la distinction *a priori* suivant le matériau de la touche. La complexité des stimuli n'est ni réductible aux paramètres physiques, ni à la seule sollicitation auditive. D'autres différences de lutherie, que nous nous sommes efforcés de minimiser, ont possiblement été perçues entre les guitares. De plus, on note que les catégories réalisées par les guitaristes changent en fonction (du style) de l'extrait musical : des guitares jugées similaires pour un certain style musical ne le sont pas pour un autre style. Ce résultat n'est somme toute pas étonnant, si on considère que les enregistrements et l'interprétation musicale est figée et imposée en tant que telle aux guitaristes. Ceci nous invite à nous orienter vers des tâches où le musicien est davantage impliqué (voir la phase de jeu en section 3.2.3). En conclusion de la tâche de catégorisation libre, il s'avère que chaque guitare semble être perçue plutôt comme un individu que comme appartenant à une « famille ».

Une liste complète des mots utilisés dans les commentaires des catégories a été réalisée avant l'analyse linguistique du corpus des verbalisations en phase de jeu. Ainsi que les mots des fiches d'évaluation du test de 2011, cette liste a fourni des amorces pour la recherche de mots au sein du corpus. Ces mots des commentaires de la tâche de catégorisation libre constituent le tableau 3.2.

3.2.3 Verbalisation libre en phase de jeu

Cette phase du test a l'avantage de ne pas limiter la perception du guitariste à son seul aspect auditif, mais de lui permettre de ressentir les guitares via d'autres modalités sensorielles, telles que le toucher

TABLE 3.2 – Vocabulaire utilisé dans les commentaires écrits associés aux catégories effectuées lors du test de catégorisation libre sur le matériau de touche. Ces mots sont utilisés comme amorces pour recueillir les mots dans le corpus de retranscriptions des entretiens portant sur le matériau de la touche. Etant utilisés comme amorces, ces mots sont présentés en ordre arbitraire sans mention de leur nombre d'occurrences.

harmonique, aigu, micro aigu, micro chevalet, filtre *shelf*, brillance, brillant, son, médium, agréable, doux, agressif, équalisation, *EQ*, fréquence, gêne, équilibre, moelleux, dur, compressé, métallique, volume, puissant, plein, large, spectre, double-bobinage, maigre, simple-bobinage, attaque, fin, chaleur, basses, creusé, gros son, hors-phase, micro milieu, micro non-*splitté* ou non hors-phase, grave, *funky*, ouvert, clinquant, *twang*, criard, sélecteur, niveau, mat, claquant, mélodie, présence, air, haut-médium, médium-aigu, bas-médium, *distortion*, altéré, définition, défini, accords, cotoneux, incisif, désagréable, *Les Paul*, bas, clarté, sale, propre, solo, rondeur, *humbucker*, grain, nerveux, épais, *sustain*, *AC/DC*, *Gibson*, tranché, micro céramique, *cheap*, *mix*, micro *alnico*, chaud, mordant, gain, en place, juste, justesse, qui pique, couleur, cristallin, *crunch*, baveux, sonorité, sombre, pédale, ampli, s'éclaircit, *Telecaster*, *Stratocaster*, timbre, nerveusement, zinguerie, manche, chevalet, micros couplés, sec, tonalité, confiné, dynamique, adapté au style, pêchu, micro manche, distordu, centré, caractère, clair, dérange, éloigne, entend, gras, résonance, ressortir, riche, sensation, tranché, agressivité

ou le ressenti vibratoire par exemple. On redonne également au guitariste la maîtrise de l'instrument, du son, de la gestion de son interaction avec la guitare. C'est dans ce contexte que le guitariste exerce habituellement son expertise d'évaluation de guitares.

3.2.3.1 Protocole expérimental

Afin de préserver la concentration des guitaristes, il a été choisi de faire tester quatre des six guitares. Celles-ci ont été choisies par les expérimentateurs, Benoît Navarret et moi-même, selon des critères de ressemblance ergonomique : nous avons retenu les guitares nous ayant semblé les plus proches en termes de profil de manche et de poids. Deux guitares à touche en ébène (G3 et G5) et deux guitares à touche en palissandre (G4 et G6) ont été jouées. Dans la suite, on pourra abréger ébène par E, et palissandre par P.

La tâche de verbalisation en situation de jeu a eu lieu dans une salle assombrie, ce afin de masquer les différences visuelles qui auraient pu être remarquées par les guitaristes. De fait, aucun guitariste n'a mentionné de différence visuelle entre les touches. Ainsi que lors de la première expérience sur la jonction du manche au corps (section 3.1), il a été demandé au guitariste de décider de son protocole d'évaluation des guitares comme bon lui semblait. L'amplificateur et la pédale de distorsion étaient disponibles pour un usage facultatif. Le guitariste était à nouveau libre d'exprimer son ressenti à sa guise, avec son propre vocabulaire, non imposé par les expérimentateurs. Ceux-ci restaient cependant autorisés à demander des reformulations et précisions à chaque fois que l'emploi d'un nouveau mot non défini (c'est-à-dire non précédemment employé) faisait son apparition. Insistons encore une fois sur cette attitude à l'apparence délibérément naïve des expérimentateurs (qui est en réalité un requis méthodologique, une discipline

à s'imposer pour des chercheurs des sciences humaines) : ceux-ci ne sont pas censés avoir d'*a priori* ni de connaissances partagées sur la signification des mots employés par le guitariste, car cela pourrait influencer les réponses des sujets dans l'interaction avec les expérimentateurs. Nous croyons que seule cette posture scientifique demandant de manière incessante reformulations et explications permet d'accéder à la sémantique de chaque guitariste, et ainsi à sa représentation mentale de son ressenti.

Un élément doit être précisé : il a été constaté lors de l'étude de la jonction du manche au corps que l'expression verbale du ressenti (et les perpétuelles remises en question, doutes et confusions causés par les demandes de reformulations) n'était pas une tâche si commode pour les guitaristes. Il a donc été décidé, en début de test, de suggérer aux guitaristes des points de départ pour commencer la discussion. Ainsi, les cinq catégories de critères dont il a été question au paragraphe 3.1.2 ont servi à engager la discussion. La consigne de début d'entretien était :

> *Nous allons te demander de tester librement ces guitares comme si tu étais en magasin en vue d'un achat ou d'un concert. Nous te demandons d'exprimer librement ton ressenti sur les guitares. Le test précédent*[5] *a fait émerger certains critères comme importants pour les guitaristes, il s'agit de la brillance, du sustain, du confort de jeu, de l'attaque et de l'équilibre. Si ces critères se rapportent à quelque chose qui te parle, tu pourras les utiliser.* (expérimentateurs)

Cette unique licence à la volonté de neutralité des expérimentateurs est justifiée par la première étude (section 3.1). Elle a eu l'effet escompté : les entretiens débutaient de manière plus naturelle, sans imposer de critères de jugement aux guitaristes (car premièrement les critères ont été indirectement choisis par les guitaristes eux-mêmes, et deuxièmement ceux-ci ont eu tendance à faire bifurquer leur discours sur les aspects du ressenti qui leur tenaient le plus à cœur).

3.2.3.2 Méthode d'analyse

La tâche de jeu et de verbalisation libres permet justement au guitariste de décliner et dépeindre très finement les attributs propres à chaque guitare. L'analyse des verbalisations par une méthode linguistique, qui est héritée de travaux précédents, par exemple [Cheminée & Dubois 2009; Cheminée 2006 2009], permet :

- de déterminer les liens entre les différents mots employés tout au long du test de jeu, c'est-à-dire au final d'inférer un ressenti à partir de l'ensemble des mots qui l'évoquent ;
- d'associer ensuite certains ressentis (ou « évaluations ») à certaines guitares ;
- d'associer enfin certains ressentis (ou « évaluations ») à certains groupes de guitares, en l'occurrence les groupes déterminés par le matériau de touche.

Chacun des dix entretiens possédait une durée d'approximativement une heure et demi. La première étape de l'analyse linguistique consiste à réaliser une transcription intégrale et fidèle des entretiens. En particulier, il faut s'attacher à transcrire les moindres mots, hésitations, relances par les expérimentateurs, en gardant l'information sur la guitare qui est actuellement jouée ou évaluée. Il faut compter raisonnablement une journée de transcription et de mise en forme par entretien. La transcription d'un entretien avec un guitariste est présentée en annexe C. L'expertise linguistique s'exerce sur le corpus constitué de l'ensemble des transcriptions ainsi réalisées. Le corpus est une formidable source d'informations, dont la richesse pourrait donner lieu à beaucoup d'études et analyses. La problématique que nous nous sommes fixée (sur la possibilité et les moyens de la discrimination entre une touche en ébène et une touche en palissandre) a orienté et limité notre analyse. Des pistes complémentaires d'analyse de ce corpus sont évoquées en section 5.2.

5. La plupart des guitaristes de l'étude de 2013 sur le matériau de touche avaient déjà participé à l'étude de 2011 sur la jonction du manche au corps. Dans le cas contraire, le contexte ainsi que certains résultats de l'étude précédente étaient exposés au guitariste

Le nombre de mots différents est très élévé et le corpus n'est pas analysable en son état brut. La première étape de l'analyse linguistique consiste donc en une réduction du corpus. L'idée est de condenser l'information contenue par ce grand nombre de mots en procédant à des regroupements par proximité sémantique, regroupements que nous appellerons « classes d'équivalence ». Au sens de la théorie de la catégorisation naturelle, les classes d'équivalence sont bien des catégories sémantiques. Par elles on peut accéder à la signification des mots employés par les guitaristes en situation de jeu. Les catégories sémantiques permettent à la fois de connaître le ressenti des guitaristes sur chacune des guitares de l'étude et de répondre par là à notre problématique, mais aussi, et de manière plus générale, d'établir un cadre sémantique et lexicologique pour de futures études de la perception de la guitare électrique par ses praticiens.

Identification des catégories sémantiques Nous commençons par la recherche automatique de mots précis dans le corpus. On commence par rechercher les mots-amorces décrits dans les tableaux 3.1 et 3.2. Pour chaque occurrence de chaque mot-amorce, la phrase le contenant est relevée et archivée. En conservant la phrase contenant le mot, on garde une trace du contexte dans lequel le mot a été prononcé (quel guitariste à propos de quelle guitare) et une trace des mots associés. Par exemple, on peut trouver, en recherchant l'amorce *dur*, que le sujet 6 a prononcé la phrase :

> *Ah oui, elle a un son plus chaleureux, et en même temps plus dur, c'est-à-dire que si j'attaque dans les aigus, le son il devient pas, il fait pas sortir des harmoniques, il reste présent, dans les aigus.*

Les mots associés ici à *dur* sont *chaleureux*, *j'attaque*, *aigus*, *son*, *sortir [des harmoniques]*, *harmoniques* et *présent*. Les mots associés font à leur tour l'objet d'une recherche et d'une récupération systématique au sein du corpus. Il est bien pris garde de rechercher également les autres formes des mots cherchés, notamment les formes flexionnelles telles les pluriels, féminins, conjugaisons, substantivation, etc.

Lorsque toutes les phrases contenant des occurrences des amorces et des mots associés ont été extraites du corpus, le constat est fait que tous les mots exprimant le ressenti des guitaristes ont été répertoriés. L'inventaire des phrases doit être « nettoyé » en éliminant les homographes non pertinents dans notre contexte. L'exemple classique est celui du mot *son* : garder les phrases où il est employé en tant qu'adjectif possessif est inutile dans notre démarche.

Il est ensuite possible d'utiliser des outils linguistiques afin d'établir des relations de proximité (ou au contraire d'éloignement) sémantique entre les mots. Des indices linguistiques permettant d'établir un lien de proximité sémantique entre deux mots peuvent être :

- les reformulations, ou définitions, typiquement à la suite d'une question des expérimentateurs de la forme *quand tu dis « précis », qu'est-ce que tu veux dire par là ?*, ou annoncées par des marques du type *c'est-à-dire*, *c'est que*, ou de méta-discours (au sein du discours, le locuteur parle de son discours) de la forme *quand je dis « aigrelette » c'est que ...*,
- les appositions, typiquement marquées par des conjonctions du type *et*, ou par la simple juxtaposition de deux mots,
- les oppositions, typiquement exprimées par des locutions du type *alors que*, *mais*, *plus que*, *moins que*, etc.

Cette liste n'est évidemment pas exhaustive, mais elle présente l'avantage de pouvoir être au moins en partie automatisée lors d'études futures. Les autre indices sont relevés par la compréhension de la syntaxe française par l'expérimentateur.

Le tableau 3.3 présente une synthèse de l'application de la méthode décrite ci-dessus pour établir la sémantique des mots *précision* et *précis*. La colonne « énoncé » liste les extraits du corpus où les mots concernés sont employés. L'application d'indices linguistiques permet de trouver quels mots sont en rela-

tion de proximité sémantique avec les mots *précision* et *précis* (colonne « synonymes, équivalents »), et lesquels sont en relation d'opposition sémantique (colonne « antonymes, opposés »). La colonne « objet décrit », si elle n'est pas très utile dans le cas de la *précision*, peut s'avérer très informative dans des cas tels que l'*attaque* où l'objet peut décrire aussi bien le son, la guitare, ou le jeu (donc l'interaction entre le musicien et son instrument). Dans le tableau 3.3, les formes indiquant une reformulation sont indiquées en gris, le méta-discours en majuscules, les appositions sont indiquées en caractères gras et les formes indiquant des oppositions sont soulignées.

Le tableau 3.3 montre ainsi par exemple la proximité sémantique entre la *précision* et la *clarté* ou la *netteté*. Au contraire, on montre par exemple l'opposition sémantique entre la *précision* et le fait pour les notes de *baver*. En n'examinant que les occurrences de *précis/précision*, on ne retrouve pas immédiatement tous les mots du tableau 4.3 listant tous les membres des catégories sémantiques. Par exemple, rien ne nous permet, d'après le seul tableau 3.3, de conclure quant à l'opposition sémantique (affirmée dans le tableau 4.3) entre les mots *précision* et *brouillon*, car aucune phrase comportant les deux mots n'est relevée. La proximité et l'opposition sémantiques peuvent être déduites par transitivité : si deux mots sont synonymes, alors l'antonyme de l'un sera supposé être l'antonyme de l'autre. Par exemple le tableau 3.3 rapproche *précision* et *définition*. On montre par ailleurs qu'en analysant les phrases comportant des occurrences de *définition* il existe une opposition sémantique entre *définition* et *brouillon*. Ainsi, on est en droit d'opposer *précision* et *brouillon*. De la même manière, on peut parvenir à rapprocher ou éloigner sémantiquement un certain nombre de mots du mot *précision* en cherchant dans le corpus les passages où il est question de *mélange* des notes, ou d'entendre *distinctement* les notes.

Ce qui a été montré pour *précis/précision* est opéré sur tous les mots répertoriés du corpus. Le résultat est l'ensemble des classes d'équivalence montré dans le tableau 4.3. Pour désigner chaque classe d'équivalence, nous choisissons (c'est un choix arbitraire de l'expérimentateur) un des mots lui appartenant : ce mot est appelé « méta-critère » ou « étiquette » (*meta-criterion* ou *label*) et correspond aux « descripteurs » de l'analyse sensorielle. Ce méta-critère sera écrit en lettres capitales pour le différencier des mots extraits du corpus. Le corpus est à présent réduit et tous les jugements [6] produits sur les quatre guitares du test peuvent s'exprimer à l'aide des dix méta-critères du tableau 4.3. Il reste à redistribuer les évaluations de chacun de ces dix méta-critères sur chacune des guitares.

Redistribution des jugements sur chaque guitare Afin encore une fois d'objectiver au maximum l'analyse et de ne pas laisser le jugement de l'expérimentateur interférer, des critères linguistiques et grammaticaux sont choisis pour procéder à la redistribution des jugements. Comme il sera rappelé au chapitre 4, nous nommons :

« mot positif » tout mot d'une catégorie sémantique en relation de proximité sémantique avec l'étiquette de la catégorie. Ainsi par exemple les mots *précis*, *distinction* et *net* sont des mots positifs pour la catégorie PRECISION.

« mot négatif » tout mot d'une catégorie sémantique en relation d'opposition sémantique avec l'étiquette de la catégorie. Ainsi par exemple les mots *baveux* et *tordre* sont des mots négatifs pour la catégorie PRECISION.

Nous définissons ensuite deux types d'évaluation (ou de jugement) d'une guitare suivant un méta-critère : une évaluation positive et une évaluation négative. Pour chaque phrase où une guitare est décrite à l'aide d'un mot répertorié comme appartenant à une des dix classes d'équivalence, nous nommons :

évaluation « positive » l'usage d'un mot positif dans une phrase affirmative, ou l'usage d'un mot négatif dans une phrase négative

6. Remarquons que nous avons écarté les jugements hédoniques du type *j'aime/j'aime pas* en raison de la faible quantité d'information qu'ils véhiculent pour répondre à notre questionnement.

évaluation « négative » l'usage d'un mot positif dans une phrase négative, ou l'usage d'un mot négatif dans une phrase affirmative

L'identification des phrases affirmatives et négatives se fait classiquement par l'examen de la syntaxe des phrases, l'identification d'adverbes de négation de type *ne ... pas*, *pas*, etc. Insistons sur le fait que les dénominations « positif(ve) » ou « négatif(ve) » ne comportent strictement aucun jugement de valeur issu de l'appréciation de l'expérimentateur. Ces termes relèvent de la pure grammaire : est positif (respectivement négatif) tout mot allant dans le même sens (respectivement dans le sens opposé d') qu'un méta-critère. Le méta-critère est à comprendre comme une étiquette permettant d'avoir une vue synthétique d'une catégorie sémantique, et le choix d'un mot de la catégorie plutôt qu'un autre pour constituer cette étiquette est le choix arbitraire de l'expérimentateur. Le tableau 3.4 répertorie toutes les phrases exprimant un jugement sur une ou plusieurs des guitares du test à l'aide d'un mot de la catégorie PRÉCISION. Pour chacune de ces phrases, il est indiqué d'une croix si celle-ci est affirmative ou négative, si le mot utilisé pour décrire la guitare concernée est positif ou négatif, et si finalement l'évaluation de la guitare est dite positive ou négative. A ce niveau de l'analyse, nous utilisons les catégories sémantiques consensuelles, garder l'information sur le sujet ayant prononcé chaque phrase n'a plus de sens.

Une redistribution des jugements sur les guitares est évidemment effectuée pour chacune des dix catégories sémantiques sur le modèle du tableau 3.4. Cela conduit au tableau de synthèse 4.4, dans lequel on peut reconnaître quels méta-critères s'avèrent pertinents pour répondre à notre problématique sur la discrimination perceptive du matériau de touche d'une guitare électrique *solid body*.

3.2.3.3 Résultats

Comme il sera expliqué au chapitre suivant, nous tirons de l'analyse linguistique dix catégories sémantiques (soit dix regroupements de mots concentrés autour du même concept, du même ressenti), chacune désignée par un méta-critère : il s'agit de l'AGRESSIVITÉ, de l'ATTAQUE, des BASSES, de la BRILLANCE, de l'ÉQUILIBRE, des MÉDIUMS, des HAUT-MÉDIUMS, des BAS-MÉDIUMS, de la PRÉCISION et du SUSTAIN. Parmi ces dix catégories, trois permettent aux guitaristes, consciemment ou non, de discriminer les guitares en fonction du matériau de la touche. Ces critères sont l'ÉQUILIBRE, l'ATTAQUE, et surtout la PRÉCISION : une guitare à touche en ébène a davantage tendance à concentrer les évaluations « positives » de la PRÉCISION (lorsqu'on joue un accord, les notes se mélangent moins) qu'une guitare à touche en palissandre.

Table 3.3: Ensemble des extraits du corpus contenant les mots *précis(e)* ou *précision*. Les couleurs des cases indiquent la guitare dont il est question : bleu turquoise pour G3 (E), jaune pour G4 (P), vert pour G5 (E), rose pour G6 (P), et aucune couleur lorsque le sujet s'exprime sur toutes les guitares de l'étude, ou tient un propos plus général. Un code typographique est utilisé pour les indices linguistiques : majuscules pour le méta-discours, couleur grise pour les reformulations, caractères gras pour des appositions, soulignement pour les oppositions. La colonne « objet décrit » indique l'objet dont le guitariste parle : la présence d'un point d'interrogation signifie que l'objet décrit est déduit du contexte duquel est extraite la citation.

Sujet	Enoncé	Synonymes, équivalents	Compatible	Antonymes, opposés	Objet décrit
S2	donc on n'a pas beaucoup de bas médiums et de graves, ce qui donne cette définition quand le son est saturé sur les accords. Il n'y a pas de **boursouflure, on** a un son qui est assez précis.			boursouflure, bas-médiums, graves	le son
S2	Euh en son crunch, saturé, elle est vraiment intéressante parce qu'elle a pas trop d'harmoniques **et** elle donne quelque chose de très précis. Alors à ce moment-là c'est aussi l'ingé son qui parle et le réalisateur, c'est le genre de guitare qui va très bien se placer dans un contexte de production où il y a pas mal de choses autour et si on met une guitare saturée ça va pas baver dans tous les sens.	vraiment intéressante		beaucoup d'harmoniques, baver	le son ? la guitare ?
S3	J'sais pas y a des espèces d'harmoniques qui viennent se greffer là-dessus qui sont moins... c'est moins précis que sur celle d'avant, là, la 3. On a l'impression qu'il y a une espèce de double-note qui vient se greffer alors que je ne l'avais pas sur l'autre.			harmoniques qui se greffent, double-note qui se greffe	le son ?
S3	Si j'monte [une gamme], là d'un seul coup... j'ai la même attaque, hein... Là c'est très précis, et puis d'un seul coup ça va devenir plus sourd. Ah là, c'est parce que... on passe dans la définition plus aiguë... **et** ça enlève de la rondeur...	rondeur		sourd	le son ?
S3	dans un absolu c'qui m'convient l'mieux**, qui** soit bien équilibré dans tout le registre de l'instrument**, qui** réponde bien**, qui** ait un bon sustain avec la distorsion**, que** le son soit à la fois **clair, précis,** et déjà quand il est neutre**, qu'il** soit harmonieux, quand j'dis harmonieux, c'est-à-dire qu'il soit pas trop agressif, quoi...		clair, harmonieux, pas agressif		le son
S5	Un peu comme le cliché, de... quand on prend une Les Paul Standard par rapport à une Les Paul Custom, la Custom qui a une touche en ébène, tout est, enfin c'est tout de suite un peu plus précis quand on fait des accords plus riches	Les Paul Custom (touche ébène)			le son ? la guitare ?

Sujet	Enoncé	Synonymes, équivalents	Compatible	Antonymes, opposés	Objet décrit
S5	par rapport à une Standard, quoi, un truc on va dire plus chaud, mais euh, mais moins net. Moins de précision. Presque une attaque un peu moins franche.	attaque plus franche, net		Les Paul Standard (touche palissandre), chaud	
S5	Là, sur la 3, JE TROUVE que c'est tout de suite plus précis. Alors qu'elle a l'air d'avoir moins de corps que la 4.		moins de corps		le son ?
S5	La 5 est pas loin d'avoir la même résonance que la 4. Avec un côté quand même un peu plus précis.		résonance		le son ? la guitare ?
S5	Mais euh, le fait d'être brillant, c'est que vraiment il y a une surcharge dans l'aigu, alors que la clarté, c'est, il y a un côté netteté dans le son, mais ça va du coup avec la précision POUR MOI la clarté. C'est-à-dire qu'il faut qu'il y ait de l'aigu, mais pas trop.	clarté, netteté, aigu mais pas trop			le son
S5	Et la précision c'est plus dans le mélange des notes où je fais entendre plus ou moins distinctement les notes séparément au lieu de les entendre dans une espèce de halo commun.	mélange des notes, entendre plus ou moins distinctement les notes séparément		entendre les notes dans une espèce de halo commun	le son ?
S5	Mais comme 4 et 5 ont plus de, comme si c'était plus large spectre. Et ça va un peu avec la précision dont je parlais tout à l'heure, quoi.	spectre large			le son ? la guitare ?
S5	Oui, la précision va avec un peu le spectre large **et puis** la restitution est bien nette. J'ALLAIS UTILISER LE TERME de clair, mais comme tout à l'heure JE PARLAIS DE clarté, LES TERMES S'UTILISENT.	spectre large, restitution nette, clair, clarté			le son ?
S5	ouais, c'est un peu comme si, enfin le côté précis de la touche ébène, c'est un peu, JE CARICATURE, mais euh, j'ai eu des contre-exemples...	touche ébène			le son ?
S5	le côté ébène plus précis**, on** va entendre tout distinctement**, il y a** les harmoniques qui sortent**, et** les notes se détachent plus les unes des autres.	touche ébène, on entend tout distinctement, harmoniques qui sortent, les notes se détachent plus les unes des autres			le son ?

Sujet	Enoncé	Synonymes, équivalents	Compatible	Antonymes, opposés	Objet décrit
S5	Alors qu'a priori une touche palissandre, voilà c'est plus chaud parce que justement ça se mélange mieux, donc il y a un côté ça arrondit un peu les angles, mais du coup ça se mélange et il y a moins de précision...			touche palissandre, chaud, les notes se mélangent mieux	le son ? la touche ?
S5	ouais c'est contradictoire AVEC LE FAIT QUE JE DISE qu'il y a plus d'harmoniques, mais c'est plus précis avec une touche ébène.		harmoniques		le son ?
S5	C'est une des plus résonantes, mais elle n'a pas forcément beaucoup d'attaque, en tout cas c'est pas super précis comme attaque.		résonante	beaucoup d'attaque	l'attaque
S5	C'EST-À-DIRE qu'elle répond plus vite, il y a plus de niveau, J'AI L'IMPRESSION. L'ampli sature plus vite. Un peu plus d'aigus aussi. Un peu plus brillante. JE PENSE QU'elle est plus précise, aussi.		aigus, répond vite, brillante, niveau		le son, la guitare
S5	J'aime bien la 5. JE LA TROUVE assez précise en terme d'intonation, **de** distinction des notes.	distinction des notes, intonation			la guitare
S10	Nan, J'TROUVE QU'c'est, boarf, difficile de... ça tord un peu moins, J'TROUVE QUE c'est plus précis.			tordre	le son ?
S10	J'AI L'IMPRESSION QUE ça tord un peu. Ca tord un peu, donc c'est moins euh, moins précis dans l'son, PEUT-ÊTRE un peu plus baveux, un peu plus euh...			tordre	le son ?

Table 3.4: Phrases exprimant un jugement sur une ou plusieurs des guitares du test à l'aide d'un mot de la catégorie sémantique précision. Les croix indiquent si la phrase est affirmative ou négative, si le mot est positif ou négatif, et si l'évaluation est finalement positive ou négative. Les phrases sont classées selon les guitares auxquelles elles se rapportent. Le total des évaluations positives et négatives pour chaque guitare est indiqué.

Enoncé	Phrase affirmative	Phrase négative	Mot « positif »	Mot « négatif »	Evaluation positive	Evaluation négative
Et celle-là je la mets clairement dans cette catégorie des guitares [...] pas hyper-riches dans les harmoniques		x		x	x	
le truc c'est que j'entends pas une grande richesse harmonique		x		x	x	
J'ai l'impression d'entendre un son un petit peu droit	x		x		x	
elle est vraiment intéressante parce qu'elle [n']a pas trop d'harmoniques		x		x	x	
donc on n'a pas beaucoup de bas médiums et de graves, ce qui donne cette définition quand le son est saturé sur les accords.	x		x		x	
Il n'y a pas de boursouflure		x		x	x	
on a un son qui est assez précis.	x		x		x	
ce n'est pas trop baveux quand on sature, du coup.		x		x	x	
un son [...] sans envahissement aucun, ce qui peut être un atout, justement, sur une guitare électrique.		x		x	x	
et elle donne quelque chose de très précis.	x		x		x	
ça va pas baver dans tous les sens.		x		x	x	
Y a pas d'son baveux euh...merdouilli.		x		x	x	
Là, sur la 3, je trouve que c'est tout de suite plus précis.	x		x		x	
Total G3					13	0
dès qu'on joue un peu dans le grave, c'est le bazar.	x			x		x
le son est bien défini dans tout le registre de l'instrument	x		x		x	
un petit peu brouillon parce que évidemment il y a plus d'harmoniques	x			x		x
en tout cas c'est pas super précis comme attaque.		x	x			x
encore une fois dans l'ensemble on a un spectre plus équilibré, plus homogène, enfin plus large	x		x		x	
quand on joue en accords ça devient un petit peu brouillon	x			x		x
elle a moins d'inertie		x	x			x
Les qualités de cette guitare par rapport à celle d'avant [G3] en sont ses principaux défauts sur la distorsion, donc une richesse harmonique beaucoup plus importante au détriment de la définition		x	x			x
pas hyper intéressant en saturé ouais toujours dans l'aigu c'est pareil, on a toujours ce côté un peu baveux	x			x		x
donc c'est moins euh, moins précis dans l'son		x	x			x

Enoncé	Phrase affirmative	Phrase négative	Mot « positif »	Mot « négatif »	Evaluation positive	Evaluation négative
peut-être un peu plus baveux	x			x		x
Quand on joue une note ça va, dès qu'on en joue deux, c'est le bordel	x			x		x
j'ai arrêté parce que ça me paraissait vraiment bordélique	x			x		x
mais là on a un truc vraiment très très gras et on n'entend plus les notes de l'accord	x			x		x
on entend un espèce de brouillon euh	x			x		x
mais là on a un truc vraiment très très gras et on n'entend plus les notes de l'accord	x			x		x
La clarté, hein, elles sont toutes à peu près claires. Le son, il est...clean, ça va. Y a pas d'son baveux euh...merdouilli.		x		x	x	
Total G4					3	14
ce qui est caractéristique, et sur un accord on entend les notes de l'accord, Il y a un son qui n'est pas très gras, encore une fois, très toujours très médium		x		x	x	
là on arrive à jouer par exemple des octaves en son saturé, je pense que sur la guitare précédente [G4] c'était un peu le bazar, et là on a un truc qui tient la route, on arrive à entendre les note		x		x	x	
en accord on a moins de la bouillie sur le médium		x		x		x
Là c'est très précis	x		x		x	
Avec un côté quand même un peu plus précis.	x		x		x	
Je pense qu'elle est plus précise, aussi.	x		x		x	
Je la trouve assez précise en terme d'intonation, de distinction des notes.	x		x		x	
ça commence à tordre, un peu, j'trouve.	x			x		x
J'dirais qu'ça tord encore plus.	x			x		x
un peu plus de définition dans le son	x		x		x	
La clarté, hein, elles sont toutes à peu près claires. Le son, il est...clean, ça va. Y a pas d'son baveux euh...merdouilli.		x		x	x	
Total G5					10	2
On a beaucoup de bazar, c'est pas très agréable à jouer en accords en saturé	x			x		x
Ouaip, une espèce de bourbier.	x			x		x
on a des harmoniques qui ressortent avec la saturation qui sont pas forcément, moi qui me paraissent pas forcément très intéressantes, qui donnent un côté un peu cracra à la distorsion.	x			x		x

Enoncé	Phrase affirmative	Phrase négative	Mot « positif »	Mot « négatif »	Evaluation positive	Evaluation négative
c'est moins précis que sur celle d'avant, là, la 3 [G3].		x	x			x
j'trouve que c'est plus [+] précis, ça tord un peu moins	x		x		x	
La clarté, hein, elles sont toutes à peu près claires. Le son, il est...clean, ça va. Y a pas d'son baveux euh...merdouilli.		x		x	x	
Total G6					2	4

Chapitre 4

Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarist's perception [1]

ABSTRACT

The sound of a solid body electric guitar comes from the loudspeaker transducing into sound the string velocity. Because of mechanical string-structure coupling, the string vibration, and therefore the sound, substantially depends on the lutherie parameters. This study focuses on the comparison between ebony-fingerboard and rosewood-fingerboard guitars: is a change in the fingerboard wood perceived by the guitar players? In order to test the hypothesis that it is actually perceived, a psychological investigation is carried out. Two experimental methods are used: a free sorting task with recorded stimuli from the guitars (listening test) and a free verbalisation task where the guitarists play the guitars. In the listening test, the guitarists perceive differences between guitars, but the resulting clusters do not show an ebony/rosewood dichotomy. A linguistic analysis of the verbalisations exhibits psychological descriptors that are relevant for the discrimination of the wood of the fingerboard: PRECISION (referring to how each note stands out from others), and to a lesser extent ATTACK (referring to the guitar's response to musician's gesture) and BALANCE (referring to the frequency content). This study is part of a broader project aiming at establishing an explicite relation between mechanics, perception, and lutherie. A physical interpretation of the psychologically-relevant descriptors is eventually proposed in order to use them as hypotheses in a further hypothetico-deductive approach starting from physics and using psychophysical methods.

1. Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article nommé « Influence of the electric guitar's fingerboard wood on guitarist's perception », accepté le 9 octobre 2014 pour publication dans le journal *Acta Acustica united with Acustica*.

4.1 Introduction

The sound of a solid body electric guitar comes from the loudspeaker transducing into sound the string velocity signal, possibly modified by some effect processing devices. Besides these electrical considerations, the string vibration remains the driving force of the sound. Because of mechanical string-structure coupling [Fleischer & Zwicker 1998 1999], the string vibration substantially depends on the lutherie parameters. Wood species, neck and body shapes, fret types. . . , alter the string vibration, hence the sound.

Some lutherie parameters that are said (by luthiers, players) to have an influence on the sound of the electric guitar were investigated in previous mechanical studies: the wood of the body [Le Carrou *et al.* 2010], the neck-to-body junction [Paté *et al.* 2012b] or the wood of the fingerboard [Paté *et al.* 2013]. One of the final goals of mechanical studies of musical instruments is to find the physical parameters that are relevant to the musicians. While the resulting mechanical descriptions (admittance measurement and derivatives) are quite accurate and robust, their connection with perceptual descriptors remains a challenging issue [Paté *et al.* 2012b].

The present study is about the wood of the fingerboard. Guitars with ebony or rosewood fingerboard are compared. Informal discussions with electric guitar players and makers suggest that an ebony fingerboard would render "more precise attacks" and would have a spectrum with a little less mids, whereas a rosewood fingerboard would give a "rounder" sound. More information about this informal knowledge can be found in Navarret [2013a]; Fournier [2012]. This knowledge is to be confirmed by this study, because only few guitarists have had the opportunity to play guitars only differing in the fingerboard wood. The leading question of this paper is: is a change of the fingerboard wood of a solid body electric guitar perceived by the guitar player?

One approach consists in testing hypotheses on perception directly derived from concepts of physics. This approach may miss some information for two reasons. First, human perception may be indifferent to some descriptors that are physically relevant. Second, human perception may be sensitive to aspects of sound related to mechanical parameters that mechanical models do not take into account.

This paper aims at providing a new perceptually-relevant basis for the mechanical study of the electric guitar. This work makes use of methods of psychology to identify the relevant parameters from the musician's point of view in an inductive approach: how do the guitar players characterise sounds corresponding to different fingerboard woods? What criteria do they use?

We make the hypothesis that a change in the wood of the fingerboard is perceived by guitarists. Two experimental methods are used in order to access to relevant psychological descriptors (section 4.2). First a listening task in the form of a free sorting task is proposed. The free sorting task derives from theories making use of the concept of natural category to describe the human cognition process, and was elaborated in the field of cognitive psychology along with the theory of natural categorisation [Wittgenstein 2010 (1953); Rosch & Lloyd 1978; Dubois 1991]. It is a common method in psychology, especially in the fields of sensory analysis [Dubois 2009b], and of sound perception [Guyot *et al.* 1997; Gaillard 2000; Parizet & Koehl 2011; Guastavino 2007]. The second task consists in collecting the free verbalisations of musicians while freely playing the guitars. We insist on the "free" aspect of the tasks: it lets the musician choose his own criteria, expressed with his own words (vocabulary), in absence of a priori already known criteria from the experimenters. Moreover, in a playing task, the players can make use of their other senses, e.g. their sense of touch: two different fingerboard woods may differ in their surface state or in their reaction to humidity, and this may be digitally perceived by the players.

A classic method is used for the cluster analysis of the categorisation data and a linguistic method for a semantic analysis of the verbal data (section 4.3). The semantic analysis results in the identification of perceptually relevant descriptors for the evaluation of the guitars. Some descriptors are used by the guitarists to discriminate between the two fingerboard woods (section 4.4).

How can we translate the psychological descriptors — necessarily relevant to the musicians — into hypotheses for mechanical studies? A physical interpretation of these relevant descriptors is eventually proposed in order to use them as hypotheses in a further hypothetico-deductive approach starting from physics and using psychophysical methods (section 4.6).

4.2 Experimental methods

This section presents the guitars (also "objects") and the guitarists (also "subjects" or "musicians") of the study. Then it describes the two experimental methods used in order to get to the guitarists' judgements on the guitars.

4.2.1 The guitars, hardware and guitarists

The present study focuses on the fingerboard material only. Since the electric guitar market hardly provides two identical guitars with a different fingerboard wood, a collaboration with luthiers has been established. Students at Itemm [2] crafted six guitars for the study, following the specifications of the reference model [Paté *et al.* 2012a] *Les Paul Junior* by manufacturer *Gibson*: original shape, mahogany body and neck. The guitars are equipped with *GHS Boomer .10-.46* strings and *Kent Armstrong P-90 Dog-Ear BK* bridge pickup. The only electronic setting available on the guitars is the "volume" knob controlling the output level of the pickup. The traditional "tone" knob (controlling the cutoff frequency of a low-pass filter on the output signal of the pickup) is disconnected from the electronic circuit.

The same machines and patterns for the automated parts of the instrument-making process, the same technical drawings with geometrical instructions, and wood from the same tree were used for the six guitars, in order to reduce the variability. Three guitars have an ebony fingerboard (guitars numbered G1, G3 and G5), and three have a rosewood fingerboard (guitars numbered G2, G4 and G6). Four of these guitars can be seen in figure 4.5. Albeit the only intentional lutherie difference is the wood of the fingerboard, the guitars are expected to exhibit some variations. First they are made of wood, a material known for its high variability in terms of physical parameters. Second, the machines used during the process have a certain geometrical tolerance, and most of the guitar making here is done by hand, causing further variations.

The widespread *Fender Blues Junior III* tube-amplifier is used. It allows control on the gain (output of the pre-amplifier) via the "volume" knob, the overall volume via the "master" knob, the equalisation via the "bass", "middle" and "treble" knobs, and on a spring reverberation via the "reverb" knob. All knob settings range from 1 (minimal value) to 12 (maximal value).

In order to switch from "clean" to "distorted" sound, the *Fulltone OCD v.3* overdrive pedal is used. Its settings are: a "volume" knob controlling the output volume, a "drive" knob for the amount of distortion, and a "tone" knob, whose behaviour is basically identical to the "tone" knob of the guitar. In the following, the setting of each knob is expressed as a fraction of its full-scale value.

Ten professional guitarists participated in the study: their livelihood and main activity involve many hours a day of guitar playing. Among their activities were concert and studio playing, composing, teaching and guitar testing for magazines. Each guitarist received € 25 for participating in the study.

2. Institut technologique européen des métiers de la musique – European technological institute for musical professions, Le Mans, France, `http://www.itemm.fr`

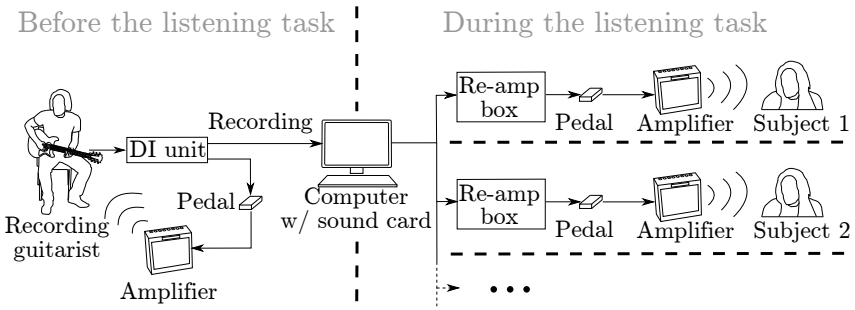


Figure 4.1: Listening test: sketch of the recording and listening phases. An output of the DI unit is used for the recording of the output of the pickup, the other is connected to the pedal and amplifier for audio feedback. During the listening phase, the recorded signals are sent to the pedal and amplifier.

4.2.2 Listening task

The first part of the study is a listening task of pre-recorded signals. A free sorting task method is used in preference to traditional psychophysical methods inasmuch the relevant parameters of the sound are unknown for the complex acoustic stimulations of electric guitars. Free sorting task is a classic method [Guyot *et al.* 1997; Gaillard 2000; Parizet & Koehl 2011; Guastavino 2007; Ballester *et al.* 2009; Morel *et al.* 2012] based on the theory of categorisation [Rosch & Lloyd 1978; Dubois 1991]. The free sorting task seems here attractive since the hypothesis describes two guitar types: with ebony or rosewood fingerboard.

4.2.2.1 Musical excerpts

The electric guitarist is accustomed to listening to a guitar sound through a guitar amplifier. Therefore an amplifier-listening test was chosen instead of e.g. a headphone-listening test. The so-called "re-amping" technique was chosen. Prior to the perceptual test, the output of the guitar pickup is recorded through a DI unit. During the perceptual test, the amplifier and distortion pedal are fed with the recordings through a re-amp box, providing ecologically valid [Gibson 1986; Guastavino *et al.* 2005] as well as repeatable listening conditions. A sketch of the recording and listening phases is given in figure 4.1.

The musical styles of the excerpts had to fit the styles that are usually played on that type of guitar, so three typical rock 'n' roll-like licks have been chosen as excerpts. They were composed and played as identically as possible on each of the six guitars by one of the authors, an experienced electric guitar player. The author knew which guitar (with which fingerboard) he was playing, and did his best to produce an identical performance on each of the guitars. The recordings are sampled at a 44.1 kHz rate and a 16-bit resolution. The output DI unit is sent to the computer for the recording, and to the amplifier via the pedal in order the recording guitarist to get an audio feedback. G3 (ebony) and G6 (rosewood) were chosen to be replicated. The replicas are used to test the sensibility and robustness of the perceptual test. For each of the three excerpts, 8 stimuli are therefore presented to each musician.

The three excerpts are transcribed in figures 4.2 to 4.4. They are not claimed to encompass all the variety of musical styles that are traditionally played on that type of guitar, but they give a good overview of it.

The first excerpt (figure 4.2) is a "shuffle"-like (somewhere between duple and triple metre) lick combining the legato technique [Paté *et al.* 2012a] with double-stops for the solo part, and arpeggios with open strings for the rhythmic part. Amplifier and pedal settings produce a "clean" sound.

The second excerpt (figure 4.3) is a typical blues-rock solo phrase including typical blues rock electric

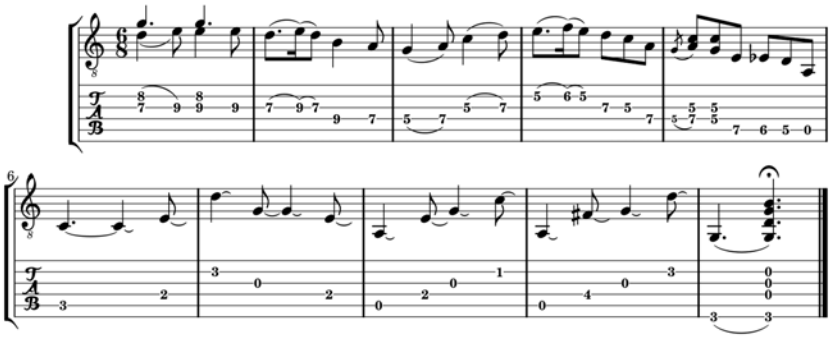


Figure 4.2: Musical and tablature notation of the 1st excerpt. Tempo is 108 BPM. Amplifier settings – volume 7, treble 7, bass 7, middle 7, master 5, reverb 2. The overdrive pedal is switched off. This corresponds to a “clean” sound.

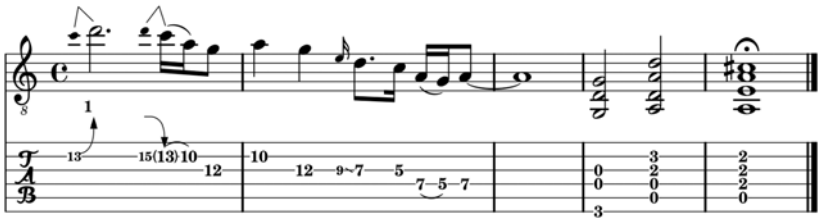


Figure 4.3: Musical and tablature notation of the 2nd excerpt. Tempo is 120 BPM. Amplifier settings – volume 7, treble 6, bass 8, middle 6, master 2, reverb 2. Overdrive pedal settings – volume 3/4, drive 1/2, tone 1/2. This corresponds to a “distorted” sound.

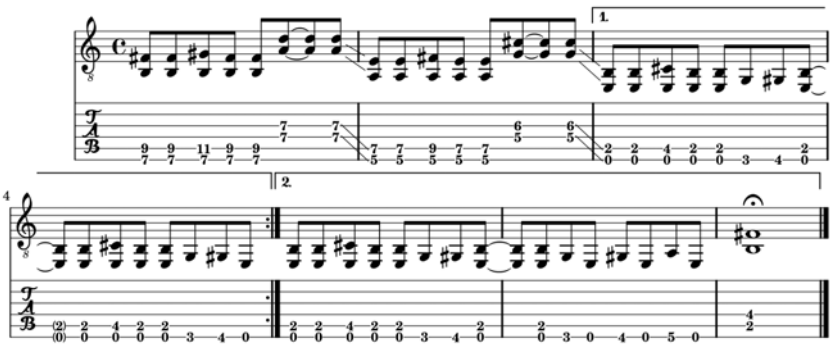


Figure 4.4: Musical and tablature notation of the 3rd excerpt. Tempo is 164 BPM. Amplifier setting – volume 7, treble 7, bass 7, middle 7, master 2, reverb 2. Overdrive pedal settings – volume 3/4, drive 1/4, tone 1/2. This corresponds to a “crunch” sound.

guitar vocabulary such as the use of the pentatonic scale, "powerchords" (chord only consisting in the root and the 5th) and playing techniques like bends [Paté *et al.* 2012a], slides, hammer-ons and pull-offs. Amplifier and pedal settings produce a "distorted" sound.

The third excerpt (figure 4.4) is a common rock 'n' roll rhythmic "riff" based on variations on power-chords. It includes slide technique and syncopated rhythm. Amplifier and pedal settings correspond to a "crunch" sound (somewhere inbetween the clean and distorted sounds) but the omnipresence of chords within the excerpt makes it sound quite more indistinct and fuzzier than the previous excerpt.

4.2.2.2 The musician's task

The listening test takes place in a quiet room (see figure 4.5) with no particular acoustic treatment. The guitarist sits at a workstation running the program *TCL-LabX* [Gaillard 2009; Gaillard & Poitevineau 2014] that leads him through the listening task. The sound comes from the loudspeaker of the amplifier, whose position is freely chosen by the musician. For ease-of-listening reasons, amplifier's "master" and "reverb" settings can be modified by the musician, but the other amplifier and overdrive pedal settings are not allowed to be changed. For each of the 3 excerpts, the guitarist is asked to perform the tasks described below.

First the subject is asked the following question (in French): *Please sort these eight stimuli. Could you please group the similar ones, and put into different groups those which seem different to you? You are free to create as many groups as you want.*

Each stimulus is represented by an icon on the screen of a computer. The subject is free to move each of the eight icons wherever he wants within the space of the window. The stimuli can be played back and listened to *ad libitum* by clicking on the icons. No information about the stimuli is given, not even that the stimuli come from different guitars. The stimuli numbering does not correspond to guitar numbering and changes between the excerpts but not between the subjects.

When the subject has placed all the icons, he is asked to write a short comment about each category he produced. The procedure is repeated for the other excerpts. The overall duration of the listening test was approximately one hour.

4.2.2.3 Output of the task

The sorting of stimuli into clusters by subjects produces an extensional description of the guitars within categories along their similarities and differences. The categories are then verbally depicted to give access to an intensional description in terms of perceptual and semantic properties, to be later matched to physical descriptors are listed. The ouput data of the listening task consists in clusters of stimuli and verbal comments upon these categories. The analysis is described in sections 4.3.1 and 4.3.2.

4.2.3 Free playing task

The next task adds to the audition other sensory modalities that the guitarist actually uses in his expertise of guitar. It is another way of getting ordinary judgements, which are both holistic and poly-sensorial, in order to induce hypotheses for the physical analysis within the acoustic domain.

4.2.3.1 The musician's task

After the listening task, the guitarist is asked to freely play the guitars: he can play each guitar as long as he wants and switch guitars whenever and as often as he wishes. The playing phase takes place in a room with reduced light, in order to visually hide the differences (colour) between the fingerboards.

Figure 4.5: A guitarist sitting in playing condition during the playing phase of the test. Note that light has been turned on for photograph quality purpose.

Indeed none of the guitarists saw the difference between the fingerboards. Use, settings and position of amplifier and overdrive pedal are let totally free. During the playing, the guitarist is asked to express his sensory experience about the guitars. Figure 4.5 shows a guitarist in playing condition. Note that light has been turned on for photograph quality purpose.

Only four guitars, two of each type, are to be played, in order to reduce the duration of the test and the fatigue of the musicians. G1 and G2 were discarded by the experimenters because they were found to have too different geometrical features, altering the ergonomics. In particular, neck profiles of G1 and G2 were too different. This parameter, of great importance to the guitar player, is finished by hand, hence it is very difficult to maintain a constant neck profile among a guitar production involving several luthiers. During the playing test, only a few remarks have been done about potential differences in neck profile between the other four guitars. This ergonomics criterion has been selected in order to let the guitarist focus on other aspects of the sensory experience.

4.2.3.2 Output of the task

Each of the one to two-hour long interviews was recorded and transcribed. The whole verbal data is the “corpus” which linguistic analysis is described in section 4.3.2.

Table 4.1: Stress S and rate of well designed quadruples R_q for the three tree representations.

	Excerpt 1	Excerpt 2	Excerpt 3
S	0.1103	0.0967	0.1026
R_q	0.8857	0.9429	0.9357

4.3 Data processing

4.3.1 Data from the free sorting task

For each of the 3 musical excerpts of the categorisation task, the 10 musicians sorted 8 stimuli into a certain number of categories.

In the absence of hypothesis about the dimensional nature of the attributes that define the categories, a distance analysis was preferred to a dimensional analysis such as e.g. multi-dimensional scaling. Each sorting led to a co-occurrence matrix, whose values are 1 at the intersection between row i and column j if stimuli i and j are in the same categories, and 0 if not.

For each excerpt, the total co-occurrence matrix $\mathbf{M}$ is the sum of the $N = 10$ individual co-occurrence matrices. A total distance matrix can be computed as $\mathbf{D} = 1 - \mathbf{M}/N$ [Morel *et al.* 2012].

A tree additive distance (that is, a distance measure satisfying the additive inequality [Sattath & Tversky 1977]) can be fitted to this distance in order to represent the stimuli on an additive tree. The method is now well and comprehensively described in many references [Poitevineau 2009; Tversky 327–352; Barthélémy & Guénoche 1991; Barthélémy & Luong 57–80]. The additive tree representation is computed with the software *AddTree* [Gaillard & Poitevineau 2014]. All terminal nodes (or "leaves") of an additive tree represent a stimuli. The leaves are connected together via paths following several edges of various lengths. The total length of a path between two leaves is proportional to the dissimilarity, or distance between the two corresponding stimuli. No information is given by the euclidian distance (direct path not along edges) between two leaves.

The additive trees representing the consensual categories corresponding to excerpts 1 to 3 of the listening test are shown in figures 4.6 to 4.8. Guitar recordings and their replicas are naturally denoted with the same label.

Some criteria for the evaluation of the quality of the tree representation of the data are given in [Poitevineau 2009; Guénoche & Garreta 2000]. They are shown in table 4.1. The stress S is a function of the root mean square of the difference between the data distance and the additive tree distance. This difference has low values if the additive tree distance fits the data distance. Table 4.1 shows that S values are close to 0 for the three excerpts. The rate of well designed quadruples R_q is the rate of 4-object sets whose distance relationships have an additive tree topology: the more the data distance is close to a tree distance, the closest R_q is to 1. This is what happens for R_q for the three excerpts. One can therefore have confidence in the trees of figures 4.6 to 4.8.

4.3.2 Verbal data

4.3.2.1 General considerations

The corpus analysis accounts for results from previous research. Dubois [Dubois 2000] showed that, unlike what happens with visual objects and colours, there is only a few simple forms in the lexical resources of French language to describe sounds.

Second, the same lexical unit can be used either as a "word" or as a "term" [Dubois & Giboreau

2006; Giboreau *et al.* 2007]. In the former case, the same "signifier" is used for different "signifieds" [de Saussure 1955], and electric guitarists make different use of the lexical resources of the language, depending on their own history and musical practice [Giboreau *et al.* 2007]. In the latter case, there is a consensus among the electric guitarists' community about the use of a particular lexical unit for a particular sensory experience: the same "signifier" is used for the same "signified".

In both cases, the meaning of the word as constructed in discourse may differ from its common sense use, in particular from the experimenter's use. The corpus analysis should therefore make no a priori assumption about the word meaning that will be inferred from the word use within the individual verbal productions.

A method, inspired by previous work [Morel *et al.* 2012; Dubois 2000; Cheminée 2009], is proposed in this paragraph for the production of semantic relationships between the words, such as synonymy, antonymy, etc. The words used by the players are given in their mother-tongue, that is French. English translations follow the French words in this section, and next sections uses only English words, for communication purpose. English words are only given as a guide, and do not necessarily strictly correspond to what the players meant. Translations of whole sentence may sound a bit strange to English speakers, but a word-to-word and naive (minimising the experimenter's interpretation) translation has been preferred to a more literary translation that necessarily brings some interpretation. When the French (resp. English) words are quotation of the musicians' verbalisations, they are given in quotes (resp. in italic letters).

4.3.2.2 Analysis method

The method is applied to the transcribed data of the playing task, and not to the comments of the listening task, because the latter consist rather in isolated words than in sentences. In a first phase, we extract the parts of the discourse describing the guitar and/or the sound:

1. in the corpus, we automatically identify and select the occurrences of the same sequence of letters, with and without flexion marks such as singular plural or gender (e.g. search for "son" a French word for "sound"),
2. we discard homographs not relevant within this context (e.g. the French word "son" for "sound" can also be the possessive adjective "his/her"),
3. for each of the words, we pick the textual context in which it occurs and keep track of who is speaking, in what playing condition and of course about which guitar.

Within these parts of discourse, the meaning of each word can be evaluated:

- from the syntactic context of each word, produced by one or a set of guitarists (identification of individual or group specificity, of terminological use of the same significant, of the differential use of words according to the situation),
- through contrast or equivalence (differential meaning) identified from the use of words in context,
- through linguistic marks such as reformulations, appositions, oppositions or indications from the speaker himself about how he uses the word,
- from adverbs allowing to identify the structure in the judgement: comparative in a monadic description of each guitar, or more generic in free sorting task referring to the commonalities between properties.

4.3.2.3 Examples

An illustration of the method is given with three examples directly extracted from the corpus. Subject 1 said: *A much brighter sound. Brighter, more higher harmonics* ("Un son beaucoup plus brillant. Plus

brillant, plus d'harmoniques aiguës"). Here the words *bright* and *high harmonics* are inferred to be related one to another.

Another example of use of both appositions and oppositions and of the reference to a context is a sentence by subject 9: *So this* [the sound] *is less bright... this* [the guitar] *is the dullest [...] hence the middle frequencies stand out a bit more... hence it* [the guitar] *has less twang with distorted sounds ...* ("Alors ça c'est moins brillant... c'est la plus mat [...] du coup il y a un médium qui ressort un peu plus... du coup elle a moins de claquant en saturé..."). It is induced that the words *bright* and *twang* are close one from another and are opposed to the words *dull* and *middle frequencies*... at least in the context of a *distorted sound*.

The last example, by subject 2, is about the relation between a "round sound" and the low-frequencies content. *Roundness* and *body* are semantically very close one to another and opposed to *twangy* and *tight*: *for me the roundness is a bit related with the equalisation [...] when I say roundness I'd put it rather in the lower range, you know, of a spectrum, if one talks about bass, middle, treble, and at the same time the body of the sound [...] what seems to me twangy and tight a bit unpleasant, this is what has a lack of roundness for me, and what has roundness, it would be precisely something that is... that has more body, and therefore less tight* ("pour moi la rondeur c'est lié un peu à l'équalisation [...] quand j'dis rondeur j'situerais ça plutôt vers le bas, tu vois, d'un spectre, si on prend grave, médium, aigu, et en même temps le corps du son [...] c'qui m'semble nasillard et tendu un peu désagréable, c'est c'qui manque de rondeur pour moi, et c'qui a de la rondeur, ce serait plus justement quelque chose qui est... qui a plus de corps, et donc moins tendu").

4.3.2.4 Output of the analysis

Semantic proximities were established from the linguistic analysis of the whole corpus, following the method that has just been exemplified. Tables 4.2 (English translations) and 4.3 (original French) summarise the resulting semantic proximities and corresponding word categories. The meta-criterion for each category of words is written in capital letters, in order to distinguish this name (chosen by the experimenters among the words of the category) as a label from other words used by the musicians (and not chosen by the experimenters). Interpreting the meta-criteria with the knowledge from the semantic analysis produces psychological "descriptors" associated with the words used. They are a first step in the translation of the semantics of natural languages into physical hypotheses.

A category can group together words that have opposite meanings. In this case "positive" words (in normal font) are defined as the words having a meaning close to the meaning of the label, and "negative" words (in bold font) are antonyms of the label. Words "positive" and "negative" are in no case judgements: they are strictly derived from semantics.

PRECISION sums up natural language words into a descriptor depicting the way different notes (of a chord, for example) are perceived as distinct or as a blend. ATTACK brings together words refering to the way the guitar responds to the gesture of the guitarist's right hand. Words refering to the proportions of low, middle and high frequencies are labelled BALANCE. BRIGHTNESS (resp. MIDDLE, BASS) refers to the physical attributes indicating a predominance of treble (resp. middle, bass) in the sound. SUSTAIN deals with the resonance of the sound. Words expressing the inconvenience induced by the sound to the player fall into the meta-criterion AGGRESSIVENESS.

We can also observe here a regular property of "natural" semantics: the identified semantic categories sometimes overlap (on the contrary to physical concepts). The words under the label BRIGHTNESS are actually very often antonyms of the words under the label BASS. Words of BRIGHTNESS such as *piercing, to scream* bear witness of a negative sensation and are therefore close to some words of AGGRESSIVENESS.

One word can appear in two meta-criteria, as *attack*. The word *attack* can refer either to the sound

Table 4.2: English translation. Identified semantic proximities and corresponding labels/meta-criteria (capital letters). Within a category, positive words (normal font) are opposed to negative words (bold font). For each category, the depicted object is given.

Label of the category (meta-criterion)	Words of the category	Object
PRECISION	*precision, precise, distinction, definition, clear, clarity, broad spectrum, inertia, straight, distinct* ≠ ***invasion, rich, muddy, to dribble, dribbling, mess, dirty, mire, uncontrollable, shitty, to distort, blurred***	sound
ATTACK	*attack, to attack, dynamic, response, respond, expressivity, impact, lively* ≠ ***soft, flabby***	guitar & player
BALANCE	*balance, well-balanced, homogeneous* ≠ ***unbalanced***	sound
BRIGHTNESS	*bright, brightness, treble, biting, to bite, dry, dryness, tight, sour, nervous, striking, incisive, rich, twangy, piercing, to scream, tinsel, attack, clear, clarity, sparkle, metallic, level, inaudible* ≠ ***remove some brightness, lighter treble***	sound
MIDDLE	*middle, present* ≠ ***duck, thin***	sound
	high-middle, wild ≠ ***hollow***	
	low-middle, thick ≠ ***twangy, nose***	
BASS	*bass, bass, low, round, thick, loud, warm, body, full, dark, dull, soft, muffled, velvet, to appear* ≠ ***the low-frequencies sink***	sound
SUSTAIN	*sustain, resonance, to live, long, long, to last, duration* ≠ ***short***	sound
AGRESSIVENESS	*agressive, cold* ≠ ***mellow, charm, charming***	sound

or to the guitar and the player. In the first case, a sound with *attack* is a sound with a lot of energy in the high frequencies. The word *attack* sometimes (and very often for the verb *to attack*) refers to the behavioural interaction between the guitarist and the instrument. This is why tables 4.2 and 4.3 also mention the object that is described by the words.

4.4 Results

4.4.1 Results from the listening task

4.4.1.1 Reading the tree representation

The tree representations of the similarity measures from the clusterings of each excerpt are shown in figures 4.6 to 4.8. They prove the robustness of the method: two physically exactly identical stimuli are actually judged as quite close one to another [3]. Nevertheless the trees do not split the stimuli into the two expected (opposed by a single attribute related to the wood of the fingerboard) clear groups: there is not one group for ebony fingerboard and one for rosewood fingerboard. Inter-subject differences in the categories are found. It is still noticed that individual categories group together the physically identical stimuli (replicas) and show categories close to the categories of the consensual trees of figures 4.6 to 4.8. For giving a synthetic overview of the listening task, only the consensual tree representations are shown and discussed.

4.4.1.2 Verbal

The clusters give here an extensional description of the guitars. The analysis of the associated comments gives an intensional description.

Items are not described as having proper attributes, but as sharing attributes with the other items

3. However they are not perceived as exactly similar. An explanation for this could be the order in which the musician listened to the stimuli: physically identical stimuli might be judged as different.

Table 4.3: French words. Identified semantic proximities and corresponding labels/meta-criteria (capital letters). Within a category, positive words (normal font) are opposed to negative words (bold font). For each category, the depicted object is given.

Label of the category (meta-criterion)	Words of the category	Object
PRECISION	précision, précis, distinction, définition, clair, clarté, large spectre, inertie, droit, net ≠ **envahissement, riche, baveux, baver, bazar, bordel, crade, bourbier, ingérable, merdouilli, tordre, brouillé**	sound
ATTAQUE	attaque, attaquer, dynamique, réponse, répondre, expressivité, impact, vivant ≠ **doux, mou**	guitar & player
EQUILIBRE	équilibre, équilibré, homogène ≠ **déséquilibré**	sound
BRILLANCE	brillant, brillance, aigu, mordant, mordre, sec, sécheresse, tendu, aigre, nerveuse, "percussif", incisif, riche, claquant, criard, crier, clinquant, attaque, clair, clarté, scintillement, métallique, niveau, inaudible ≠ **enlever de la brillance, aigus plus légers**	sound
MEDIUM	médium, présent ≠ **canard, fin**	sound
	haut-médium, méchant ≠ **creux, creusé**	
	bas-médium, épais ≠ **nasal, nez**	
BAS	bas, basse, grave, rond, ample, puissant, chaud, corps, plein, sombre, mat, doux, sourd, velours, apparaître ≠ **s'affaisser dans les graves**	sound
SUSTAIN	sustain, résonance, vivre, long, longtemps, durer, durée ≠ **court**	sound
AGRESSIVITE	agressif, froid ≠ **moelleux, charme, charmant**	sound

within the same category. Isolated guitars are then not taken into account.

The analysis of the comments should reflect the consensual categories shown on the trees (ellipsoids in the figures 4.6 to 4.8). In order to access the intensional description of the categories, it is necessary to go back to the comments on the actual categories. These categories are made by the subjects, and may differ from the consensual categories. Only the actual categories judged as close enough to the consensual categories were considered. For a consensual category containing 2 (resp. 3, 4) stimuli, only the subjects' categories that included at least 2 (resp. 2, 3) stimuli of the tree categories were considered.

Within the comments associated with the considered actual categories, all words are picked up. They are grouped together according to the semantic categories identified in section 4.3. The few words used during the categorisation task were also used during the playing task, so their meaning could be inferred, being assumed that their semantic did not change between the two tasks. Figures 4.6 to 4.8 show, for excerpts 1 to 3, selected words representing each relevant semantic category (if used) characterising the proper attributes of each category and the attributes shared by several categories. Arrows connect the attributes to the corresponding categories.

Stimuli have been categorised by the guitarists during the listening test, according to similarity and dissimilarity judgements. Associated comments gave an intensive description of the categories. However, both extensional and intensional descriptions did not reveal a clear distinction between the two fingerboard woods:

- there is not one category for ebony and one for rosewood,
- accross excerpts, the comments show no regularity in the attributes of the same guitar: for example G3 is found to have *more treble* for excerpt 1 (figure 4.6) and *less treble* for excerpt 2 (figure 4.7), and G1 is alternatively evaluated as *aggressive* for excerpt 2 (figure 4.7) and *less aggressive* for excerpt 3 (figure 4.8)

These remarks suggest that

- the groupings depend not only on the guitars, but also on the recording player's interpretation of the chosen musical excerpts,
- each guitar may have its own attributes, not necessarily only related to the fingerboard wood.

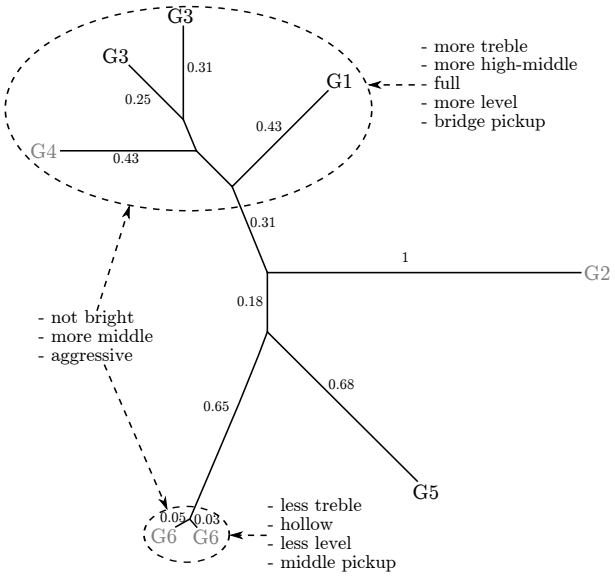


Figure 4.6: Additive tree representation for the stimuli of excerpt 1. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch.

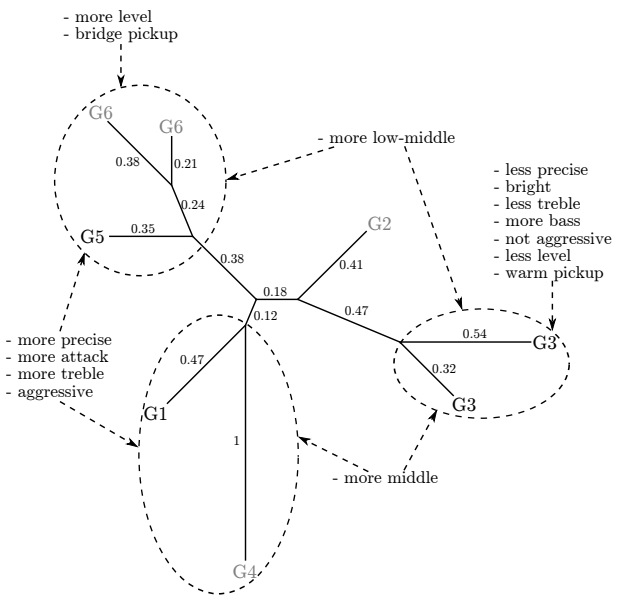


Figure 4.7: Additive tree representation for the stimuli of excerpt 2. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch.

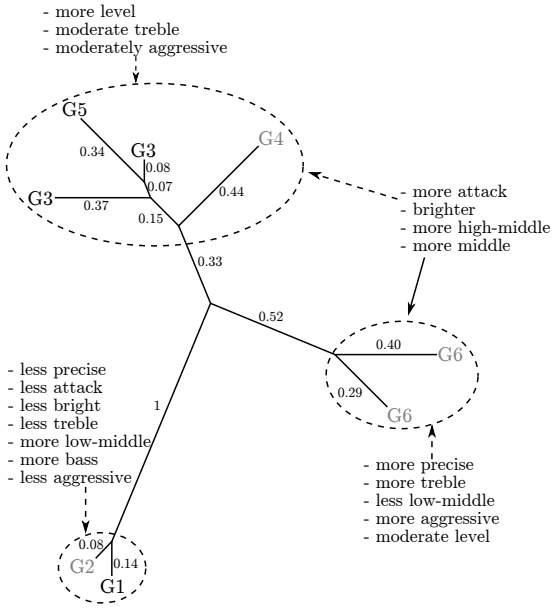


Figure 4.8: Additive tree representation for the stimuli of excerpt 3. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch.

The next task addresses these remarks. The verbalisation task should allow more individual characterisation of each guitar. The free playing situation does not impose any musical excerpt or any other's interpretation. Moreover, giving back to the musician his interaction with the instrument, the playing task adds other sensory modalities and may give access to other evaluations. The listening task with pre-recorded stimuli, each of those being performed in a very similar way, without knowing what was changing between each stimulus (this could have been the guitar, the pickup settings, some digital filtering, etc.), was apprehended as a quite "unnatural" task by the players. The playing task is expected to place the guitar players in a more usual situation.

4.4.2 Results from the verbalisations

Within the corpus of the playing task, affirmative and negative sentences are distinguished. Affirmative sentences do not contain any negation mark and can include one of the following adverbs: *too much, so much, the most, a lot (more), very, immediately, bloody (more), super, really more, even more, best, better, more, well, good, not bad, a (little) bit more, a little, still, a tiny bit, enough* ("trop", "tellement", "le plus", "beaucoup (plus)", "très", "tout de suite", "vachement (plus)", "super", "vraiment plus", "encore plus", "meilleur", "mieux", "plus", "bien", "bon", "pas mal", "un (petit) peu plus", "un peu", "toujours", "un poil", "assez").

Negative sentences contain a negation mark (e.g. *not*, "pas") or a mark of any kind of lack of property (e.g. *less*, "moins"), and can include one the following adverbs: *a (little) bit less, less, lack, not enough, not much, not enormously, not too much, not super, not astounding, not very much, the less, not, very little* ("un (petit) peu moins", "moins", "manque", "pas assez", "pas très", "pas énormément", "pas trop", "pas super", "pas formidable", "pas beaucoup", "absence", "beaucoup moins", "le moins", "pas", "très peu").

For each semantic category of tables 4.2 and 4.3, the number of positive and negative evaluation of the category is counted. A ”positive evaluation“ is defined as a use of a positive word in an affirmative sentence, or a use of a negative word in a negative sentence. A ”negative evaluation“ is a use of a negative word in an affirmative sentence, or a use of a positive word in a negative sentence.

Table 4.4 shows the total number of positive and negative evaluations for each guitar of the playing test (G3, G4, G5 and G6).

The evaluations of BASS, BRIGHTNESS, SUSTAIN, (LOW-,HIGH-) MIDDLE, AGGRESSIVENESS in table 4.4 exhibit individual behaviour of each guitar. The own characteristics of each guitar taken separately can be identified easily and accurately with the discourse analysis, and not — by definition — with the categorisation task/analysis. For example, it clearly appears that G5 and G4 have the best sustain (more than 80% of positive evaluations about the meta-criterion SUSTAIN), or that G4, G5 and G6 have a lot of brightness and high-frequency content (more than 80% of positive evaluations about the category BRIGHTNESS) according to the guitar players. These five categories of criteria are nevertheless not relevant for discriminating ebony- and rosewood-fingerboard guitars: they may exhibit guitar groupings that do not fit the fingerboard wood criterion (e.g. G5 and G6 have more than 70% of negative evaluations about the criterion BASS and could be told apart from the group including G3 and G4, which have more than 50% of positive evaluations for the same criterion).

Two meta-criteria seem to be more relevant to distinguish the two types of guitar. The evaluation of the BALANCE indicates clearly that the two ebony-fingerboard guitars are judged as having a better balance (both guitar have more than 75% of positive evaluations). For the rosewood-fingerboard guitars, the consensus appears to be weaker: the negative judgements about the balance of G4 and G6 are of the same order as positive judgements. The evaluation of the ATTACK (words describing the response of the instrument to the gesture of the player's right hand; a good guitar in terms of attack is typically described as (subject 7) *if I give it a strong attack it plays strong, if I give a soft attack it plays softly*, “si je l'attaque fort elle joue fort, si j'attaque doucement elle joue doucement”) shows the same tendency, but somewhat clearer. Ebony-fingerboard G3 and G5 undoubtedly have more positive evaluations of ATTACK (more than 75%), whereas rosewood-fingerboard G4 and G6 spark off roughly as many positive as negative evaluations.

PRECISION is the meta-criterion allowing to make the clearest distinction between ebony and rosewood. It clearly appears that ebony-fingerboard guitars concentrate the positive judgements about PRECISION (more than 80% of positive evaluations), and that negative judgements are rather the prerogative of the rosewood-fingerboard guitars (more than 70% of negative evaluations). Ebony-fingerboard guitars' precision is evaluated as being better: (subject 5) *more precise, one will hear all* [the notes] *distincly, the harmonics are highlighted, and the notes stand out one from another* (“plus précis, on va entendre tout distinctement, il y a les harmoniques qui sortent, et les notes se détachent plus les unes des autres”). The precision of ebony fingerboard enhances the definition of notes playes simultaneously: (subject 5) *it is immediately a bit more precise when one plays richer chords* (“c'est tout de suite un peu plus précis quand on fait des accords plus riches”). Ebony fingerboard may also change the distorted sounds: (subject 1) *if one plays a saturated guitar, it* [the sound] *won't dribble wild* (“si on met une guitare saturée, ça va pas baver dans tous les sens”).

But the “negative” judgements should not be considered as stating that rosewood fingerboard guitars are worse than ebony fingerboard. Rosewood-fingerboard guitars just exhibit another aspect of the attribute PRECISION: (subject 5) *it is warmer because it* [the notes, the sound] *just blends better, therefore there is an aspect it smoothes the rough edges, but as a result it blends and there is less precision* (“c'est plus chaud parce que justement ça se mélange mieux, donc il y a un côté ça arrondit un peu les angles, mais du coup ça se mélange et il y a moins de précision”). Precisely because of its “lack” of precision, a rosewood-fingerboard may add some warmth (hence, after tables 4.2 and 4.3, body and roundness) in

Table 4.4: For each semantic category and each guitar, absolute number of positive and negative evaluations (percentages indicate the same quantities relatively to the total amount of evaluation of each guitar). Black corresponds to ebony-fingerboard guitars (G3 and G5) and gray corresponds to rosewood-fingerboard guitars (G4 and G6).

	Ebony		Rosewood	
PRECISION	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	13 (100%)	10 (83%)	3 (18%)	2 (29%)
negative evaluation	0 (0%)	2 (17%)	14 (82%)	5 (71%)
ATTACK	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	15 (75%)	12 (92%)	6 (40%)	7 (54%)
negative evaluation	5 (25%)	1 (8%)	9 (60%)	6 (46%)
BALANCE	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	10 (91%)	10 (77%)	10 (63%)	5 (56%)
negative evaluation	1 (9%)	3 (23%)	6 (37%)	4 (44%)
BRIGHTNESS	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	30 (55%)	47 (82%)	45 (80%)	51 (86%)
negative evaluation	25 (45%)	10 (18%)	11 (20%)	8 (14%)
MIDDLE	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	10 (91%)	10 (100%)	5 (100%)	1 (100%)
negative evaluation	1 (9%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)
LOW-MIDDLE	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	1 (100%)	9 (90%)	5 (83%)	0 (0%)
negative evaluation	0 (0%)	1 (10%)	1 (17%)	3 (100%)
HIGH-MIDDLE	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	1 (50%)	10 (77%)	1 (9%)	0 (0%)
negative evaluation	1 (50%)	3 (23%)	10 (91%)	0 (0%)
BASS	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	27 (69%)	9 (30%)	17 (57%)	5 (20%)
negative evaluation	12 (31%)	21 (70%)	13 (43%)	20 (80%)
SUSTAIN	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	12 (67%)	22 (88%)	24 (96%)	7 (50%)
negative evaluation	6 (33%)	3 (12%)	1 (4%)	7 (50%)
AGGRESSIVENESS	G3	G5	G4	G6
positive evaluation	1 (12%)	7 (88%)	10 (91%)	7 (88%)
negative evaluation	7 (88%)	1 (12%)	1 (9%)	1 (12%)

the sound while the notes merge together in a more complex combination, producing a sound result that might fit some artistic wills.

Note that during the playing task only, subject 5 has been able to assert that two guitars have a rosewood fingerboard and the two others an ebony one. This happened at the middle of the playing task, and the assertion was justified by considerations about the PRECISION. Subjects 1, 2, 3, 5, 7, 9 and 10 found some commonalities along some meta-criteria between the two ebony-fingerboard and between the two rosewood-fingerboard guitars. The other guitarists contributed anyway in a valuable way to the overall evaluation of the guitars according to the meta-criteria.

4.5 Discussion

As the linguistic analysis showed, the judgements on guitars refer either to the sound or to the interaction between the guitar and the player. This section discusses these differences between the objects of the judgements and finds that they are related to the experimental methods.

4.5.1 The sound

The categories from the listening task group together stimuli according to judged similarity in the sound [4]. However, the tree categories (and the individual categories) did not show clusterings corresponding to the fingerboard woods: guitarists focused on sound attributes that might not be appropriate to tell ebony from rosewood.

Among the categories of attributes dealing with the sound as found in section 4.4.2, only those labelled PRECISION and BALANCE are relevant for the characterisation of the fingerboard wood. But their evaluation may depend on the own way of playing of the guitarist who recorded the stimuli of the listening task: his attack of notes and chords (PRECISION) produced dynamics (ATTACK) and spectral content (BALANCE) that are not controlled by the listeners. In a listening test, the guitarists then evaluate not only the sound, but also the sound "as produced by another guitarist", that is the sound and the recorded player. We think that an increased accuracy in the judgement of the instruments is reached with the playing task, where the player interacts himself with the guitar.

4.5.2 The musician-instrument interaction

Judgements exclusively based on listening necessarily miss the interaction between the guitarist and the guitar. For example, if judgements about the *attack* are given in the listening task (figures 4.7 and 4.8), they may either refer to the sound and depict its high-frequency content, or to the way the player that recorded the excerpts once played. But they may not refer to the way the guitar responds to pick strokes, as experienced when playing. In a playing task, the guitar player recovers the following abilities (amongst others):

- his sense of touch. Note that during the playing task, no guitar player spoke about any potential difference in the digital sensations he could have had with the two different wood species (players either did not perceive any difference in wood surface or did not find this criterion relevant during the playing task);
- his interaction with the instrument,
- his control on the production of sound,
- his possibility to produce the particular sound he wishes to hear.

4. Only 3 out of 81 comments mentionned a performance-related judgement.

This interaction with the instrument lets the guitarist produce other evaluations of the criteria in such a way that more accurate judgements are given. This makes possible the discrimination between ebony and rosewood.

4.6 Conclusion

This study provides answers to the questions raised in section 4.1. The central question of this article is clearly answered: different electric guitar fingerboard woods produce differences that are actually perceived by the guitarists when they play.

Even if it conceptually fitted the leading hypothesis of this study (ebony and rosewood as two clearly distinct groups), the categorisation task forced the musicians to group guitars. It turned out to be not adjusted to the judgements of the musicians, who consider each guitar as a singular item. The listening test also showed some limitations: the musical performance, including the choice of sound, attacks, tempo, etc., is imposed and the guitar player loses control on the instrument and then misses some features allowing him to evaluate the guitars. A playing test can give back to the guitar players the faculty to evaluate the instruments in a more accurate way.

Features of similarity can emerge from individual descriptions of the guitars. This monadic description is allowed by the playing and verbalisation task. Based on a series of possibly inter-linked meta-criteria, the evaluations of the guitars are eventually more accurate in playing situation. The psychological descriptors that appeared to be particularly relevant for the discrimination between ebony and rosewood are the PRECISION (each note stands out from other and do not blend with them), and to a lesser extent the ATTACK (the way the guitar responds to the musician's gesture) and the BALANCE (between high, middle and low frequencies). Surprisingly, even if it is often supposed [Fleischer & Zwicker 1999], the *sustain* was not a prominent criterion in the evaluation of the electric guitars of this study: although the criterion was used by guitarists in the present study, some other criteria were found to be more relevant.

Clues are given to answer the question of the use of the psychological descriptors as hypotheses for a mechanical study: mechanical variations among the fingerboard woods produce changes in the sound's PRECISION that are relevant to the musicians. This will be the main purpose of the following of this work. In order to supply useful information to the guitar players and makers, focusing on this PRECISION parameter is essential.

According to the identified meaning of the PRECISION (the notes do not blend), an attempt would be to analyse the audio signals from the guitars in the light of audio descriptors. In the context of this study about the solid body electric guitar fingerboard, this could link perception to acoustics. Psychophysical studies are now firmly calibrated and can be used to further investigate these audio descriptors. It is now possible to focus on criteria (*e.g.* the PRECISION) that are relevant to guitar players, as it is done for other instruments [Saitis *et al.* 2012; Lavoie 2013]. Provided that the perceptive attribute is dimensional (this remains to be validated: is there different degrees of PRECISION? Can guitars be ranked according to their amount of PRECISION?), one can for example think about doing sound synthesis for the investigation of perception thresholds of PRECISION [Woodhouse *et al.* 2012; Wright 1996], or the investigation of rating on semantic scales (e.g. *messy* versus *precise*) [Traube 2004], using various existing methods [Parizet *et al.* 2005].

Acknowledgements

The authors are extremely grateful to the Itemm crew: the luthiers Vincent Charrier, Loïc Keranforn, Lisa Marchand, Bela Pari, Alexandre Paul and Julien Simon, as well as Yann-David Esmans, Fred

Pons and Pierre Terrien. The stimulating collaborative work between LAM/d'Alembert and Itemm was made possible by Vincent Doutaut. Lots of thanks go to the guitarists, not ordered as in the body of the article: Olivier Aude, Yann Armellino, Sylvain Choinier, Anthony Delloye, Jimi Drouillard, Vincent Fournier, René Lebhar, Georges Locatelli, Stéphane Rambaud and Alban Sautour. Thanks also to Hugues Genevois for having been a very helpful beta-tester.

Chapitre 5

Conclusions et perspectives sur l'étude perceptive

Ce chapitre formule des remarques et analyses complémentaires à ce qui a été exposé précédemment. Cela permet d'autres éléments de discussion ouvrant sur de nouvelles perspectives de recherche. Premièrement, on peut s'interroger sur la représentation de chaque mot au sein du corpus : qui a prononcé quel mot, et combien de fois ? C'est l'objet de la section 5.1. La section 5.2 propose des pistes pour d'autres analyses du corpus. On peut par exemple s'intéresser au caractère dimensionnel de certains descripteurs psychologiques (critères) utilisés par les guitaristes : une guitare peut-elle avoir plus ou moins de *sustain* ? Il est aussi remarqué qu'un vocabulaire spécifique est utilisé pour qualifier les fréquences « médium » avec une grande subtilité. Enfin, la section 5.3 propose une conclusion de la partie de cette thèse concernant l'approche perceptive.

5.1 Remarques sur les variations inter-individuelles

Les variations inter-individuelles ne sont pas vues comme d'éventuelles erreurs de mesure, mais bien comme des observations utiles que la linguistique cognitive permet d'interpréter.

5.1.1 Mots et nombre d'occurrences

Aux chapitres 3 et 4, on a défini sur la base de critères grammaticaux et linguistiques les évaluations « positives » et « négatives » des guitares du test selon les « méta-critères » (catégories de mots de sens proche). Rappelons que les appellations « positif » et « négatif » sont les choix de l'expérimentateur et ne sont porteurs d'aucun jugement de valeur : une guitare qualifiée d'un mot ou d'une évaluation « négatif(ve) » n'est pas moins bonne qu'une autre, elle est juste affectée d'une qualification ayant un sens opposé aux méta-critères ou étiquettes des tableaux 4.2 et 4.3, le choix de ceux-ci étant aussi fait par l'expérimentateur.

Comptabiliser ces évaluations nous permet de repérer quel méta-critère est pertinent pour répondre à notre problématique, c'est-à-dire repérer quel méta-critère est pertinent pour différencier une touche en ébène d'une touche en palissandre. Nous ne cherchons pas à trouver les méta-critères valides en tous temps et circonstances pour tout guitariste électrique et pour toute guitare électrique *solid body*. Ainsi si sur les dix guitaristes ayant participé à l'étude un seul d'entre eux s'est exprimé sur un certain concept, mais que ce concept s'est avéré lui permettre de discriminer les deux bois de touche, alors c'est le jugement de ce musicien précis qui nous importera. En d'autres termes, il n'importe pas que tous les guitaristes soient capables de discriminer le bois de touche selon les mêmes critères, il importe d'identifier (et plus tard de traduire en termes mécaniques) quels critères peuvent permettre à certains experts d'y parvenir. En allant encore plus loin dans ce raisonnement, le fait qu'un seul musicien emploie un mot un grand nombre de fois, et que les évaluations positives ou négatives selon ce mot ne soient dénombrées que selon ce musicien pourrait paraître biaiser le compte, si la volonté était d'obtenir une sorte de jugement

représentatif de l'ensemble de la communauté des guitaristes électriques. Mais encore une fois, l'intérêt pour nous est de dégager les critères pertinents pour la discrimination du matériau de touche : si un seul guitariste insiste sur un critère particulier, c'est bien que celui-ci possède une pertinence particulière pour le musicien. C'est précisément cette information que nous souhaitons saisir. Un exemple est donné plus bas avec les mots *harmonique / harmoniquement* du sujet 1 et *précision* du sujet 5 (tableau 5.7).

Il peut être néanmoins intéressant de connaître combien de fois chaque mot du corpus a été cité par combien de guitaristes. C'est l'objet des tableaux 5.1 à 5.8 qui récapitulent le nombre d'occurrences des mots classés dans chacune des catégories sémantiques décrites au chapitre 4, pour chaque sujet et pour le total des sujets. Le tableau 5.1 liste les mots et nombre d'occurrences de la catégorie AGRESSIF, et ainsi font le tableau 5.2 pour la catégorie ATTAQUE, le tableau 5.3 pour la catégorie BAS, le tableau 5.4 pour la catégorie BRILLANCE, le tableau 5.5 pour la catégorie ÉQUILIBRE, le tableau 5.6 pour la catégorie MÉDIUM, le tableau 5.7 pour la catégorie PRÉCISION et le tableau 5.8 pour la catégorie SUSTAIN. Nous avons ajouté deux catégories supplémentaires, qui ne sont pas décrites dans les chapitres 3 et 4 : la catégorie AGRÉABLE et la catégorie AUTRES. La catégorie AGRÉABLE (dont les mots et nombre d'occurrences sont présentés en tableau 5.9) a été construite suivant l'analyse sémantique décrite au chapitre 3, mais il n'en a pas été question précédemment car elle exprime plutôt des jugements hédoniques qui ne sont pas porteurs d'information pour notre problématique. La catégorie AUTRES (dont les mots et nombre d'occurrences sont présentés en tableau 5.10) regroupe les mots dont la sémantique n'a pas été assez clairement définie pour permettre de les classer dans une catégorie sémantique. Bien qu'elle soit présentée ici sous la même forme que les catégories sémantiques, la catégorie AUTRES n'est donc pas une catégorie sémantique. Dans ces tableaux, les catégories BAS-MÉDIUM et HAUT-MÉDIUM ont été incorporées au tableau 5.6, listant tous les mots de la catégorie MÉDIUM, et ce pour des raisons de lisibilité.

Illustrons notre propos sur l'importance relativisée du nombre d'occurrences des mots dans le cadre de notre problématique par l'exemple de la PRÉCISION. Le tableau 5.7 montre que les trois quarts des occurrences du mot *précision* ont été prononcées par le sujet 5 (exemple : *Je la trouve assez précise en terme d'intonation, de distinction des notes*, sujet 5, ligne 99 de l'annexe C). Plus des deux tiers des occurrences des mots *harmonique / harmoniquement* ont été prononcées par le sujet 1 (exemple : *on a des harmoniques, du fait qu'elle soit plus brillante que les autres, on a des harmoniques qui ressortent avec la saturation [...] qui donnent un côté un peu cracra à la distorsion*, sujet 1). Ces deux guitaristes (sujets 5 et 1) ont insisté sur ces mots se rapportant à des concepts et ressentis leur permettant de différencier une touche en ébène d'une touche en palissandre. Ces mots nous permettent précisément de répondre à notre problématique, et en ce sens il serait injuste de minimiser l'influence de certains critères sous le prétexte qu'ils ne sont utilisés que par certains guitaristes [1]. On peut interpréter la diversité de vocabulaire du sujet 1 (dans le tableau 5.7, on voit son utilisation des mots *baveux, bazar, bordel, bourbier, bouillie, brouillon, crade*, tous synonymes [2] d'après le tableau 4.3) dans le même sens, comme la volonté de reformuler justement un ressenti qui lui semblait important.

On peut remarquer que pour la catégorie sémantique PRÉCISION, le tableau 5.7, comptabilisant les occurrences des mots de la catégorie, présente plus de mots et plus d'occurrences que le tableau 3.4, comptabilisant les évaluations positives et négatives exprimées utilisant des mots de cette catégorie sémantique. Cela signifie seulement que tous les mots d'une catégorie ne sont pas utilisés pour exprimer un jugement sur une guitare, mais que certains peuvent n'être utilisés que lors de reformulations ou d'explications en marge d'un jugement.

1. Ce serait de plus négliger les variations inter-individuelles dans le choix des mots.
2. Synonymes au sens de la sémantique et non de la grammaire, car nous n'avons pas différencié adjectifs et substantifs.

TABLE 5.1 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie AGRESSIF, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

AGRESSIF	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
agressif(ve) / agressivité / agresser	3	9	6	-	1	-	-	7	2	3	31
vriller	-	-	-	-	-	-	3	-	1	-	4
moelleux	-	-	3	-	-	-	-	-	-	-	3
froid	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1

TABLE 5.2 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie ATTAQUE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

ATTAQUE	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
répondre / réponse / répondant	1	5	7	1	1	12	5	-	1	4	37
attaquer	2	1	-	4	-	1	19	1	-	-	28
dynamique	7	-	-	5	-	-	2	-	-	-	14
expressivité / expression / expressif(ve)	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8
mat	-	-	-	-	-	-	-	-	8	-	8
mou (molle)	-	-	-	-	3	2	-	-	-	-	5
doucement	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2
fort	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1
impact	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
vivant	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-	1

5.1.2 Les termes des guitaristes électriques

Il apparaît que très peu de mots sont prononcés par tous les guitaristes. Ceci témoigne de la grande richesse du vocabulaire utilisé par les guitaristes électriques, mais aussi des spécificités de chaque locuteur expert. Prenons pour exemple la diversité du vocabulaire du sujet 1 (tableau 5.7) utilisé pour décrire la PRÉCISION : dix-sept mots différents sont utilisés, dont seulement cinq font partie du vocabulaire d'au moins un autre musicien. Ces spécificités justifient *a posteriori* la construction de catégories sémantiques ou classes d'équivalence, comme expliqué au chapitre 3. Il y a donc peu de consensus sur des « termes », toutefois un accord entre experts sur les signifiés a été clairement montré par l'élaboration des classes d'équivalence. Les mots étant prononcés par la plupart des guitaristes sont :

prononcés par 10 guitaristes sur 10 *sustain*, *bas / basse / grave* (dans cette énumérations, les mots séparés par des barres obliques sont indifférenciés car ils apparaissent comme strictement synonymes) et *aigu*,

prononcés par 9 guitaristes sur 10 *répondre / réponse / répondant* et *médium*,

prononcés par 8 guitaristes sur 10 *(dés)équilibre / (dés)équilibré*, *attaque* (substantif) et *(dés)agré-*

TABLE 5.3 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie BAS, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

BAS	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
grave / bas(se) / basse(s)	12	2	13	10	2	11	13	5	20	6	94
rond / rondeur	-	5	3	-	-	1	5	-	-	-	14
chaud / chaleur	-	-	-	-	3	8	1	-	1	-	13
doux(ce)	2	4	-	-	4	-	3	-	-	-	13
plein(e)	-	-	-	4	2	-	1	-	4	-	11
ample / ampleur	8	-	-	-	-	-	1	-	-	-	9
corps	-	2	-	-	2	-	-	-	1	-	5
sombre	-	-	-	-	-	-	-	-	5	-	5

able,

prononcés par 7 guitaristes sur 10 *brillant / brillance*, *clair / clarté* et *agressif / agressivité / agresser*.

Il a été montré par la construction des classes d'équivalence que ces mots prononcés par la plupart des guitaristes sont utilisés pour exprimer le même signifié. Le travail d'analyse, et non la communauté des guitaristes, a constitué ces mots comme des « **termes** » [3]. L'utilisation répétée (la répétition étant considérée comme un indicateur de pertinence) de ces termes par un grand nombre de sujets confirme les catégories qui à l'issue du test sur la jonction du manche au corps avaient été choisies pour amorcer la discussion lors du test sur le matériau de la touche. Ces catégories étaient : « brillance », « attaque », « équilibre » et « *sustain* »). La catégorie « confort de jeu » a été également traitée par les musiciens, avec des remarques concernant principalement les différences constatées dans le profil du manche, mais ces commentaires n'ont pas été analysés ici : nous avons supposé que ces variations géométriques étaient indépendantes du matériau de touche.

5.2 Vers d'autres analyses du corpus

En chapitres 3 et 4, l'établissement et l'analyse du corpus ont été détaillés. L'analyse s'est focalisée sur l'établissement de classes d'équivalence de mots permettant d'accéder aux sémantiques individuelles et à une sémantique consensuelle des guitaristes électriques. Il s'agit là d'un axe d'étude parmi de nombreux autres. Ainsi, il aurait été possible de reproduire une analyse telle que l'a pratiquée [Navarret 2013a] consistant à repérer dans le discours les références aux marques et fabricants. Les stratégies individuelles d'évaluation des guitares auraient également pu être étudiées, ainsi que l'a engagé [Navarret 2013a]. Nous présentons ici deux axes d'étude du corpus qui pourraient s'avérer fructueux pour l'étude de la compréhension de la sémantique des guitaristes électriques : la section 5.2.1 montre qu'au travers de l'étude de l'emploi des adverbes, on parvient à montrer que certaines notions, ainsi que les mots qui sont utilisés pour les exprimer, revêtent un caractère dimensionnel. Ces résultats, s'ils sont confirmés, justifient des études psychophysiques portées sur l'intensité de certains paramètres sonores : études de

3. Si ces mots sont des termes pour l'analyste, ils ne sont pas à proprement parler des termes pour les guitaristes, car si tel était le cas, ils utiliseraient tous le même signifiant pour exprimer ces signifiés. On note ici une différence avec les études de [Cheminée 2009] sur le piano, qui voyait les pianistes parfois utiliser bel et bien des termes dans leur discours. Ceci peut s'expliquer notamment par les différences de formation entre pianistes et guitaristes électrique : principalement une formation en conservatoire d'un côté, et un apprentissage plus informel de l'autre.

TABLE 5.4 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie BRILLANCE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

BRILLANCE	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
aigu(e) / aigu(s)	16	14	25	3	15	10	11	9	15	3	121
brillant(e) / brillance	13	21	-	2	4	2	-	5	9	-	56
attaque (*nom*)	9	6	6	-	3	5	6	9	3	-	47
claquer / claquant	-	4	-	1	-	-	1	5	12	-	23
mordant / mordre	2	-	-	-	-	-	-	2	12	1	17
criard / crier	-	-	-	-	-	-	11	-	1	-	12
sec / sécheresse	-	-	-	-	-	10	2	-	-	-	12
percussif / percutant	-	-	7	-	-	-	-	1	-	1	9
riche / richesse	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	9
tendu	3	3	-	-	-	1	-	-	-	-	7
clinquant	1	-	-	-	-	2	3	-	-	-	6
nerveux(se)	-	3	-	-	2	-	-	-	-	-	5
aigre / aigrelet(te)	1	-	1	-	-	-	-	-	2	-	4
incisif	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
maigre	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2
scintillant / scintillement	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-	2

seuil de perception d'un paramètre du son, étude de la perception de différents degrés d'intensité de ce paramètre, etc. La section 5.2.2 permet de clarifier la sémantique de certains mots qui apparaissent comme typiques du vocabulaire des guitaristes.

5.2.1 Adverbes et échelles sémantiques

Lors de l'analyse linguistique, une attention particulière peut être portée à l'emploi des adverbes d'intensité. Certains mots sont en effet souvent accompagnés d'un adverbe, témoin des variations de l'intensité du concept associé. Lors de l'extraction du corpus de chaque mot des tableaux 5.1 à 5.10, on a aussi relevé les adverbes qui leur sont associés. En fonction de l'intensité de l'adverbe employé pour un mot donné, on peut regarder quels sont les autres mots associés dans la même phrase. Par exemple, les citations :

> *la 3 [G3], elle a le même truc qui s'passe dans l'bas médium par rapport à la 5 [G5] mais en moins brillant, en tout cas ça fait moins travailler l'ampli, du coup, et c'est moins mordant, c'est plus mat dans le ... c'est moins méchant* (sujet 9)

> *Là en saturé ça ressemble vraiment à la deuxième [4], avec évidemment un peu plus d'agressivité, du fait qu'elle soit plus brillante.* (sujet 1)

> *mais y a quelque chose qui s'passe dans l'aigu qu'est un petit peu plus brillant sur celle-ci qui donne un côté un petit peu plus creusé.* (sujet 8)

montrent pour le terme *brillant*, que :

- ➢ les locutions *moins mordant*, *plus mat* et *moins méchant* sont associées à la nuance *moins brillant* ;
- ➢ la locution *plus d'agressivité* est associée à la nuance *plus brillant(e)* ;

Table 5.5 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie équilibre, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

EQUILIBRE	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
(dés)équilibr(é) / (dés)équilibr(e)	7	-	19	3	1	1	10	-	11	2	54
homogène	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
régulière / régularité	-	-	2	-	-	-	-	-	-	-	2
bande passante	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
resserré	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1

Table 5.6 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie médium, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

MÉDIUM	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
médium / milieu / *middle*	9	1	1	5	3	8	3	-	5	9	44
bas-médium	1	-	-	-	1	1	-	-	9	-	12
creux / creusé	-	-	-	-	-	8	-	-	4	-	12
présent / présence	-	-	-	-	1	2	3	-	3	1	10
haut-médium	2	-	-	-	1	-	-	-	6	-	9
nasal / nez / canard / coin-coin	-	-	-	-	-	3	-	-	3	1	7
épais / épaisseur	-	-	-	-	-	-	1	-	5	-	6
fin	-	-	-	-	-	1	-	-	3		4
méchant	-	-	-	-	-	-	-	-	4	-	4

➢ la locution *un petit peu plus creusé* est associée à la nuance *un petit peu plus brillant.*

En faisant ce travail sur tous les mots souvent accompagnés d'adverbes d'intensité, on parvient à trouver, pour chaque intensité de ces mots, les mots qui sont associés. On parvient ainsi à établir des échelles sémantiques, comme on les a représentées en figures 5.1 à 5.7. En détail, la figure 5.1 représente l'échelle sémantique associée au terme *agréable*, et ainsi de la figure 5.2 pour le terme *agressif*, de la figure 5.3 pour le terme *brillant*, de la figure 5.4 pour le terme *brillant*, de la figure 5.4 pour le terme *claquant*, de la figure 5.5 pour le terme *résonner*, de la figure 5.6 pour le terme *précision* et de la figure 5.7 pour le terme *sustain*[4].

Remarquons la portée plus générale de ce résultat : s'il est possible d'identifier l'emploi de ces mots avec des adverbes de différentes intensités, alors cela signifie que le mot et le ressenti associé ont un caractère dimensionnel. Ainsi, d'après les guitaristes électriques, on sait à présent qu'un son de guitare électrique peut être plus ou moins agressif, ou que parler d'un *manque de sustain*, ou d'un *sustain infini*

4. Notons que terme n'est pas synonyme d'étiquette de catégorie sémantique. Est « terme » un mot que notre analyse sémantique a montré avoir une signification partagée par les guitaristes ayant participé à notre test. Avant d'élaborer des échelles sémantiques, nous nous sommes assurés que les mots auxquels étaient associés des adjectifs d'intensité étaient bien des termes. Sans cela, l'échelle sémantique elle-même n'aurait pas été justifiée.

TABLE 5.7 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie PRÉCISION, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

PRÉCISION	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
clair(e) / clarté / *clean*	-	7	4	2	10	3	1	2	-	-	29
harmonique / harmoniquement	21	1	3	-	3	1	-	-	-	-	29
précis(e) / précision	2	-	3	-	15	-	-	-	-	1	21
définition / défini(e)	6	-	10	-	-	-	-	-	-	-	16
sourd	-	-	7	-	-	-	-	1	1	-	9
gras	4	-	-	-	-	1	-	-	-	-	5
baveux / baver	2	-	-	-	-	1	-	-	-	1	4
bazar	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4
tordre	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	4
largeur de spectre / spectre large	1	-	-	-	2	-	-	-	-	-	3
net(te) / netteté	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	3
crade / cracra	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
bordel	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
bouillie	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
bourbier	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
boursouflure	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
brouillon	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
distinction	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	1
droit	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
envahissement	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
inertie	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
ingérable	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
merdouilli	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	1

a un sens pour les musiciens. A l'avenir, faire une hypothèse de dimensionnalité sur les termes *agréable*, *brillant*, *claquant*, *sustain*, *résonner*, *précision / précis* et *agressif*, puis élaborer des tests perceptifs à l'aide d'échelles sémantiques (typiquement une échelle graduée sur laquelle le sujet doit exercer son jugement selon un critère pré-défini et supposé valable par les expérimentateurs, voir par exemple [Traube 2004]) sera fondé. Il est en revanche possible de douter de l'aspect dimensionnel d'autres termes, pour lesquels l'emploi systématique d'un adverbe n'est pas avéré, ainsi par exemple l'*attaque* ou la *réponse à l'attaque*.

5.2.2 Le « médium »

Sans doute en raison de leur culture électroacoustique les guitaristes électriques semblent faire preuve d'une grande exigeance concernant la description des fréquences *médiums*. A l'instar de ce qu'on peut remarquer dans [Navarret 2006 2013a], le présent corpus montre que distinguer ces fréquences en *bas-médiums*, *médiums* et *haut-médiums* est une pratique avérée pour certains guitaristes électriques. Une analyse intéressante et permettant d'expliquer quelques termes de la communauté des guitaristes élec-

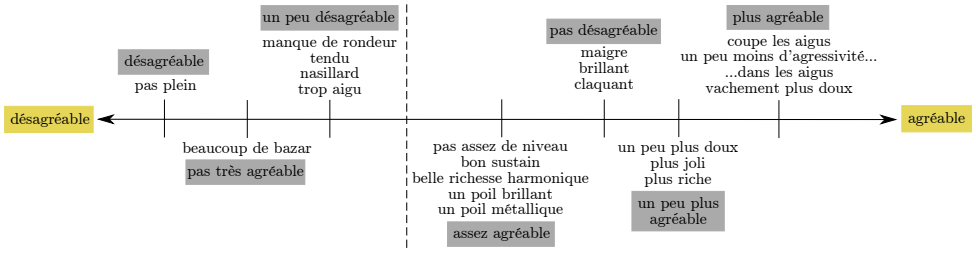


FIGURE 5.1 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *agréable / désagréable*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *agréable / désagréable*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

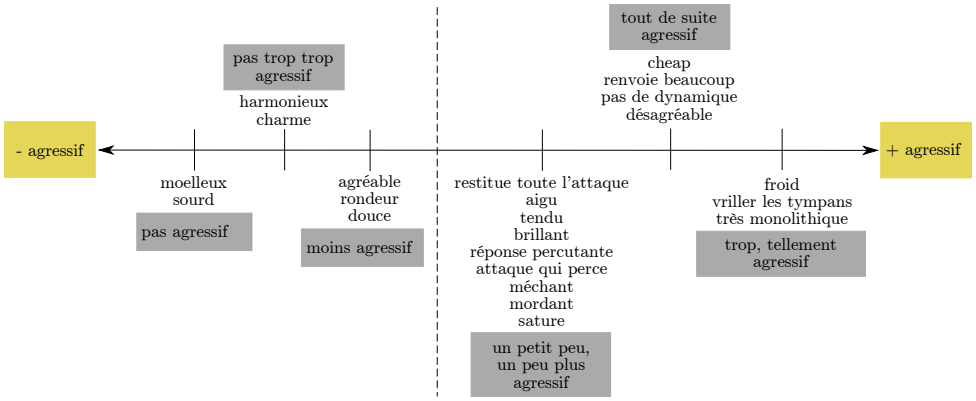


FIGURE 5.2 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *agressif*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *agressif*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

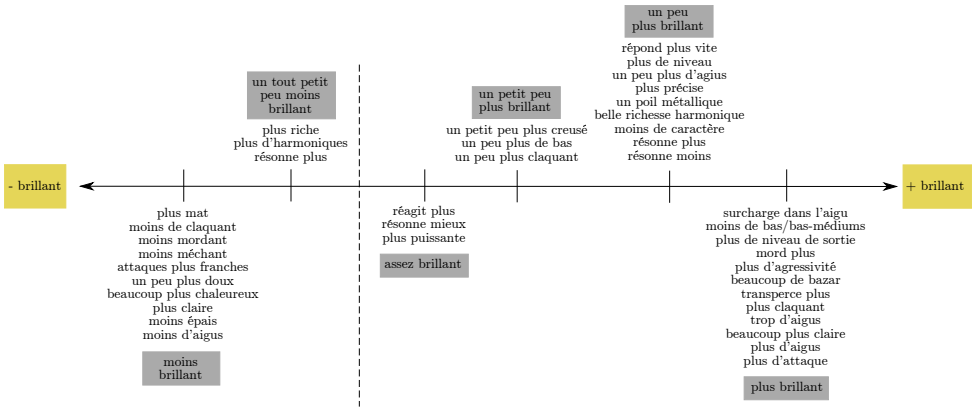


FIGURE 5.3 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *brillant*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *brillant*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

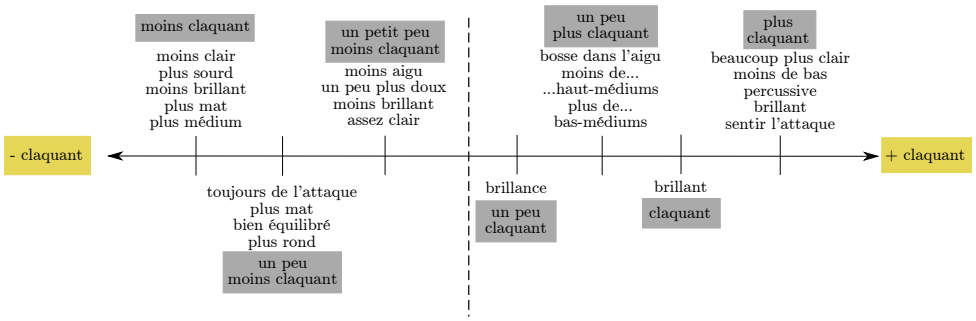


FIGURE 5.4 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *claquer / claquant*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *claquer / claquant*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

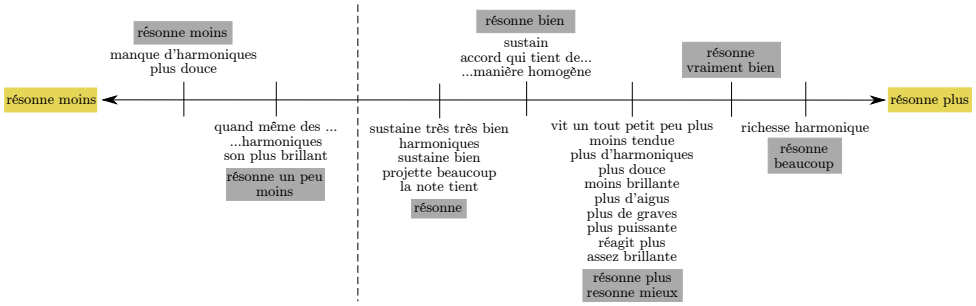


FIGURE 5.5 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *résonner / résonance*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *résonner / résonance*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

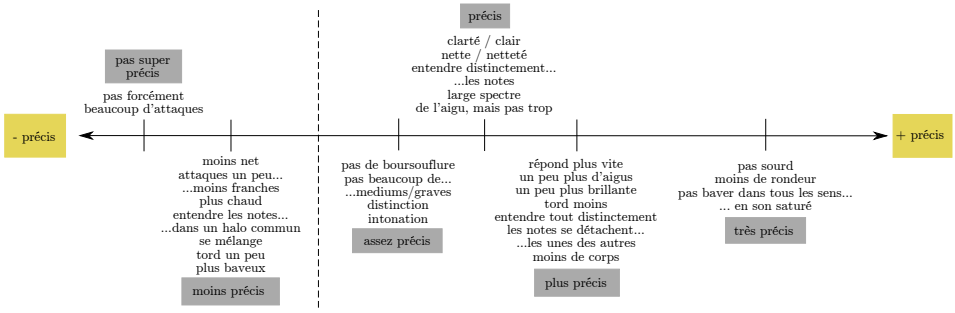


FIGURE 5.6 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *précis / précision*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *précis / précision*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

Table 5.8 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie sustain, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

sustain / résonance	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
sustain	18	7	25	7	3	8	11	2	8	6	95
résonner / résonance	16	-	-	3	12	-	-	1	-	-	32
long / longueur / longtemps	2	2	-	-	-	-	-	-	4	-	8
durer / durée	-	-	-	-	-	1	-	-	1	-	2
court	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
vivre	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

Table 5.9 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie agréable, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

Agréable	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
(dés)agréable	5	5	3	2	3	2	3	-	-	4	27
déranger	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-	1
harmonieux	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	1

triques, mais pas forcément d'autres communautés, est de relever les mots associés aux trois nuances de la catégorie médium. Une méthode proche de celle de la section 5.2.1 est appliquée : pour chaque occurrence dans le corpus d'une des trois nuances de *médium*, on relève les mots associés, ce qui nous permet, avec les indices linguistiques de la section 3.2.3.2, d'établir des relations de synonymie avec chacune de ces trois nuances. La figure 5.8 présente les synonymes de chacune de ces nuances de médium. Ainsi, la figure 5.8 nous enseigne qu'un son *nasal* sera un son perçu avec plus de *bas-médiums* et de *médiums*, avec une absence de *hauts-médiums*. Au contraire, un son *pincé* témoignera d'une prédominance des *hauts-médiums* dans le spectre.

Les résultats concernant les mots associés à la perception du registre *médium* du son d'une guitare électrique sont liés à la présente étude, c'est-à-dire aux guitares à touche variant, jugées par les dix guitaristes professionnels invités, selon notre protocole. Une extrapolation de ces résultats est à faire avec précaution. Ces premiers résultats confirment néanmoins la structure des catégories naturelles : la physique définit le « médium » comme un continuum (variations sur une échelle de fréquence), la perception du guitariste électrique l'inscrit au contraire dans un espace catégoriel. Ainsi il y a, pour le guitariste électrique, trois catégories, allant du *bas-médium* au *haut-médium*, auxquelles l'emploi de certains mots est préféré à l'emploi d'autres mots.

5.3 Conclusion sur l'approche perceptive

Cette section clôt la partie « approche perceptive ». Cette thèse ayant pour objet l'influence des éléments de lutherie sur le son de la guitare électrique *solid body*, il a semblé légitime d'interroger les experts que sont les guitaristes électriques. A été testée la perception par ces musiciens du changement d'un

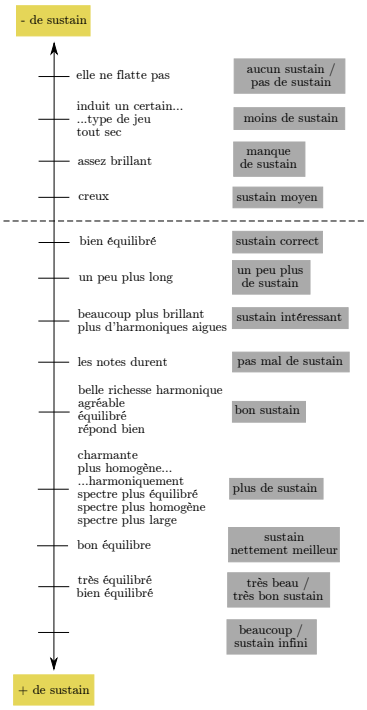


FIGURE 5.7 – Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités de *sustain*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *sustain*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune.

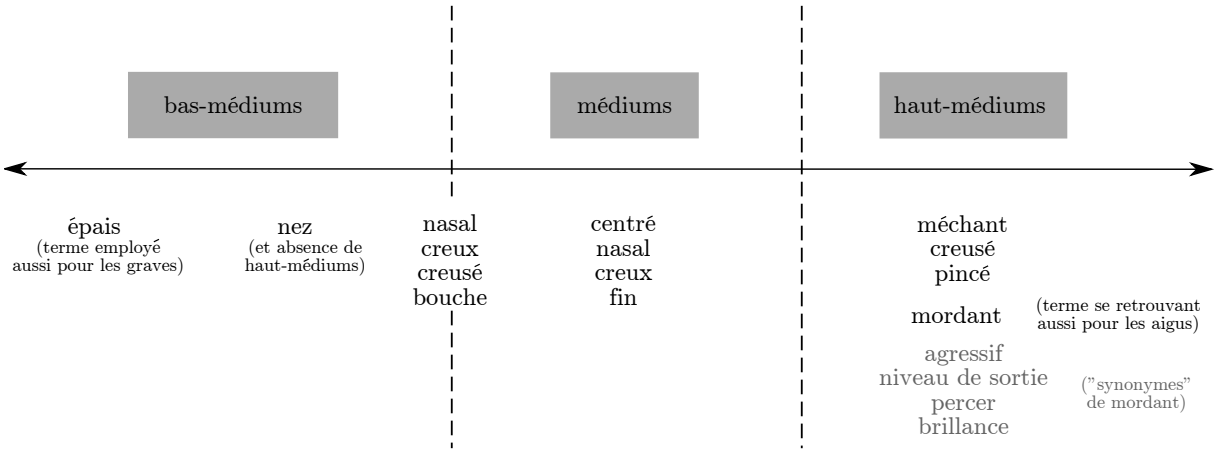


FIGURE 5.8 – Mot associés aux trois nuances de MÉDIUM.

Table 5.10 – Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie autres, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique.

autres	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	**total**
niveau	-	-	-	-	2	-	-	-	13	-	15
accordage / accorder / tenir l'accord	-	-	-	1	-	-	10	-	-	1	12
puissant(e) / puissance	-	-	2	-	6	-	1	-	-	-	9
caractère	4	-	1	-	-	2	-	-	-	-	7
juste / justesse	-	-	-	1	-	-	4	-	-	-	5
pincé	-	-	3	-	-	1	-	1	-	-	5
tempérament / tempérer	-	-	1	4	-	-	-	-	-	-	5
son clair	-	-	1	-	-	-	1	2	-	-	4
âme	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	3
dur	1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	3
personnalité	-	-	-	-	-	2	1	-	-	-	3
sale	1	-	-	-	-	2	-	-	-	-	3
terne	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3
volume	-	-	-	-	-	-	1	-	2	-	3
gain	-	-	-	-	-	-	2	-	-	-	2
propre	1	-	-	-	-	1	-	-	-	-	2
bouché	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	1
vide	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	1

élément de lutherie : le matériau de la touche (ébène ou palissandre, qui sont des essences classiquement utilisées en lutherie de guitare électrique). La volonté de maintenir les musiciens dans un environnement habituel lors des tests perceptifs en laboratoire a présidé à l'élaboration du protocole expérimental. Une tâche de tri libre d'extraits enregistrés sur les guitares de l'étude puis rediffusés sur un amplificateur a montré ses limites pour apporter une réponse à la problématique portant sur la capacité ou non à discriminer le matériau de touche d'une guitare électrique *solid body*. Il a été décidé de proposer aux guitaristes de s'exprimer pendant le jeu des guitares. L'avantage de ce test en situation de jeu est de redonner aux guitaristes la possibilité de juger des guitares selon toutes leurs modalités sensorielles. Au regard du faible nombre de précédents d'études perceptives de la guitare électrique *solid body* dans la littérature, une étude approfondie du vocabulaire utilisé par les guitaristes électriques a dû être entreprise, utilisant des études plus génériques apportant une expertise en psychologie et en linguistique. Cette absence de précédent a conduit à laisser les musiciens libres, de la méthode de test des guitares aux mots employés, pour décrire leur ressenti : ainsi il est possible d'accéder au ressenti propre du musicien en minimisant l'influence du protocole et de l'expérimentateur. Une expertise linguistique est utilisée pour objectiver les ressentis des musiciens au travers de l'étude de leurs verbalisations. On a montré dans cette partie qu'il est possible d'extraire des verbalisations des guitaristes des critères ou descripteurs psychologiquement pertinents pour qualifier une guitare électrique *solid body*. C'est un des apports principaux de cette étude : l'identification de dix catégories sémantiques pertinentes pour les musiciens. En faisant l'hypothèse que ces catégories puissent être extrapolées à d'autres guitaristes et d'autres guitares, lors d'autres tests visant

à répondre à d'autres problématiques, ces catégories pourront éventuellement servir de base à la sélection de critères de jugement *a priori* pertinents pour les guitaristes électriques dans des conditions écologiques de jeu. Parmi ces dix critères, trois se sont avérés permettre aux guitaristes électriques de discriminer une touche en ébène d'une touche en palissandre. Ces critères sont :

- la PRÉCISION liée à la *définition*, à la *netteté* des sons, et à la manière que les notes d'un accord ont de se *mélanger* :

  > *C'est le côté avoir un peu tout de suite la note et puis, [...] que les notes soient plus claires. Pour faire des voicings un peu compliqués où les notes se détachent un peu les unes des autres, au lieu de se mélanger, ce qui peut parfois être pas mal.*, (sujet 5, lignes 179 à 181 de l'annexe C)

  > *Là on arrive à jouer par exemple des octaves en son saturé, je pense que sur la guitare précédente [G4] c'était un peu le bazar, et là on a un truc qui tient la route, on arrive à entendre les notes, ce qui est caractéristique, et sur un accord on entend les notes de l'accord.* (sujet 1) ;

- l'ATTAQUE liée à la réponse de l'instrument aux sollicitations de la main droite et du médiator, et notamment à la capacité de l'instrument à produire les nuances musicales (jeu fort ou pas fort) souhaitées, donc plutôt à un aspect d'interaction entre le musicien et son instrument qui reste à préciser :

  > *attaque, ... c'est une réponse entre le jeu et le ... et la sortie du son* (sujet 2)

  > *Oui, enfin pour moi, c'est plus la réaction, euh, un peu directe à la main droite. Où je sens qu'il y a soit de la tension à l'accord, soit du euh la note qui part tout de suite.* (sujet 5, lignes 221 à 222 de l'annexe C) :

  > *Si j'l'attaque fort elle joue fort si j'attaque doucement elle joue doucement.* (sujet 7)

  > *La dynamique en général, pour moi, c'est le fait que y a une différence énorme entre quand j'attaque et quand j'attaque pas.* (sujet 4) ;

- l'ÉQUILIBRE lié vraisemblablement aux proportions diverses de fréquences *graves*, *médiums* et *aigues* dans le son :

  > *Si j'prends celle-là, elle est entre guillemets peut-être mieux équilibrée : c'est-à-dire elle a du grave et de l'aigu hein.* (sujet 7)

  > *Pour moi c'est ce que j'appelle une guitare équilibrée. Même si je sais pertinemment qu'c'est pas l'cas. Parce que pour les gens « équilibré » c'est les graves pareils que les aigus.* (sujet 7)

  > *Celle-ci a moins de bas. Donc ça c'est la 5 [G5]. Elle a moins de bas, elle a [...] du coup on a plus le haut-médium qui ressort, on a un équilibre qui s'trouve un peu plus, un peu plus haut.* (sujet 9).

Les travaux futurs sur la perception de la guitare électrique *solid body* par le musicien devront tenir compte de ces critères pertinents pour les musiciens. Ces critères (et leur signification exprimée comme des reformulations verbales) devraient être également le point de départ des études ultérieures visant à la caractérisation mécanique des éléments de lutherie de la guitare électrique *solid body*.

Il appartient à des travaux à venir d'interpréter ces indices psychologiquement pertinents en termes mécaniques pour mener une étude vibratoire appropriée à l'avis des guitaristes électriques. En outre, maintenant qu'il a été dégagé plusieurs critères pertinents pour les guitaristes (voire : maintenant que la signification des mots employés par les guitaristes et le consensus quant à leur signification ont été établis),

il est possible d'imaginer pratiquer des tests perceptifs orientés suivant un paradigme psychophysique dont les hypothèses seraient fondées sur les attributs démontrés comme pertinents pour les guitaristes.

D'une manière plus générale, la démarche présentée dans la partie II est intéressante pour l'acousticien en ceci qu'elle peut apporter un complément aux démarches classiques notamment de psychoacoustique. Nous avons vu que la démarche de cognition située utilisée dans cet ouvrage permettait :

- ➢ d'étudier des objets qui sont nouveaux pour l'acoustique, donc d'apporter des hypothèses et axes de recherche à l'acousticien confronté à un objet complexe et non coutumier ;
- ➢ de comprendre la perception des objets qui sont perçus par les humains de manière globale plutôt qu'analytique ;
- ➢ d'apporter un éclairage nouveau sur l'objet d'étude et donc de proposer une orientation originale aux études acoustique et mécanique.

Une telle démarche consistant, si l'objet d'étude s'y prête, à considérer le jugement humain le plus indépendamment possible de considérations physiques, peut être appliquée à de nombreux objets d'études, dans l'optique de consolider et de proposer de nouvelles pistes à des études dans les champs de la mécanique et de l'acoustique. Cette démarche qui permet d'appréhender les objets dans leur globalité, est non seulement particulièrement adaptée au domaine de l'acoustique musicale, mais aussi à ceux par exemple de l'acoustique environnementale (bruits d'environnement, *soundscapes*) où la perception de l'humain est souvent au centre des problématiques (gêne sonore par exemple), ou encore de la sismologie, où le jugement humain peut être sollicité pour proposer de nouvelles pistes de recherche [Holtzman *et al.* 2013; Speeth 1961].

L'approche perceptive de la guitare électrique *solid body* qui a fait l'objet de la partie II a été construite en parallèle de l'approche mécanique présentée en partie III. Si la relation entre les deux approches n'est ni hiérarchique (l'une a conditionné l'autre) ni chronologique (l'une a précédé l'autre), nous verrons que de par leur construction simultanée elles se sont façonnées mutuellement.

Troisième partie

Approche mécanique

Avant-propos

Cette partie montre une approche de la guitare électrique *solid body* par la mécanique. Il s'agit de s'inscrire dans le champ de la dynamique des structures et de l'analyse modale pour décrire le système couplé cordes–structure, qui constitue l'aspect mécanique de la guitare électrique. Se focaliser sur la mécanique et écarter les aspects électromagnétiques de l'instrument reste pertinent pour les luthiers qui travaillent en premier lieu le bois et la guitare en tant qu'objet mécanique. Mais cette vision mécanicienne de l'instrument prétend également apporter des éléments aux guitaristes. Le mécanicien peut parvenir à expliquer les changements occasionnés par des variations d'éléments de lutherie, auxquelles les musiciens sont sensibles. Cette approche mécanique se nourrit donc nécessairement des enseignements des études perceptives.

Les chapitres 6, 7, 9 et 10 sont présentés sous forme d'articles en langue anglaise car ils ont fait l'objet d'une publication, d'une acceptation pour publication ou d'une soumission dans des journaux ou conférences d'acoustique à comité de lecture.

L'étude mécanique de la guitare électrique *solid body* que nous présentons dans ce travail est cadrée par le chapitre 6. L'instrument est vu comme un cas particulier de la réalisation du couplage entre des cordes et une structure. Plus précisément, ce chapitre se propose de :

- ➢ simplifier l'objet complexe qu'est la guitare électrique *solid body* pour permettre une étude quantitative du couplage corde–structure ;
- ➢ proposer un modèle du système couplé corde–structure simplifié.

A partir des équations régissant les oscillations d'une corde vibrante fixe à ses deux extrémités, on établit un modèle de couplage corde–structure par perturbation des nombres d'onde de la corde fixe. Dans le cas de la guitare électrique *solid body*, le couplage corde–structure se manifeste principalement par l'ajout d'amortissement à la corde (l'annexe D confirmera ceci à partir du formalisme de [Gough 1981; Woodhouse 2004a]). Le modèle développé ici prend en compte les mécanismes d'amortissement intrinsèques à la corde et l'amortissement dû à la mobilité de la structure.

A l'aide d'un banc de mesure garantissant des conditions aux limites fixes à la corde, on parvient à identifier l'amortissement intrinsèque de la corde. Parce qu'elle est très coûteuse en terme de temps, cette identification n'est réalisée que pour la troisième corde (sol 2 de fréquence fondamentale 196 Hz) [5]. L'amortissement intrinsèque de la corde dépend de la fréquence, des caractéristiques géométriques et matérielles de la corde, des propriétés de l'air et de l'histoire de la corde : il est montré qu'un modèle développé pour décrire l'amortissement de cordes de clavecin est satisfaisant pour prévoir l'amortissement des cordes de guitare électrique. Ainsi qu'il est rappelé (et infirmé) par [Bourgeois 2009], on a coutume de penser que le *pickup* crée une force magnétique freinant les cordes. Il est montré à l'aide du banc de corde qu'en plaçant corde et plot aimant du *pickup* à une distance caractéristique d'un réglage « standard » de la hauteur des cordes, aucun amortissement supplémentaire significatif n'est procuré par le *pickup*.

Le modèle montre que la contribution de la structure à l'amortissement de la corde est caractérisée par la connaissance de sa mobilité au point de contact avec la corde. Ainsi que montré par [Fleischer & Zwicker 1998], la structure présente une très faible mobilité au niveau du chevalet : l'extrémité de la corde attachée au chevalet peut être considérée comme fixe. On s'intéresse donc à la mobilité qui peut être mesurée sur le manche de la guitare, à chaque point de couplage potentiel, c'est-à-dire au niveau de chaque intersection entre frette et corde. Par des arguments théoriques et expérimentaux (le *pickup* est principalement sensible aux vibrations de la corde suivant la direction dite « hors-plan », c'est-à-dire normal au plan de la touche ou du corps), on réussit à réduire la mobilité de la structure, qui est *a*

5. En anglais la note s'appelle *G3*.

priori une matrice de dimensions 3×3, à la seule mobilité hors-plan. Cette mobilité est mesurée [6], et le modèle peut en être alimenté, ainsi que des données mesurées, pour livrer une prédiction du couplage corde–structure et de l'amortissement des partiels de la corde. Lorsque mode de corde et mode de structure ont une fréquence proche, un fort échange d'énergie de la corde vers la structure a lieu, causant une décroissance anormalement rapide de la vibration de la corde et donc du signal de sortie du *pickup*. Les notes concernées par le phénomène de décroissance anormalement rapide sont appelées par les musiciens « notes mortes » ou « *dead spots* ». Comprendre l'origine de ces phénomènes généralement indésirables, c'est donner au luthier et au musicien les outils pour les éviter.

Chaque mode de corde est potentiellement concerné par le couplage avec la structure. Les éléments de lutherie et leurs déclinaisons modifient les propriétés vibratoires de la structure. Différentes guitares modifient donc le spectre de la corde de diverses manières. Des différences (d'homogénéité) de timbre sont donc à attendre. Nous sommes en possession d'un cadre de pensée mécanique permettant d'expliquer les différences sonores entre instruments perçues par les musiciens.

L'appropriation d'un modèle de couplage permet d'effectuer une étude mécanique des éléments de lutherie en parallèle de l'étude perceptive de la partie II.

En écho au chapitre 4, le chapitre 7 se concentre [7] sur le matériau de la touche et compare deux des six *Les Paul* de l'Itemm dont il a été question lors des tests perceptifs. Une des guitares a une touche en ébène, l'autre une touche en palissandre, tous les autres éléments de lutherie étant voulus identiques. Il s'agit de trouver, à partir des mesures de mobilité sur le manche, un indicateur mécanique permettant de discriminer les deux matériaux de touche.

L'amortissement de la corde couplée est la somme d'un terme d'amortissement lié à la corde et d'un terme d'amortissement lié à la partie réelle de la mobilité (qu'on appelle la conductance) de la structure au point de couplage avec la corde sur le manche. La contribution des mécanismes d'amortissement dus à la structure est mesurée. La contribution des mécanismes d'amortissement internes à la corde est déduite par soustraction du terme dû à la structure à l'amortissement mesuré en sortie de *pickup*. Le modèle de couplage est validé comme prédisant de manière correcte les *dead spots*.

En réalisant des « cartographies » de la conductance sur le manche, on réalise que des différences entre la guitare à touche en ébène et la guitare à touche en palissandre sont observées dans :

- ➢ les fréquences modales de la structure, c'est-à-dire les fréquences des pics de conductance, ou encore les fréquences des notes qui seront affectées par le phénomène de *dead spot*, c'est ce qui est appelé « *dead spot location* » ;
- ➢ la hauteur des pics (les valeurs) de conductance, qui est directement reliée à l'importance du terme d'amortissement supplémentaire pour la corde, c'est ce qui est appelé « *dead spot dangerousness* ».

Certaines limitations apparaissent néanmoins : la stricte coïncidence fréquentielle entre les modes de corde et les modes de structure est un « accident » assez rare. De plus, les coïncidences fréquentielles sont par définition extrêmement dépendantes de l'accordage de l'instrument. On peut alors essayer de caractériser la structure des instruments de manière plus globale. Ainsi on décide de calculer pour chaque mesure de conductance colocalisée sa moyenne dans la bande fréquentielle [20 Hz–2000 Hz] (domaines basses et moyennes fréquences, voir annexe D). La guitare à touche en palissandre apparaît avoir une conductance moyenne systématiquement plus élevée que la guitare à touche en ébène : quel que soit l'accordage et l'« imprécision » de l'accidentelle coïncidence fréquentielle entre corde et structure, la guitare à touche en palissandre a tendance à capter plus d'énergie de la corde. La vibration des cordes d'une guitare à touche en palissandre serait potentiellement plus affectée que celle des cordes d'une guitare à touche en ébène.

6. Des détails et justifications sur le protocole de mesures vibratoires sont donnés en annexe E.

7. D'autres éléments de lutherie ont été étudiés, à l'aide de simulations numériques par la méthode des éléments finis : il s'agit de la forme (symétrique ou asymétrique) de la tête et du manche. Cette étude est présentée en annexe F.

Ce résultat est étendu aux six guitares de l'étude en annexe G.

Les potentielles inhomogénéités dans le spectre des cordes d'une guitare à touche en palissandre peuvent être mises en relation avec les jugements des guitaristes. On voit dans le tableau 3.4 que les guitares à touche en palissandre sont perçues comme plus *riche[s]*, comme ayant plus d'*harmoniques*. La perception s'organisant de manière différentielle, on peut penser qu'un son étant perçu comme ayant en grande proportion certaines harmoniques comporte probablement d'autres harmoniques en quantité moindre. Certaines harmoniques plus présentes que d'autres pourraient être la cause de l'aspect *baveux* ou *brouillon*, notamment lorsque le guitariste utilise la distorsion, procédé qui génère davantage d'harmoniques et tendrait à exacerber des inhomogénéités déjà présentes. Cette piste est à explorer et une analyse croisée du corpus du chapitre 3 et des mesures de conductance moyenne doit être poussée. Des travaux futurs devraient s'y atteler.

Les musiciens, s'ils perçoivent et expriment clairement des similarités entre guitares, ne produisent pas moins une description individuelle de chaque guitare. Même si elles sont de conception et construction identiques, deux guitares peuvent être perçues comme différentes par les musiciens. Les mesures mécaniques nous le montrent également : au chapitre 8 nous constatons qu'il existe autant de variabilité de fréquence et amortissement modaux entre deux guitares nominalement identiques (deux guitares ayant le même matériau de touche, ou deux guitares ayant le même mode de jonction du manche au corps) qu'entre deux guitares nominalement différentes (deux guitares différant par le bois de la touche, ou deux guitares ayant un mode de jonction du manche au corps différent). La personnalité d'une guitare ressentie par les musiciens serait-elle décrite par ses paramètres modaux ?

Nous supposons que les variations de paramètres modaux rencontrées peuvent venir des causes suivantes :

La variabilité intrinsèque du bois : en effet, le bois est connu comme un matériau très variable. On ne trouve pas deux arbres identiques dans la nature, et même si deux morceaux de bois proviennent du même arbre, ils peuvent présenter des grandes différences.

Le travail du luthier : les guitares étudiées dans les chapitres 7 et 8 étaient chacune construite par un luthier différent. Ces guitares restent des objets artisanaux, et bien que respectant les mêmes encadrement, consignes, plans, et utilisant les mêmes outils, par son geste chacun des luthiers peut apporter, consciemment ou non, de la variation dans la structure des guitares.

Le procédé de fabrication : les outils et machines utilisés ont tous une certaine tolérance, provoquant des incertitudes géométriques dans les instruments. De plus, l'hygrométrie et la température, même si maîtrisées par la volonté de faire travailler tous les luthiers aux mêmes endroits aux mêmes moments, peuvent avoir une certaine influence.

Pour tenter d'identifier les causes de variation, on peut se proposer de suivre l'évolution des paramètres modaux durant le processus de construction. C'est l'objet du chapitre 9. Les onze apprentis-luthiers de la promotion 2012–2013 à l'Itemm ont construit chacun une guitare [8], encore une fois d'après les spécifications de la *Gibson Les Paul Junior*. Ces guitares ont fait l'objet d'une étude originale : des mesures de mobilité ont été effectuées à six étapes de leur construction (manche brut, manche profilé, manche

8. Notons que l'encadrement pédagogique a voulu que sur ces onze guitares, six aient un manche réalisé en une seule pièce de bois, et cinq aient un manche réalisé en deux pièces de bois. C'est l'unique différence intentionnelle de lutherie. Pour construire un manche en deux parties, il faut couper au milieu la pièce de bois brut dans le sens de la longueur, inverser les deux morceaux (le morceau de droite passe à gauche, et inversement) puis les coller. Les étapes suivantes, à commencer par la découpe de la forme du manche, sont identiques au cas où le manche n'est constitué que d'une pièce de bois. Pour nos études, l'élément de lutherie « nombre de pièces du manche » a une influence minime. En effet, il est attendu que le collage de deux morceaux de bois aux veines rendues symétriques augmente la résistance statique et diminue les déformations (dues au temps ou aux conditions environnementales) du manche, et il a été vérifié que cet élément de lutherie n'a pas apporté de différence sur le comportement vibratoire du mancheet de la guitare entière.

muni de touche et frettes, corps, guitare assemblée brute, et enfin guitare assemblée avec accastillage et cordes). Une méthode hybride d'identification modale est proposée : la méthode haute-résolution ESPRIT (voir section 6.3.3) est utilisée pour accéder aux fréquences et amortissements modaux, et l'association de ces paramètres modaux à des déformées modales est réalisée par comparaison avec une simulation par la méthode des éléments finis.

Les modes sont suivis tout au long de la fabrication. L'évolution des fréquences modales montre des tendances systématiques qui sont expliquées par des modèles simples. Ces tendances permettent de cerner l'influence de chaque étape de construction. La quantification de la variabilité au sein de ce corpus de onze guitares permet, pour chaque étape de construction, de tirer des conclusions quant à l'origine des variations des fréquences modales. Certaines étapes de construction montrent une plus grande variabilité de fréquence modale : ce sont les stades de construction concernant le bois brut ou l'assemblage de parties. D'autres étapes, au contraire, semblent minimiser cette variabilité : les luthiers sont capables de faire converger le comportement modal de leurs guitares.

On parvient à identifier les causes de la variabilité au sein d'une production artisanale de guitares électriques. Ceci peut être utile au luthier : la connaissance de l'évolution des paramètres modaux au cours de la construction, et de leur variabilité dans un corpus de guitares nominalement identiques, peut permettre d'identifier les étapes cruciales de la facture et de prévoir dès le début de la construction le comportement modal final des instruments. Nous nourrissons l'espoir que le dialogue qui s'est instauré durant cette thèse entre le scientifique et le luthier, s'il est poursuivit, pourra permettre au luthier d'optimiser sa production, et pourquoi pas de séduire davantage de guitaristes. Il s'agit d'un fait avéré, même si d'aucuns le trouvent regrettable : peu de guitaristes électriques font la démarche d'aller voir un luthier. Comme vu au chapitre 1, la culture industrielle est profondément ancrée dans la communauté de la guitare électrique *solid body*. Les grands fabricants réalisent des instruments d'excellente facture à un prix rendant parfois difficile la survie de l'artisan.

Les guitaristes sont donc habitués à utiliser des instruments industriels. Ils possèdent une bonne connaissance du marché et y identifient à coup sûr les bons instruments. Il n'est pas raisonnable d'occulter les résultats des chapitres 8 et 9, ni l'expérience des guitaristes : deux guitares nominalement identiques présentent certes des similarités, mais aussi des différences. Quand le guitariste souhaite acquérir un certain modèle de guitare, il n'est pas rare qu'il se déplace dans un magasin et essaie plusieurs réalisations de ce modèle avant de se décider. Même dans une production industrielle, il peut subsister des différences, certes minimisées par le constructeur, auxquelles les musiciens sont sensibles. Nous en voulons pour preuve cette citation d'un des participants au test perceptif dont il a été question en section 3.1 (sujet 2, cité par [Navarret 2013a]), où il apparaît clairement que des guitares du même modèle présentent sûrement des caractéristiques communes, mais aussi des propriétés différentes :

> *Je parlais d'une vieille Telecaster que j'ai, je l'ai spécialement choisie et celle-là je ne m'en séparerai jamais parce que c'est une Telecaster qui a beaucoup de graves et très douce tout en étant typiquement une Telecaster [...] Et pareil avec mes Les Paul, j'en ai plusieurs, qui ne vont pas avoir tout à fait le même type de réponse, et après il va y avoir une période où je vais avoir une préférence plutôt qu'une autre parce qu'en ce moment, je préfère un son plutôt comme-ci ou comme ça, plutôt chaud, plutôt agressif, c'est une question d'humeur [...] je veux une Gretsch et je vais chercher la Gretsch qui a le son le plus typique Gretsch. Après, on est dans la famille Gretsch mais on peut constater des différences. Mais dans ce cas-là, cela se resserre. Comme je disais tout à l'heure, il y a un son typique Telecaster et après de l'une à l'autre, on n'a pas tout à fait la même chose.*

Le dernier chapitre (chapitre 10) de cette thèse s'attache à quantifier la variabilité des paramètres modaux dans une population de guitares électriques *solid body* industrielles nominalement identiques. En contexte

industriel, la quantité d'instruments produits rend par exemple difficile la minimisation de la variabilité du bois (voir la figure 5.9 qui montre une très petite partie du stock de bois utilisé par le fabricant *Godin*), ou l'appariement d'un corps précis avec un manche précis (voir les figures 5.10 et 5.11 qui montrent la production de manches à la chaîne qui ne laisse pas forcément le temps d'apparier chacun d'entre eux avec le corps idéal), tâches qui apparaissent plus facilement réalisables lors d'une production à plus petite échelle, artisanale notamment. En revanche, certaines étapes de construction sont rendues très répétables par automatisation des tâches (voir les figures 5.12 et 5.13 dans le cas du collage de la tête et du talon [9] au manche). Certaines restent quasi-manuelles, ainsi le polissage des frettes (voir figure 5.14).

Nous avons eu l'opportunité unique de pouvoir réaliser des mesures dans l'entrepôt de l'un des chefs de file mondiaux de la fabrication de guitares électriques [10]. Une campagne de mesures a pu être mise en place sur des guitares prêtes à être expédiées aux revendeurs. Dix-sept exemplaires du modèle que nous nommerons « *Type-1* » sont étudiés vibratoirement. La variabilité des paramètres modaux est quantifiée puis comparée à celle d'autres objets industriels étudiés dans la littérature.

Ce chapitre se poursuit et s'achève par la mise en regard de la variabilité due aux matières premières et au processus de fabrication, et la variabilité due au changement d'un élément de lutherie. Dans un contexte industriel, quelle est la principale source de variation du comportement vibratoire ? Est donc étudié un ensemble de vingt-quatre exemplaires du modèle que nous nommerons « *Type-2* ». Cet ensemble de guitares peut être divisé en deux sous-ensembles de déclinaisons du même modèle : quatorze guitares sont à touche en érable et dix sont à touche en palissandre, tout le reste ayant suivi exactement le même traitement avant le collage d'un des deux types de touche. La comparaison des deux sous-ensembles permet de séparer l'influence d'un changement d'élément de lutherie de celle du procédé de construction industriel.

A l'instar des résultats du chapitre 8 portant sur des guitares artisanales, il est observé que la variation de paramètres modaux induite par le changement du bois de la touche n'est pas plus grande que la variation de paramètres modaux due au procédé de fabrication et à la variabilité intrinsèque de matériaux dits identiques.

Un enseignement fort de cette étude est de faire relativiser l'influence d'un seul élément de lutherie sur le comportement de toute la structure très complexe d'une guitare électrique *solid body*. Certes chaque élément de lutherie — le matériau la touche en premier lieu — apporte sa contribution au son, mais les éléments de lutherie influant le son sont nombreux et concurrents, si bien que leurs effets s'enchevêtrent. Le point de vue du musicien, qui perçoit l'instrument comme un tout, est riche d'enseignements pour l'étude mécanique.

9. Comme en lutherie de guitare acoustique, on appelle « talon » la pièce de bois contribuant à la liaison du manche au corps.

10. Pour des raisons de confidentialité, nous ne pouvons dévoiler ni le nom de la marque, ni celui des guitares étudiées.

FIGURE 5.9 – Une partie de l'entrepôt du fabricant *Godin* où sont stockés en atmosphère régulée en température et hygrométrie les bois pour les touches de guitares électriques et acoustiques.

FIGURE 5.10 – Usine du fabricant *Godin* : manches bruts avec pré-découpe de la tête (à recoller ultérieurement) et rainure pour l'insertion de la *truss-rod*.

FIGURE 5.11 – Usine du fabricant *Godin* : un petit lot de manches (modèle *xtSA*) de guitare électrique avant leur fixation (par quatre vis) à des corps.

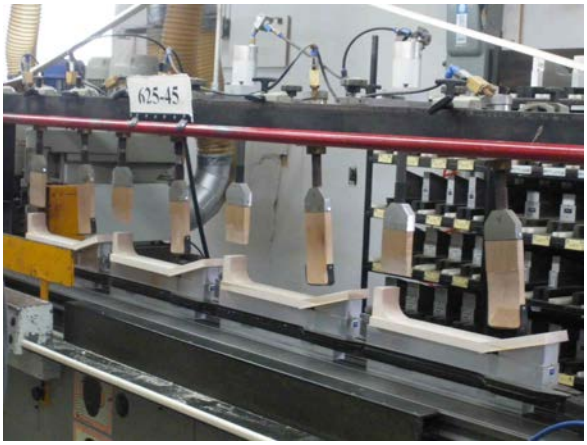


FIGURE 5.12 – Usine du fabricant *Godin* : machines utilisées pour le collage de la tête et du talon au manche.

FIGURE 5.13 – Usine du fabricant *Godin* : machines utilisées pour le collage de la tête au manche.

FIGURE 5.14 – Usine du fabricant *Godin* : une des étapes semi-manuelles de la construction d'une guitare électrique : les frettes sont polies pour uniformiser leur hauteur.

Chapitre 6

Predicting the decay time of solid body electric guitar tones [1]

ABSTRACT

Although it can be transformed by various electronic devices, the sound of the solid body electric guitar originates from, and is strongly linked, with the string vibration. The coupling of the string with the guitar alters its vibration and can lead to decay time inhomogeneities. This paper implements and justifies a framework for the study of decay times of electric guitar tones. Two damping mechanisms are theoretically and experimentally identified: the string intrinsic damping and the damping due to mechanical coupling with the neck of the guitar. The electromagnetic pickup is shown to not provide any additional damping to the string. The pickup is also shown to be far more sensitive to the out-of-plane polarization of the string. Finally, an accurate prediction of the decay time of electric guitar tones is made possible, whose only requirements are the knowledge of the isolated string dampings and the out-of-plane conductance at the neck of the guitar. This prediction can be of great help for instrument makers and manufacturers.

1. Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article nommé « *Predicting the decay time of solid body electric guitar tones* » et publié dans le volume 135 du *Journal of the acoustical society of America* [Paté *et al.* 2014c] en mai 2014.

6.1 Introduction

The solid body electric guitar is an electric guitar without soundbox in order to avoid acoustic feedback that occurs when an amplifier is used. The soundbox is replaced by a thick and solid wood plate. The low admittance at the bridge provides at the same time much more sustain than hollow body electric guitars, which have a thin soundboard. The instrument is equipped with electromagnetic pickups, transducing mechanical string vibration into an electric signal [Paté *et al.* 2012a; French 2009].This signal is sent to an amplifier and the sound is radiated by loudspeakers. In addition to the chance that has been given to the guitar player to get heard among other instruments, the electrification of the guitar has thoroughly changed the playing techniques and musical philosophy of guitar players.

There has been a constantly increasing number of devices transforming the signal of the pickup before getting into the amplifier, so that the effect processing chain itself has become a real instrument. Acoustical studies about the electric guitar have been so far mainly focussing on this effect chain, from pickup [Queen 1966; Horton & Moore 2009; Jungmann 1994; Lemarquand & Lemarquand 2007] to amplifier [Cohen & Hélie 2010; Macak & Schimmel 2010] through effect processing devices [Kröning *et al.* 2011; Holters & Zölzer 2011], often aiming at doing sound synthesis [Lindroos *et al.* 2011], post-processing on the output signal of the pickup [Karjalainen *et al.* 1999], or analysis of music and technology [Zwicker & Buus 1998; Fricke 1998].

The pickup and the electric chain are of course essential for the sound of the electric guitar, but the pre-transduction mechanical phenomena also contribute to the sound. The string is coupled at both its ends to other vibrating systems. Mechanical coupling with these systems (fret [Evangelista 2011; Varieschi & Gower 2010; Lane & Kasparis 2012], bridge, finger, fingerboard, nut) alters the string vibration. Gough [Gough 1983] studied the coupling between a string and a resonant structure in the general case of a string instrument: if the frequencies of the separated systems are close, the frequencies and dampings of the coupled system might be altered. This result was confirmed in the case of duplex piano strings coupled by the bridge [Weinreich 1977] and in the case of the coupling of a classical guitar string with the soundboard [Woodhouse 2004b]. Similar results are found for the harpsichord case [Fletcher 1977], where the coupling of the string and the soundboard changes the decay time of the string.

Despite its name, the solid body electric guitar vibrates [Le Carrou *et al.* 2010; Russell *et al.* 2003; Esposito *et al.* 2002; Esposito 2003]. Only a few studies investigated the mechanics of the instrument in connection with its musical features. Fleischer [Fleischer & Zwicker 1998 1999] studied the "dead spot" phenomenon: some notes have a much shorter decay time than their neighbors. This phenomenon has been qualitatively linked with the dynamic behavior of the guitar. At the frequency of the note, the guitar may have a high out-of-plane conductance value at the place where the note is played. The string vibrating energy may be caught by the structure. The length of the note, the sustain, is affected by the coupling. Partials may couple differently so timbre inhomogeneities may appear. For the solid body electric bass guitar, the global decay time is shown [Fleischer 2005] to move away from the theoretical isolated string decay time if there are some out-of-plane conductance peaks at string partial frequencies.

The present paper gives the experimental and theoretical justifications for the implementation of a framework for the study of solid body electric guitar tones' decay. The aim of the article is to identify which damping mechanisms are relevant for the prediction of decay time, among those suggested by various sources: intrinsic string damping, coupling with the structure, magnetic interaction with the pickup.

Section 6.2 simplifies the complex mechanical system of the solid body electric guitar to a string connected to a mobility at one of its ends. The isolated string behavior is theoretically and experimentally investigated in Sec. 6.3. The coupling of the string with the magnetic field and the structure is the object of Sec. 6.4. Finally, Sec. 6.5 proposes an estimation method of the global decay time only based on the knowledge of the mechanical behavior of the structure and the Q values of the isolated string.

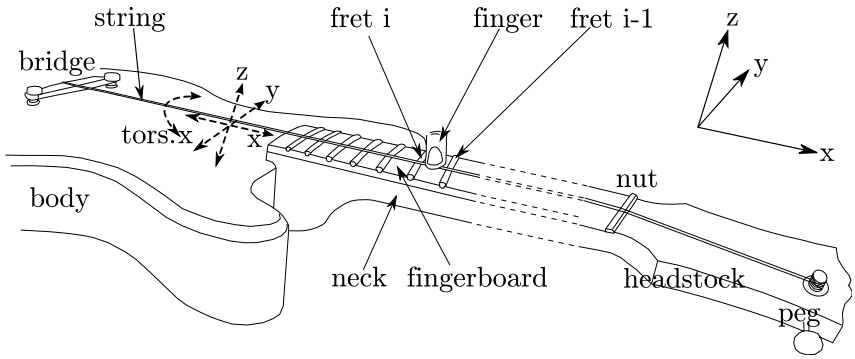


Figure 6.1: Overview of the mechanical interactions between the string and the structure of an electric guitar. The string is stretched between the bridge and the peg. Energy flows from the string to the structure at several places: bridge, fret, finger, nut, peg. Transverse string vibration along y- and z- axes, as well as longitudinal waves along x-axis and torsional waves around x-axis can occur (dashed lines with arrows).

6.2 An electric guitar model

6.2.1 The guitar of the study

A handmade replica of the reference [Paté *et al.* 2012a] model *Les Paul Junior* by *Gibson* illustrates the study. According to the specifications of the historical model, body and neck are made of mahogany, the fingerboard is made of rosewood, and one single-coil *P-90* pickup made by manufacturer *Kent Armstrong* is mounted near the bridge. This is a copy of one of the most popular and widespread electric guitar pickups, originally made by manufacturer *Gibson* [Hunter 2008].

The string of the electric guitar is stretched between the bridge and the peg. The vibrating length of an open string is from the bridge to the nut. The basic role of the left hand (of a right-handed player) is to shorten this vibrating length in order to produce other playing frequencies. By doing this, the left-hand finger pushes the string against the fret. Figure 6.1 gives an overview of the mechanical interaction processes between the string and the other parts of the guitar in a playing context. It defines the axes that will be used in the following of the article: x is the axis of the string, y is parallel to the fret (the "in-plane" direction) and z is normal to the guitar body's plane ("out-of-plane"). The interactions between the strings and the other parts of the guitar alter the vibration of the string.

6.2.2 String model

The knowledge of the bandwidth of the pickup allows us to make some simplifications of the string model. All notes of the guitar in the study are played successively by an experienced player. Plucking is performed with a pick and fingering with the left-hand middle finger. The plucking point is at a typical distance of 12 cm from the bridge. Care has been taken to keep the plucking (essentially along the y axis in Fig. 6.1) as reproducible as possible, which is the case for an experienced player's gesture [Chadefaux *et al.* 2012]. The pole pieces of the pickup are at a distance of 4 cm from the bridge. The output of the pickup is recorded. From the spectrum X of the whole recording (all notes played in a row, without any normalization), the cumulative energy contained between 0 Hz and each frequency is computed as

$$E(f) = \int_0^f |X(\nu)|^2 d\nu \tag{6.1}$$

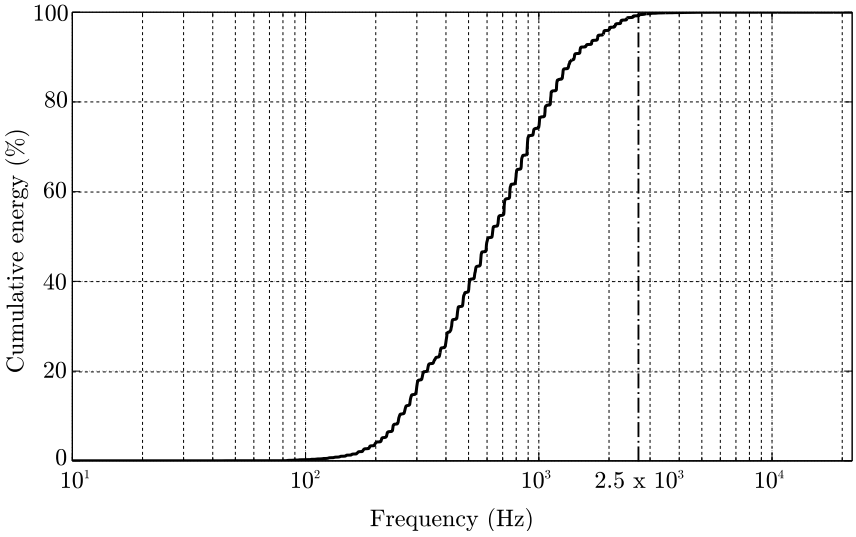


Figure 6.2: Cumulative energy between 0 Hz and the current frequency, computed on a recording of all the notes of the guitar played in a row. Dashed-dotted line indicates the frequency 2.5 kHz, above which less than 5 % of the total energy remains.

Table 6.1: Measured and theoretical data for the G3 string. Measured data: d, diameter; L, open string length; ρ_L, mass per unit length. Computed data: $I = \pi d^4/64$, second moment of area; $c = \sqrt{T/\rho_L}$ velocity of transverse waves; T, tension. Theoretical data: E, Young's modulus of steel; G, shear modulus of steel.

d (m)	**I (m^4)**	**L (m)**	**ρ_L ($kg.m^{-1}$)**
4.32×10^{-4}	1.71×10^{-15}	0.629	1.1×10^{-3}
c ($m.s^{-1}$)	**T (N)**	**E (Pa)**	**G (Pa)**
246.43	69.43	2×10^{11}	8.08×10^{10}

As can be seen in Fig. 6.2, 95% of the energy of the output signal of the guitar is below the cutoff frequency of 2.5 kHz. This confirms Karjalainen's [Karjalainen *et al.* 1999] results about the low-pass behavior of electric guitar pickups.

A string of length L, Young's modulus E, shear modulus G, diameter d, moment of area I, mass per unit length ρ_L, and density ρ_V is considered. This paper focuses on the 3rd (note G3) string, but all results can be extended to the other strings. Geometric characteristics measured on a G string from the *d'Addario EXL110* set as well as theoretical material data are shown in table 6.1. Calculated data from measured and theoretical data are shown in table 6.2.

The unperturbed case is a string stretched between two rigid ends with tension T. Torsional waves around the x-axis can travel with celerity $c_{tors} = \sqrt{\frac{G}{\rho_V}}$ and longitudinal waves along the x-axis can travel with celerity $c_{comp} = \sqrt{\frac{E}{\rho_V}}$, so that the lowest frequency for each of these wave types is the fundamental frequency defined as [Valette 1995]

$$f_0^{tors,comp} = \frac{1}{2L} c_{tors,comp} \tag{6.2}$$

Table 6.2 shows that the values of f_0^{tors} and f_0^{comp} are above the cut-off frequency of the pickup, so longitudinal and torsional waves would not significantly contribute to the sound of the guitar. Further-

Table 6.2: Data computed from the G3 string characteristics. f_0, f_0^{tors} and f_0^{comp} are the fundamental frequencies for respectively transverse, torsional and longitudinal vibration.

$\mathbf{f_0}$ **(Hz)**	$\mathbf{f_0^{tors}}$ **(Hz)**	$\mathbf{f_0^{comp}}$ **(Hz)**
196	2558	4125

more, the pickup is sensitive to the change in the magnetic flux through its coil [Horton & Moore 2009]: unless the string is strongly inhomogeneous, such change should be very small for longitudinal or torsional waves.

Considering bending waves, the motion $\hat{z}$ of the string along axis z in a frictionless approach is governed by [Valette 1995]

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \hat{z}}{\partial x^2} - \frac{EI}{T}\frac{\partial^4 \hat{z}}{\partial x^4} \tag{6.3}$$

where $c = \sqrt{\frac{T}{\rho_L}}$ is the velocity of transverse waves. Note that everywhere in the following equations of string, the polarization $\hat{z}$ can be replaced by the polarization $\hat{y}$ of the string. Considering harmonic waves, the Eq. (6.3) leads to:

$$\omega_{0,n} = k_{0,n} c \sqrt{1 + k_{0,n}^2 \frac{EI}{T}} \tag{6.4}$$

where the index 0 reminds that the quantities correspond to an isolated string, and n denotes the partial number. Equation 6.4 can be written with the inharmonicity [Rigaud *et al.* 2013] coefficient $\beta = \frac{EI\pi^2}{TL^2}$:

$$\omega_{0,n} = k_{0,n} c \sqrt{1 + n^2 \beta} \tag{6.5}$$

For the 3rd string, the highest inharmonicity coefficient is reached for the shortest vibrating length (string pressed against 22nd fret) $L = 0.117$ m and equals $\beta_{max} = 1.16\text{x}10^{-3}$ according to table 6.1. The corresponding note is a F5 with fundamental frequency 698.46 Hz. Within the frequency range of the study (upper limit 2.5 kHz, see Fig. 6.2), this note has three overtones, leading to a maximum value of $n^2\beta_{max} = 3^2\beta_{max} = 0.0104$. The frequency ratio between the flexible string frequency and the stiff string frequency is then $\frac{1}{\sqrt{1+3^2\beta_{max}}} = 0.9948$. Between a flexible and a stiff string model, a frequency change of 0.52% occurs in the worst case for the considered string.

Assuming then a flexible string model, Eq. (6.4) becomes:

$$\omega_{0,n} = k_{0,n} c \tag{6.6}$$

Rigid-end boundary conditions $\hat{z}(0,t) = 0$ and $\hat{z}(L,t) = 0$ drive to the classic form of string motion:

$$\hat{z}(x,t) = \sum_{n=1}^{N} a_{0,n} cos(2\pi f_{0,n} t + \phi_{0,n}) sin(k_{0,n} x) \tag{6.7}$$

where $a_{0,n}$ are the modal amplitudes, $f_{0,n}$ are the modal frequencies, $\phi_{0,n}$ are the phases, $k_{0,n} = \frac{n\pi}{L}$, $n = 1, 2, \ldots$ are the quantized wavenumbers, and N is the number of harmonics within the bandwidth of interest.

Since the string is considered here as flexible, it is assumed that no bending moment is transmitted to the string part between the fret denoted as "fret i" in Fig. 6.1 and the peg. This fret i can be considered a string end. The mechanical interactions between the string and the finger, the fret i-1, the nut and the peg can be neglected.

Following Fleischer [Fleischer & Zwicker 1998 1999], the conductance is found in Sec. 6.4.2 to be much smaller at the bridge than at the fret. The bridge end of the string is then considered as rigid in the

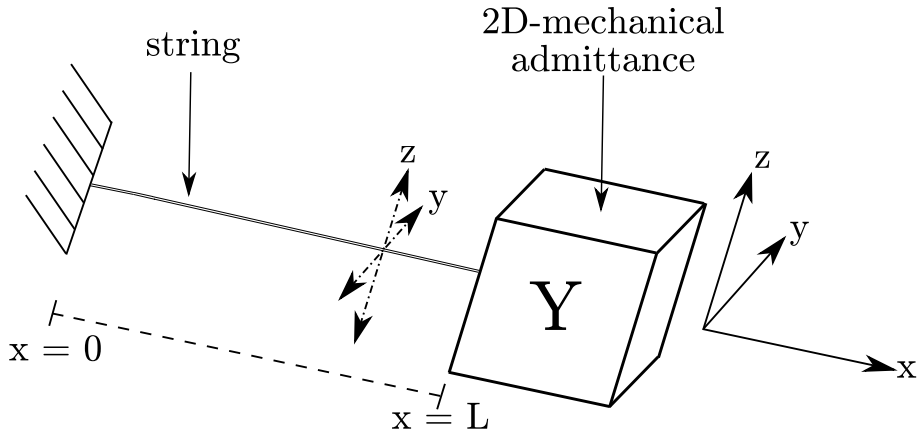


Figure 6.3: Scheme of the fully-simplified coupled system standing for the solid body electric guitar: a string moving in two orthogonal polarizations connected to a 2D-mobility Y.

following.

The interactions between the string and the structure can be modeled by the two transverse polarizations of a flexible string connected at one end to a mechanical 2D-mobility Y. This mechanical model is shown in Fig. 6.3.

6.3 The isolated string

In order to estimate the intrinsic losses of the string, the string is first studied separately from the guitar.

6.3.1 A model of string damping

A complete review of the damping mechanisms of an isolated string is presented by Valette [Valette 1995]. The damping in musical strings being small, it can be inserted by adding an imaginary part to the string modal frequencies [Woodhouse 2004a]:

$$f_{0,n} \rightarrow f_{0,n}(1 + \frac{j}{2Q_{0,n}}) \tag{6.8}$$

where j is the imaginary unit and $Q_{0,n}$ is the modal Q factor (or quality factor) associated with the nth partial. According to Valette [Valette 1995], $Q_{0,n}$ is due to several mechanisms. A part of the Q factor is due to the friction of the string with the air:

$$Q^{-1}_{friction,n} = \frac{R_L}{2\pi\rho_L}\frac{1}{f_n} \tag{6.9}$$

where

$$R_L = 2\pi\eta_{air} + 2\pi d\sqrt{\pi\eta_{air}\rho_{air}f_n} \tag{6.10}$$

where η_{air} and ρ_{air} are the air dynamic viscosity and density respectively.

Internal damping mechanisms also contribute to the total Q factor. We denote VE and TE the effects of visco and thermo-elastic phenomena respectively:

$$Q^{-1}_{VE/TE,n} = \frac{4\pi^2 EI}{T^2 c}(\delta_{VE} + \delta_{TE})f_n^2 \tag{6.11}$$

where δ_{VE} and δ_{TE} are the imaginary parts of the Young's modulus.

Another damping mechanism occurs in wound strings, associated with dry friction between two successive turns of wire. It comes out as a delay between the slope $\frac{\partial \hat{z}}{\partial x}$ and the shear force $T\frac{\partial \hat{z}}{\partial x}$ in the string, hence the effect is the same as that of a complex tension $T(1 + j\delta_W)$.

The last damping mechanism is due to the dislocation phenomenon. It was shown [Cuesta 1990] to be well described by a factor Q_{disl} which is constant over the audio frequency range.

Finally, the damping of the nth string partial of the isolated string is:

$$Q_{0,n}^{-1} = Q_{VE/TE,n}^{-1} + Q_{friction,n}^{-1} + Q_{disl}^{-1} \tag{6.12}$$

For a wound string, the term $Q_W^{-1} = \delta_W$ should be added to equation 6.12. Experimental values of the Q factor are estimated in Sec. 6.3.4 with the method described in Sec. 6.3.3.

6.3.2 Experimental protocol

A heavy, rigid, and damped measurement frame [Cuesta & Valette 1988 1989] is used to guarantee rigid-end conditions to the string, so that the string is considered to be isolated. Two optical sensors [Hanson 1987] are used to record each transverse polarization of the string vibration: as the string vibrates between the optical emitter and receiver, it periodically and gradually cuts off the optical beam. Before each measurement, string rest position and optical beam are carefully set up in such a way that the whole motion of the string remains in the linear part of the characteristic function of the optical sensor [2].

The G3 string is first set and tuned to its nominal open string length and fundamental frequency according to table 6.1. The length of the string is then shortened step by step to the vibrating lengths corresponding to all the bridge-fret distances. Tension, vibrating lengths and playing frequencies are the same as if the string was mounted on a guitar.

For each string length, the optical sensors and the end of the string are at a distance of 4 cm, because it is the distance between the bridge and the pickup's pole pieces on the guitar of the study. For each length, the string is excited 8 times with the wire-breaking [Woodhouse 2004b] method. The excitation angle between axes y and z is 45° in order to excite both polarizations identically. The end of the string and the excitation point are at a typical playing distance of 12 cm. Figure 6.4 shows the experimental setup for the study of the isolated string.

6.3.3 Signal model

The modal Q factors of Eq. (6.8) can be inserted in the complex form of Eq. (6.7). The string vibration measurements are made at a particular place $x = x_{meas}$, so that the spatial term $sin(k_{0,n}x_{meas})$ of Eq. (6.7) is a constant and can be included in the modal amplitudes. The signal model then writes:

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N} a_n cos(2\pi f_n t + \phi_n) e^{\frac{-\pi f_n}{Q_n} t} \tag{6.13}$$

Note that the index 0 is omitted because this model is applied for the isolated as well as the coupled string. This signal model is known as exponential sinusoid model (ESM). A natural choice of analysis method for such signals is the ESPRIT method [Roy *et al.* 1986]. This method accurately [Le Carrou *et al.* 2009] identifies the modal amplitudes a_n, frequencies f_n, phases ϕ_n, and Q factors Q_n [Le Carrou *et al.* 2009; Elie *et al.* 2012]. Furthermore the ESPRIT method overcomes the Fourier resolution, making possible the study of coupled systems with very close frequencies [Le Carrou *et al.* 2009]. This is an expected feature of the string signals when dealing with the two polarizations.

2. Ces fourches optiques sont décrites dans [Le Carrou *et al.* 2014b].

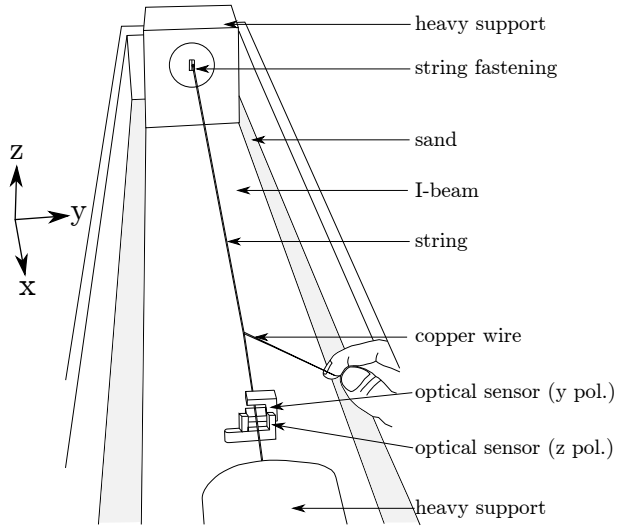


Figure 6.4: Sketch of the measurement setup for the isolated string. The string is stretched between two heavy supports at playing tension and length. Two optical sensors measure each transverse (y and z) polarization. The string is excited with the wire-breaking method. Clamps firmly attach the string's heavy supports as well as the optical sensors' supports to a heavy I-beam filled with sand, and are not drawn here for clarity reason.

The method proposed by Le Carrou [Le Carrou *et al.* 2009] is applied here to the string signals, for the purpose of accuracy. The analysis is carried out where the exponential decay assumption is valid: because the focus of this paper is the notes' decay, the attack part of the notes are not considered, although it contributes a lot to the tone quality of electric guitars. In order for the ESPRIT algorithm not to be disturbed by the transient components, the portion of the signal that is analyzed starts 2–3 s after the onset time. A duration of 1–2 s for the analyzed signal portion is enough to get accurate results and to avoid a lower signal-to-noise ratio at the end of the vibration. The corresponding spectrum is shifted so that it is centered around the frequency of interest. A very high Q factor low-pass filter is then applied to the signal, in order to let the algorithm focus on this very frequency. A high decimation factor allows then a strong reduction of the computational time without loss of information. The ESPRIT method is applied to the resulting signal. The implementation of the ESPRIT method itself is explained in a very comprehensive way in recent papers [Le Carrou *et al.* 2009; Elie *et al.* 2012] dealing with closely related topics.

6.3.4 Results

The ESPRIT method is applied to the output signals of the optical sensors. This section gives the results for the isolated string, at vibrating lengths corresponding to the vibrating lengths defined by the successive frets when the string is mounted on the guitar. The measurement frame is known [Cuesta 1990] to be symmetric. This is confirmed by the fact that the results are similar for both polarizations. Only one polarization is therefore shown. For each vibrating length, Q values are identified by the method described above for every partial under 1000 Hz, since the vibratory study of Sec. 6.4 is limited to this frequency. For all vibrating lengths and partials within the bandwidth, the identified Q factors are shown in Fig. 6.5. The mean values as well as the expanded uncertainty of eight measurements are shown. Expanded uncertainties (due to measurement and the ESPRIT identification method) for the identification of Q factors are found to be small. This proves the repeatability of the measurement

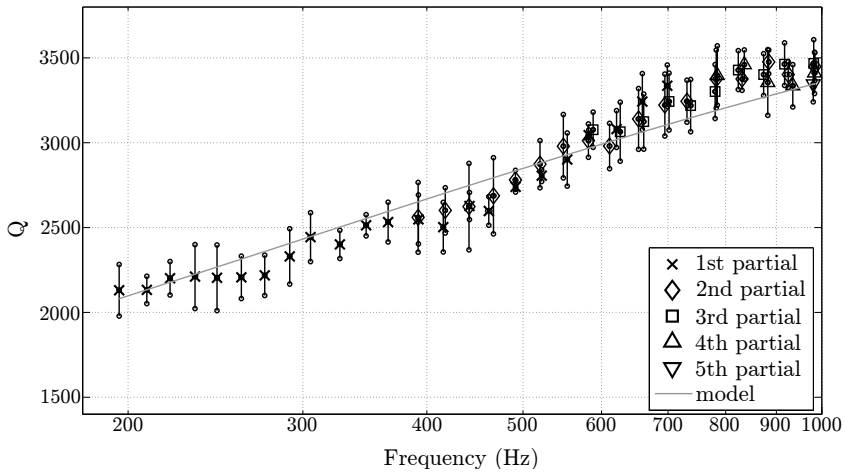


Figure 6.5: Isolated G3 string: identified Q factors for every vibrating length (corresponding to every bridge-to-fret distance) and every partial below 1000 Hz. For each vibrating length, eight measurements are carried out. For both frequency and Q factor, crosses (resp. diamond, square, upward triangle and downward triangle) indicate the mean value, and circles indicate the expanded uncertainty (95% confidence interval) for the 1st (resp. 2nd, 3rd, 4th and 5th partial). Gray line indicates the results of the isolated lossy string model of Eq. (6.12).

protocol. The data of Fig. 6.5 is compared to the computation of the isolated string damping model of equation 6.12. For the computation, the values of table 6.1, as well as typical values [Valette 1995], are used: $\delta_{VE/TE} = 1 \times 10^{-3}$, $\rho_{air} = 1.2$ kg.m^{-3} and $\eta_{air} = 1.8 \times 10^{-5}$ kg.m^{-1}.s^{-1}. The Q factor due to dislocation is adjusted to $Q_{disl} = 5500$. Note that small differences between the model prediction and the measurements can be observed. Indeed, the experimental estimation of $\delta_{VE,TE}$ and Q_{disl} is still a challenging problem. Depending on the composition of the metal used for the musical string, $\delta_{VE,TE}$ takes values ranging from 1×10^{-4} to 1×10^{-3}. The variation range of $\delta_{VE,TE}$ as well as the uncertainty in its measurement are quite high. However, since in the frequency band of the study, the isolated string damping is dominated by air friction, the uncertainty in $\delta_{VE,TE}$ should not have a significant effect. The reasonably assumed frequency-independent Q_{disl} strongly depends on the history of the metal (cold working for example) and can take values from 7000 to 80000 for brass strings [Cuesta 1990]. In absence of devoted study about Q_{disl}, this parameter is estimated by fitting the theoretical Q-curve to experimental Q-values.

A gray line in Fig. 6.5 shows the isolated string damping model computation. As can be seen, for all vibrating lengths and partials in the frequency range, the values of the model are always included within the experimental uncertainties, so the data and the model match. A small but systematic trend can be noticed in Fig. 6.5: lower (resp. upper) components seem to have a slightly lower (resp. higher) Q factor than predicted by the model.

However, the damping model of Eq. (6.12) that was developed for harpsichord strings is still valid for the considered electric guitar string. Note that for electric bass guitar strings, the main damping mechanism seems to be the internal friction [Fleischer 2005] (denoted $Q_{VE/TE}$ here) whereas here the electric guitar string damping is dominated by $Q_{friction}$, the term representing the friction of the string with the air. The isolated string behavior has been described, now its coupling with the guitar will be studied.

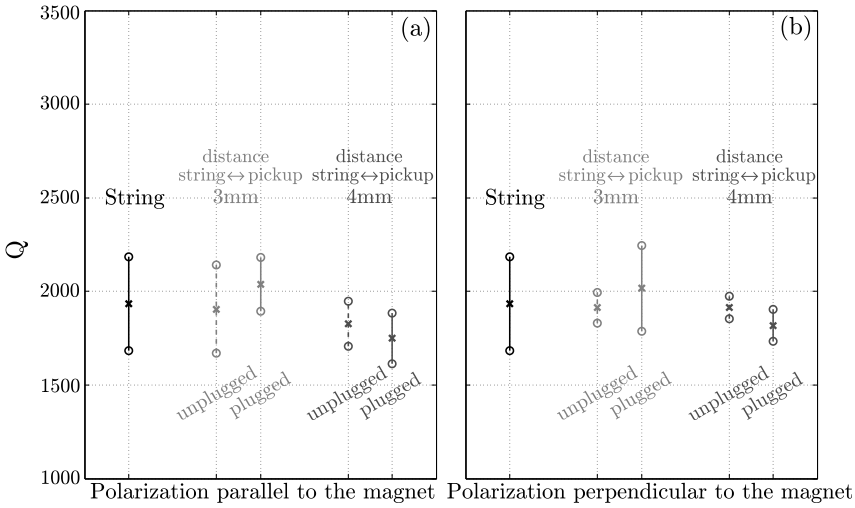


Figure 6.6: Identified Q factors for the fundamental frequency of the unmounted string, with or without pickup at its vicinity. Two typical distances between the string and the magnetic pole piece are studied. Pickup can be either in open-circuit or plugged into the amplifier. Crosses indicate the mean value and circles indicate the expanded uncertainty (95% confidence interval) of 15 measurements. (a) polarization parallel to the pole piece (z), (b) polarization normal to the pole piece (y).

6.4 The string and the guitar

When it is mounted on the guitar, the string can couple with the magnetic pickup and the mechanical structure. The two couplings are investigated in this section.

6.4.1 On the influence of the pickup

The influence of the pickup on the string vibration is subject to debate among the luthiers community. An attracting force may result from a magnetic interaction between the pickup pole pieces and the ferromagnetic string. This may induce an extra damping for the string. The influence of the pickup on the string vibration is studied experimentally.

The *Kent Armstrong P-90* pickup of the guitar presented in Sec. 6.1 is used in this study. Both the pickup and the G3 string are separated from the guitar. Excitation and displacement measurement methods remain the same as in Sec. 6.3.2. The pickup is also at a distance of 4 cm from the string end. Fifteen measurements are carried out in each of the following cases: isolated string alone and four cases with the pickup in the vicinity of the mechanically isolated string. Two typical distances between the string at rest position and the corresponding pole piece of the pickup are investigated: 3 and 4 mm. These distances correspond to two normal settings for an electric guitar. For each of these distances, the pickup can be either plugged to an actuated guitar amplifier or not plugged at all (open-circuit). The Q factors of the fundamental frequency are identified with the ESPRIT method and plotted in Fig. 6.6. The recorded string polarizations are parallel and perpendicular to the pickup pole piece. For both polarizations of the transverse vibration and for all configurations of string and pickup, the Q factors take similar values, and stay in the same uncertainty range. The extra string damping due to a magnetic interaction with the present pickup is found to be negligible. The following of the article will therefore only consider the coupling of the string with the structure.

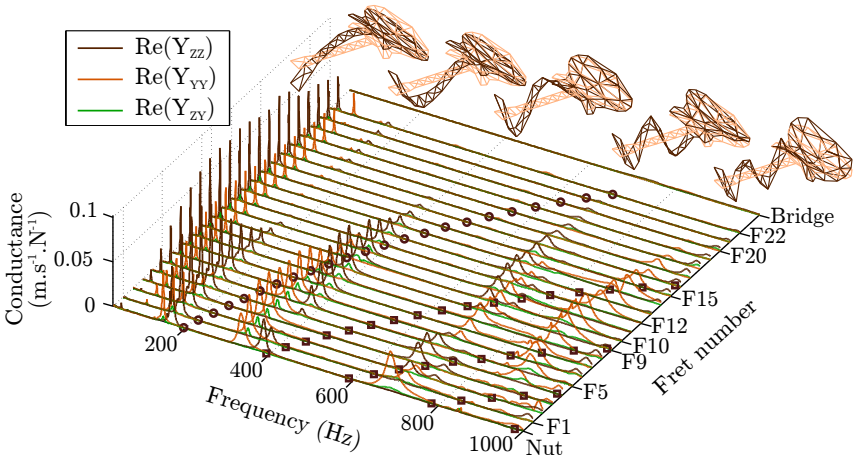


Figure 6.7: Out-of-plane (ZZ), in-plane (YY) and cross (ZY) conductance along the G3 string's axis: at every fret and at the bridge. For each fret, circle and squares denote the string's fundamental frequency and partials respectively, for the considered bandwidth. A modal analysis allows us to identify the modes for each out-of-plane conductance peak, above which the corresponding mode shapes are drawn.

6.4.2 Coupling the string with the structure

The interactions between the string and the structure can be described as shown in Fig. 6.3. Let the string end at $x = 0$ be attached to the bridge and that at $x = L$ be connected to the 2D-mobility Y representing the neck. Y can be written as

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{YY} & Y_{YZ} \\ Y_{ZY} & Y_{ZZ} \end{pmatrix} \tag{6.14}$$

where Y_{ij} is the ij-mobility defined as the ratio in the frequency domain between the velocity along the i-axis and the exciting force applied along the j-axis. According to the reciprocity principle, the non-diagonal terms Y_{ZY} and Y_{YZ} are assumed to be equal. Note that the terms involving the x-axis are neglected since they interact with the longitudinal waves in the string, which are neglected (see Sec. 6.2.2).

A classical frequency response measurement method is used to identify all terms of the matrix Y. They are measured at each fret along G3 string's axis. The specific shape of the "wrap-around" bridge does not allow to measure in-plane conductance with an accuracy as great as the out-of-plane conductance. However, Y_{YY} and Y_{ZY} measurements at the bridge are shown in Fig. 6.7 for comparison. The impulse force is applied by a *PCB Piezotronics 086C01* impact hammer while a *PCB Piezotronics 352C65* accelerometer provides the acceleration signal. The mass of the accelerometer is 2×10^{-3} kg, which is small compared to the total mass 3.4 kg of the guitar. The hammer force limits the bandwidth of the whole study to 1000 Hz. Care is taken to have the force application point and the measurement point as close as possible, guaranteeing a true driving-point measurement. Only the conductance (real part of the mobility) measurements are shown in Fig. 6.7. These measurements are carried out on the axis of symmetry of the guitar, where no contribution of the torsional modes is expected. The mechanical coupling phenomenon is just the same for the other strings, excepted that the presence of torsional modes increases the chance of coupling.

Figure 6.7 shows that the conductance at the bridge takes values up to 1.76×10^{-3} m.s^{-1}.N^{-1}. These values are small in comparison with the conductance values at the neck that can reach 1.02×10^{-1} m.s^{-1}.N^{-1} (which is in the same order of magnitude than the bridge admittance of classical guitars

[Fleischer & Zwicker 1998]). This high bridge impedance validates the assumption of a string connected at one end only (Sec. 6.2.2). Figure 6.7 also shows that the cross-mobilities Y_{ZY} and Y_{YZ} are small as well, so will be neglected. Accordingly, only the coupling with ZZ and YY conductances will be investigated. For purposes of physical interpretation, Fig. 6.7 gives the results of a modal analysis associating each out-of-plane conductance peak with a modal shape.

From the string's point of view, the only change to the model of Sec. 6.3 is the end condition at $x = L$. Calculations are detailed for a transverse polarization coupled to a generic mobility $\hat{Y}$ ($\hat{Y} = Y_{YY}$ or $\hat{Y} = Y_{ZZ}$).

The presence of a moving end can be satisfactorily described as small perturbation to the unperturbed wavenumbers [Valette 1995]:

$$k_{0,n} \rightarrow k_n = \frac{n\pi}{L} + \delta_n \tag{6.15}$$

where $\delta_n \ll 1$. For reasons of continuity, the string admittance must be equal to the structure mobility at the coupling point $x = L$:

$$\hat{Y}(L, \omega_{0,n}) = j\frac{tan((\frac{n\pi}{L} + \delta_n)L)}{Z_c} \tag{6.16}$$

where $Z_c = \sqrt{\rho_L T}$ is the characteristic impedance of the string.

Assuming that $Z_c\hat{Y}(L, \omega_n) \ll 1$ to ensure the reflection of travelling waves at the end of the string, Eq. (6.16) leads to the expression of k_n:

$$k_n = \frac{n\pi}{L} - j\frac{\hat{Y}(L, \omega_{0,n})Z_c}{L} \tag{6.17}$$

with which Eq. (6.6) with isolated string damping of Eq. (6.8) becomes:

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L}\left[1 + \frac{j}{2Q_{0,n}} - j\frac{\hat{Y}(L, \omega_{0,n})Z_c}{n\pi}\right] \tag{6.18}$$

The perturbed modal frequencies are the real parts of the ω_n, divided by a factor 2π:

$$f_n = \frac{nc}{2L}\left[1 + \frac{n^2\pi^2}{L^2}\frac{EI}{2T} + \frac{Z_c}{n\pi}\,\mathrm{Im}(\hat{Y}(L, \omega_{0,n}))\right] \tag{6.19}$$

while the perturbed Q factors are linked to the imaginary part of the ω_n:

$$Q_n^{-1} = Q_{0,n}^{-1} + \frac{c^2\rho_L}{\pi L}\,\mathrm{Re}(\hat{Y}(L, \omega_n))\frac{1}{f_n} \tag{6.20}$$

Depending on the polarization of interest, f_n and Q_n values for z and y polarization are obtained by replacing $\hat{Y}$ by Y_{ZZ} or Y_{YY} respectively. It is checked that the imaginary part of the mobility is small enough to induce a very minor change in the modal frequencies. The two polarizations of the string mounted on the guitar will then have very slightly differing frequencies. Depending on the conductance, the two polarizations may significantly differ in terms of modal damping.

An illustration of the coupling described by Eq. (6.20) is given with two examples. Two coincidences between string and structure modes can be seen in Fig. 6.7 and magnified in Fig. 6.8: $\mathrm{Re}(Y_{YY})$ conductance takes a high value at 9th fret for the fundamental frequency of the note which is played at this place. The same happens to $\mathrm{Re}(Y_{ZZ})$ at 12th fret for the fundamental frequency of the corresponding note.

In order to experimentally measure the mounted-string Q factors for these two examples, the string is stretched at playing tension between the bridge and the nut of the guitar. Excitation and displacement measurement remain the same as in Sec. 6.3.2. Measurements with a capo at 9th and 12th frets are carried out. For both polarizations, the Q factors for the fundamental frequency of the mounted string

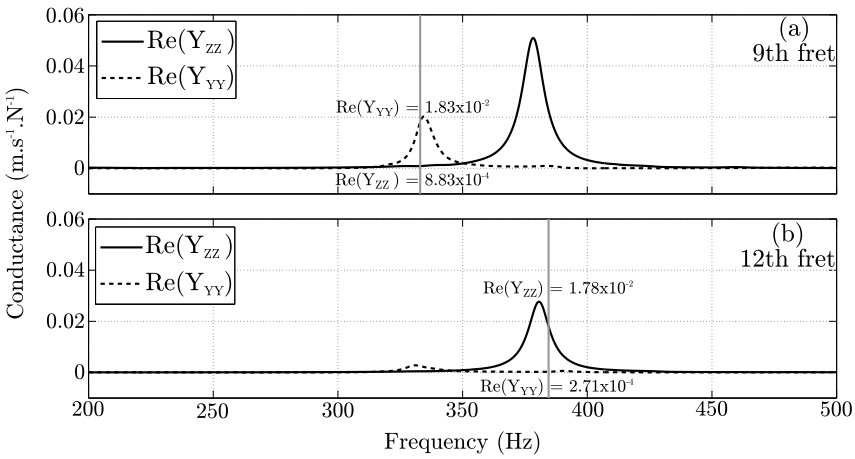


Figure 6.8: Measured conductance at 9th fret (a) and 12th fret (b) along G3 string's axis. Solid line indicates out-of-plane conductance. Dashed line indicates in-plane condutance. The transverse gray line shows the fundamental frequency of the note produced on the G3 string at the corresponding fret. For this frequency, conductance values are given in $m.s^{-1}.N^{-1}$.

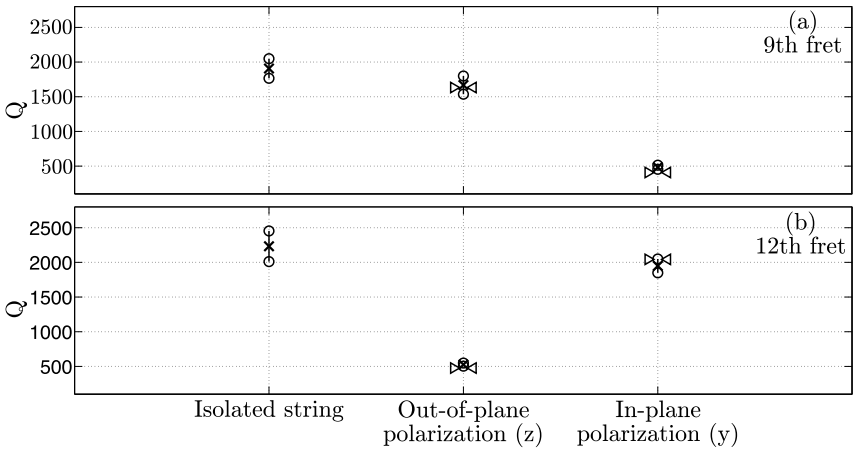


Figure 6.9: Identified Q factor for the fundamental frequency of the note played at 9th fret (a) and 12th fret (b) of the G3 string. Both polarizations' results for the mounted string are compared to the isolated string. Circles and crosses indicate mean values and expanded uncertainty (95% confidence interval) respectively of 15 measurements. The arrows point out the Q value computed by the model of equation 6.20 with the isolated-string Q factors and the conductance values.

signals are identified. In Fig. 6.9 they are compared to the corresponding measured Q factors of the isolated string. The Q values computed from the model of Eq. (6.20) with the string characteristics of table 6.1, the measured string-alone Q values and neck conductances are also presented in Fig. 6.9. As Fig. 6.9 shows, a good agreement between the experimentally-measured Q factors and the model-computed Q factors is found. The coupling model is found to give a good quantitative prediction of the Q factors for every note. Note that the influence of the structure has only been evaluated in free conditions (the guitar lying on straps supported by a frame). In playing conditions, it is expected that the left hand as well as the right arm and the stomach provide some additional damping to the guitar modes. Such damping may lower the conductance value at the resonance frequency. As a consequence, at this very frequency string/structure coupling effects might be slightly different and the dead spots could be less disturbing in playing conditions.

6.4.3 The pickup and the string polarizations

The previous section dealt with the coupling of both polarizations of the transverse string vibration. This section investigates the behavior of the pickup towards these two polarizations.

6.4.3.1 Pickup's sensitivity to both polarizations

Jungmann [Jungmann 1994] indicates that the output signal of the magnetic pickup of the electric guitar is mainly made up of the out-of-plane polarization. Horton and Moore [Horton & Moore 2009] included this phenomenon in a pickup model. In order to have an experimental evidence of this phenomenon for the pickup of this study, a comparison of the pickup and optical sensors' signals is carried out. As in Sec. 6.4.1, the string and the pickup are separated from the guitar. This time, the wire-breaking method is used for the excitation along each transverse axis successively. For each excitation, vibrations in each polarization as well as the output of the pickup are recorded. Since the magnetic pickup is sensitive to the velocity of the string [Horton & Moore 2009], the velocity of each polarization is computed from the optical displacement measurements. Typical results from a series of twenty measurements are shown in Fig. 6.10. The polarization perpendicular to the excitation has at least a 10 times smaller energy, defined as $E = \int_0^{+\infty} |x(t)|^2 dt$. It confirms the validity of the wire-breaking method: one polarization gets excited a lot more than the other, so the polarizations can be studied separately. The 20 measurements all exhibit the same pickup behavior: the waveshape of the pickup signal is a lot more similar to the waveshape of the z string polarization than it is to the y string polarization. Figure 6.10 tends to show that the "preferred" string polarization with respect to the pickup behavior is the out-of-plane one.

6.4.3.2 Pickup's output signal content in playing conditions

In order to show that the pickup is more sensitive to the z polarization of the string vibration, the recordings of the G3 string notes of Sec. 6.2.2 are used. The plucking is typical of a normal playing plucking, that is a combination of y and z excitation. The ESPRIT method is expected to identify two components in the output signal of the pickup: a high- and a low-amplitude component corresponding to the z- and y- polarization respectively. Figure 6.11 shows the identified Q factors for the both polarizations of the fundamental frequency of every note of the G3 string. The dead spots at 9th fret (y- polarization) and 12th fret (z- polarization) are undoubtedly identified, and are the only dead spots along this string, as it can be expected from Fig. 6.7. In Fig. 6.11, the circles' radii are proportional to the amplitude of the both polarizations, normalized to the amplitude of the z- polarization.The series of identified components that takes a low Q-value at 12th fret consistently has a much larger amplitude than the series that takes a low Q-value at 9th fret. The high- and low-amplitude components are then confirmed to be associated

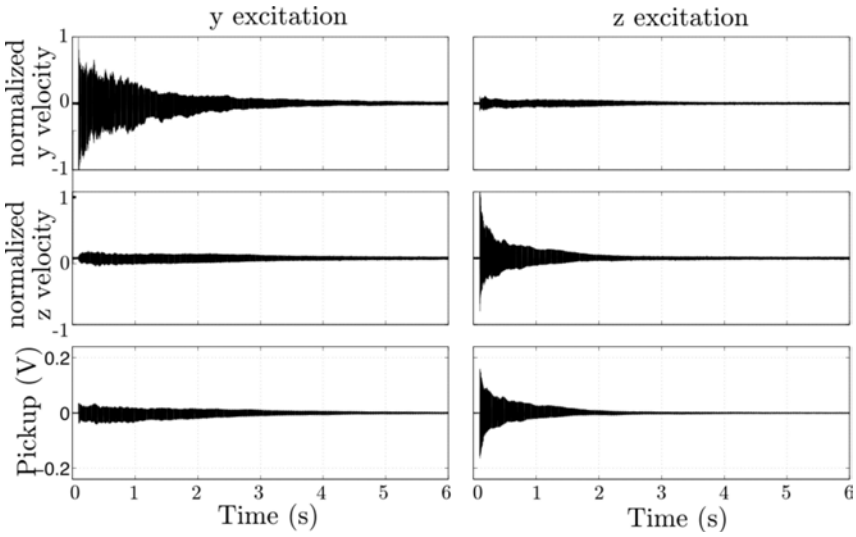


Figure 6.10: String excited by the wire-breaking method, isolated from the guitar, at the vicinity of a pickup. The pickup is set so that the pole pieces are parallel to the z- axis. For in-plane (y, left column) and out-of-plane (z, right column) excitation, corresponding waveshapes of in-plane (y, upper row) and out-of-plane (z, lower row) string polarization recorded by the optical sensors as well as the output of the pickup (lower row) are plotted. String velocity waveshapes are normalized to the maximum value of the excitation polarization.

with out-of-plane and in-plane string polarization respectively. The pickup of this study is more sensitive to the z polarization than to the y one.

This polarization-dependent sensitivity of the pickup tempers the unwanted nature of dead spots: an abnormal damping for the y- polarization is likely to disturb the guitarist when he plays the unplugged guitar, but the y- polarization is almost not transduced by the pickup, so when the guitar is plugged the dead spot is not heard in the amplified sound.

6.5 Accurate prediction of the decay time

This section proposes a comparison between measured and synthesized decay times. The first is computed from real guitar signal recordings. The second is computed from synthesized signals based on experimental data obtained on the isolated string and on the structure.

On the one hand, the decay time is computed from recordings. Once again, the output of the pickup is recorded. The notes of the third string are plucked with a pick by the experienced player and fingered by a capo for frets 1 to 15 and by the left-hand middle finger for frets 16 to 22. For each note, let $s_{pick}(t)$ be the output signal of the pickup, lowpass-filtered with a cutoff frequency at 1000 Hz. The energy decay curve (EDC) is derived with the backward integration method [Schroeder 1965]:

$$EDC(t) = \int_t^T s_{pick}^2(\tau)d\tau \tag{6.21}$$

where T is the total length of the signal. In practice, the EDC is computed where the exponential sinusoid model is valid, typically from two seconds after the start of the signal to the end of the signal. A linear regression of the EDC is computed, from which the decay time T30 is calculated. This corresponds to the time needed by the EDC to decrease by an amount of 30 dB from its maximum level. This gives the

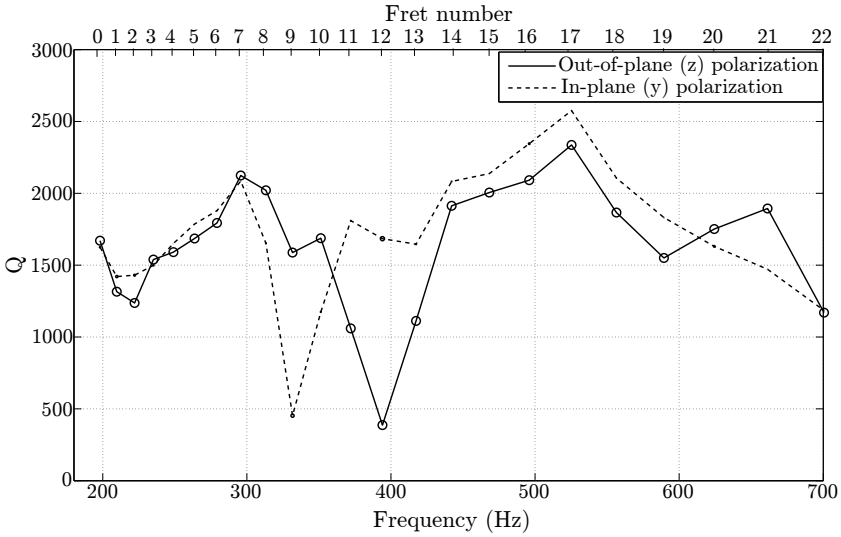


Figure 6.11: Identified Q values associated with the fundamental frequency of both string polarizations. The analyzed signal is the output of the pickup, for each note played on the G3 string mounted on the guitar. Solid line is for the out-of-plane (z) polarization and dashed line for the in-plane (y) polarization. For each fret, circles' radii indicate the amplitude of the polarizations, normalized to the amplitude of the z- polarization.

"experimental T30".

On the other hand, a synthesis is computed starting from equation 6.7. Only the z-polarization is taken into account in the synthesis. The f_n are the flexible string frequencies and are in a harmonic relationship with a known fundamental frequency. The upper limit of the bandwidth is 1000 Hz. All components below this limit are taken into account. N denotes the number of components in the bandwidth. The ϕ_n are randomly generated (T30 results are very similar for $\phi_n = 0$ for all n). The a_n are set to a theoretical value for a string with a triangle initial displacement and a null initial velocity [Fletcher 1976]. Denoting h the initial plucking height, $x_p = 4$ cm the plucking point and $x_m = 12$ cm the measurement point, the synthesized velocity signal is:

$$s_{syn}(t) = A_{vel} \sum_{n=1}^{N} \frac{sin(k_n x_p) sin(k_n x_m) sin(2\pi f_n t)}{n} e^{-\frac{\pi f_n}{Q_n} t} \tag{6.22}$$

where $A_{vel} = \frac{-2hLc}{\pi x_p (L - x_p)}$ and Q_n are the results of Eq. (6.20), a combination of isolated string damping and damping via coupling with the structure. If the measured signal $s_{pick}(t)$ and the synthesized signal $s_{syn}(t)$ are normalized to their respective maximum value, the term A_{vel} in Eq. (6.22) can be set to 1. A linear regression of equation 6.21 with s_{syn} instead of s_{pick} gives the "synthesized T30".

Figure 6.12 shows the experimental and synthesized T30 for each note of the G3 string. A good agreement is found between the T30 from the pickup's output signal and the T30 from the synthesis. A slight difference between the two T30 can be seen at some frets. This difference nonetheless never exceeds 0.6 s, which is small in comparison with the more-than-2-s gap observed between the dead spot at fret 12 and its neighbors. Note that for fret 12 the string and structure frequencies do not exactly coincide (see Fig. 6.8) so the difference in boundary conditions (free conditions for the structure investigation, playing conditions for the note recording) do not affect a lot the T30. In conclusion the trends in the experimental T30 curve shape are well identified by the synthesis: dead spots are found and definitely predicted.

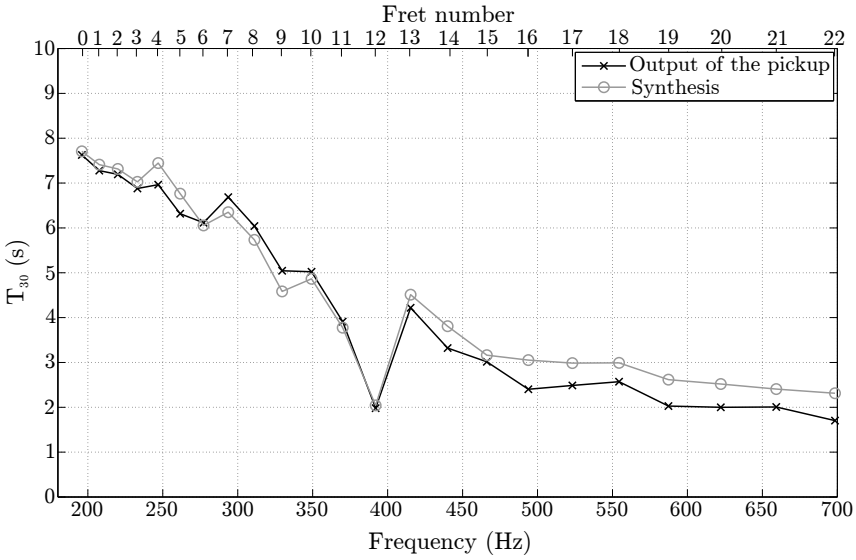


Figure 6.12: T30 for each fret of the G3 string. Gray circles indicate T30 values computed from the synthesized signal. Black crosses indicate T30 values computed directly from the output signal of the pickup.

6.6 Conclusion and perspectives

In this article a series of assumptions and simplifications that are usually made for the mechanical study of the electric guitar is checked theoretically and experimentally. Considering only the out-of-plane polarization of the string connected to its end on the neck's side to an out-of-plane mobility is shown to be a good approximation of the mechanical interactions in the electric guitar. This simple model gives quantitative predictions that fit well the measurements. The knowledge of the isolated string Q factors and the vibrational behavior of the structure is sufficient to accurately estimate the decay time of the final signal, which is the output of the pickup. Indeed the pickup has been shown to not have a measurable influence on the decay time.

The design of a predictive tool for dead spots and timbral unevenness is then readily possible. Most of the information that predicts the decay time is contained only in the isolated string Q factors and in the conductance values on the neck. Given an electric guitar string, isolated string Q factors are only to be measured once. As for the conductance values of the neck, it is a very time-consuming task to carry out all the measurements. Finite-element modeling is an alternative to get this whole conductance data. Provided the geometry of the instrument, the material constants (Young's moduli, density, ...) identified on wood samples, and a single mobility measurement giving the modal dampings (conductance peak heights) of the structure, all the conductance values needed can be obtained. The use of a numerical model readjusted with some measurements could be of great help in an industrial context of solid body electric guitar manufacturing.

Results are given here for one string. The coupling of the other strings with the guitar is described in an identical way. A database giving the Q factors for other strings (diameters, materials, wound or flat string...) would be extremely valuable.

It is experimentally shown that the pickup converts mainly the out-of-plane string polarization. A pickup model giving the transfer function between the 2D-string velocity and the ouput voltage of the pickup may confirm the experimental data presented here.

This paper investigated the decay part of electric guitar tones. A precious counterpart of this study

would be a focus upon the attack part of the tones. In this study the linear model is valid. However the electric guitar playing techniques can sometimes lead to non-linear string vibration: the string amplitudes resulting from tough pick strokes can exceed the small values needed for a linear description of the vibration. Other slight non-linear phenomena can also result from end conditions when taking into account the shape of the bridge and frets, or the friction between the string and the fret. This will be the purpose of further studies.

Acknowledgements

The authors thank the luthiers Vincent Charrier, Loïc Keranforn, Lisa Marchand, Bela Pari, Alexandre Paul, Julien Simon, who built and lent the guitars for the present study, as well as their instructors Yann-David Esmans, Fred Pons and Pierre Terrien. Thanks also to Vincent Doutaut. Thanks to Benoît Navarret and Rémi Blandin for all the helpful discussions.

Chapitre 7

Ebony vs rosewood : experimental investigation about the influence of the fingerboard on the sound of a solid body electric guitar [1]

ABSTRACT

Beyond electronics, lutherie also has something to do with the sound of the solid body electric guitar. The basis of its sound is indeed the conversion of the string vibration to an electrical signal. The string vibration is altered by coupling with the guitar at the neck. Electric guitar lutherie being a huge topic, this paper focuses on the influence of the fingerboard on the string vibration. An experimental study is carried out on two guitars whose only intentional difference is the fingerboard wood: ebony or rosewood. The well-known "dead spot" phenomenon is observed, where a frequency coincidence of string and structure at the coupling point leads to an abnormal damping of the note. Striking is the different behaviour of each fingerboard wood about dead spots: affected notes, as well as how much they are affected, differ with the wood.

1. Ce chapitre est présenté sous la forme d'un article qui a été publié dans les actes de la *Stockholm music acoustics conference (SMAC) 2013* sous le titre « *Ebony vs rosewood : experimental investigation about the influence of the fingerboard on the sound of a solid body electric guitar* » [Paté *et al.* 2013]

7.1 Introduction

Physical studies about the solid body (without soundbox) electric guitar have been mainly focused on electronics, whether it is on the string transduction by the pickup [Queen 1966; Horton & Moore 2009], the effects and processing chain [Kröning *et al.* 2011] or the amplifier [Cohen & Hélie 2010], often with the purpose of doing numerical synthesis. The characteristics of the pickup (transducing the velocity of the string into an electrical signal), effect pedals (transforming this signal with endless possibilities), amplifier (far away from high-fidelity), loudspeakers (reproducing and distorting the final sound) are of course of significant importance. But lutherie is at least partially responsible for the sound. The vibration of the string is altered by the coupling to a moving structure (the guitar) at its ends. The structure may vibrate and exchange energy with the string, like it is the case for e.g. the classical guitar [Lambourg & Chaigne 1993] or the harpsichord [Fletcher 1977].

The coupling of a string to a structure is described in [Valette 1995]. The admittance of the structure at the coupling point causes the frequencies and dampings of the coupled-string partials to differ from those in the uncoupled case (string with two rigid ends). This admittance at the coupling point is known as the "driving-point admittance". It is defined by the ratio in the frequency domain between the velocity $V(\omega)$ of the structure at the coupling-point and the force $F(\omega)$ applied on the same point. Driving-point admittance can be obtained by classical measurements on relevant coupling points between the string and the structure, typically on the neck [Fleischer & Zwicker 1998 1999]. The real part of this driving-point admittance is called the driving-point conductance. It provides additionnal damping to the string [Valette 1995]. Measurements in [Fleischer & Zwicker 1999] qualitatively link a measured high conductance value at a specific frequency with the fast decay of the note at the same frequency, when fretting point and measurement point are the same. Notes affected by an abnormally big damping are known as "dead spots". Damping inhomogeneity among notes is known to be disturbing for the players.

The vibrational behaviour of the structure, seen by the string as end conditions, is influenced by many parameters. Electric guitars can differ in many things [Paté *et al.* 2012a]: shape of the body and headstock, wood used for body, fingerboard or neck, bridge type, nut material, size and material of the frets, neck profile... Each of these lutherie parts changes the vibrational behaviour of the structure and then may alter the sound.

Fleischer and Zwicker [Fleischer & Zwicker 1998] studied a *Gibson Les Paul* and a *Fender Stratocaster*, which have been the two reference models in the electric guitar industry [Paté *et al.* 2012a]. Differences in modal behaviour are found and are attributed to the symmetry of the headstock. However, these two guitars differ not only in the headstock shape, but also in the wood species, the body shape, ...

In order to draw conclusions about the influence of a lutherie parameter, this parameter should be the only varying one. This paper is part of a broader project [Le Carrou *et al.* 2010; Paté *et al.* 2012b] aiming at studying the influence of each lutherie parameter taken separately. Here the spotlight is on the study of the fingerboard wood on the sound. An experimental investigation of ebony and rosewood fingerboards is presented. These are two out of three (the other one being maple) typical woods used for solid body fingerboards.

Section 7.2 gives a simple model of string-structure coupling and its consequences on string frequency and damping. Section 7.3 describes the experimental protocol, and quantitatively checks the model of section 7.2: the string damping value can be predicted from the conductance value. Section 7.4 discusses the change in sound induced by the change in fingerboard wood.

7.2 Model

A simple model of a stiff lossy string connected at one end to a moving body is proposed. The moving-end string model is derived as small perturbations of the stiff string model simply-supported at its two ends. The theory has already been detailed by [Valette 1995] and it is briefly described here.

Let x be the axis of the string at rest position and y its motion normal to the fingerboard plane. The string is simply-supported at $x = 0$ and $x = L$. It is stretched with tension T. The string is also characterised by its mass per unit length ρ_L, second moment of area I and Young's Modulus E. The dispersion relation is:

$$\omega_n^0 = ck_n^0 \left(1 + (k_n^0)^2 \frac{EI}{2T}\right) \tag{7.1}$$

where $c = \sqrt{\frac{T}{\rho_L}}$ is the wave velocity, $\kappa = \sqrt{\frac{T}{EI}}$ is the stiffness term and $k_n^0 = \frac{n\pi}{L}$ is the quantized (n is a positive integer) wavenumber for simply-supported end conditions.

The string loses energy through three damping mechanisms: visco-elasticity, thermo-elasticity and air damping. Let ξ_n^0 be a damping coefficient taking into account those three damping mechanisms. It is frequency-dependent because it depends on the partial number n. The damping ξ_n^0 is generally added as the imaginary part of the complex angular frequency, so that the dispersion relation becomes:

$$\omega_n^0 = ck_n^0 \left(1 + (k_n^0)^2 \frac{EI}{2T} - 2j\xi_n^0\right) \tag{7.2}$$

Yet the string is not simply-supported at its ends. One end is connected to the bridge and the other end is connected at the neck to a fret or to the nut. What [Fleischer & Zwicker 1998 1999] showed was checked: most of the time the motion of the end connected to the bridge is small compared to the motion of the end connected to the neck. The bridge end (at $x = 0$) is still assumed to be rigid whereas the other end (at $x = L$) is connected at the neck to the admittance of the moving guitar. The moving end at $x = L$ only causes small perturbation $\delta k_n \ll 1$ to the wavenumber k_n^0, so that the corrected wavenumbers $k_n = k_n^0 + \delta k_n$ are used.

At $x = L$, the string's admittance is defined as the ratio between its velocity and the force being applied on it:

$$Y_{string}(L, \omega_n) = \frac{\frac{\partial y}{\partial t}(L,t)}{-T\frac{\partial y}{\partial x}(L,t)} = j\frac{tan(k_n L)}{Z_c} \tag{7.3}$$

where $Z_c = \sqrt{\rho_L T}$ is the characteristic impedance of the string. At $x = L$, the string and the structure are connected and must have the same admittance. Letting $Y(L, \omega)$ be the admittance of the structure at the connection point, one has :

$$Y(L, \omega) = Y_{string}(L, \omega) \tag{7.4}$$

Remembering that $tan(k_n^0 L) = 0$ [2] and assuming that $Z_c Y(L, \omega_n) \ll 1$ [3], equation 7.3 leads to the expression of k_n:

$$k_n = k_n^0 + \delta k_n = \frac{n\pi}{L} - j\frac{Y(L, \omega_n) Z_c}{L} \tag{7.5}$$

with which equation 7.1 becomes:

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L}\left[1 + \frac{n^2\pi^2 EI}{2TL^2} - 2j\xi_n^0 - j\frac{Y(L, \omega_n) Z_c}{n\pi}\right] \tag{7.6}$$

2. k_n^0 is the the simply-supported end solution for the wavenumber

3. The impedance of the structure is much greater than the characteristic impedance of the string, resulting in a reflection of travelling waves in the string at the connection point

ω_n are the complex angular frequencies of a stiff lossy string having a moving end. Modal frequency is defined as :

$$f_n = \frac{\mathrm{Re}(\omega_n)}{2\pi} = \frac{nc}{2L}\left[1 + \frac{n^2\pi^2}{L^2}\frac{EI}{2T} + \frac{Z_c}{n\pi}\,\mathrm{Im}(Y(L,\omega_n))\right] \tag{7.7}$$

and modal damping as:

$$\xi_n = \frac{-\mathrm{Im}(\omega_n)}{2k_n c} = \xi_n^0 + \frac{Z_c}{2n\pi}\,\mathrm{Re}(Y(L,\omega_n)) \tag{7.8}$$

The imaginary part of the body admittance implies a shift in the simply-supported string frequencies, affecting the inharmonicity [Gough 1983]. Nevertheless, measured admittance imaginary parts on the tested guitars never lead to a frequency shift larger than 1Hz. For this reason this paper only discusses the influence of the real part of the admittance, the conductance.

7.3 Experimental study

The main effect of string-structure coupling is the damping due to the conductance. The experimental study identifies the conductance terms $C(\omega) = \mathrm{Re}(Y(\omega))$ at the points where the strings couple to the structure [4], that is on the fingerboard.

7.3.1 The two guitars of the study

This experimental study is intended to determine what differs in the sound when changing the fingerboard wood. The fingerboard should therefore be the only varying lutherie parameter. In order to fulfil this recommendation, a collaboration with instrument-makers was developped. Two guitars were made by luthiers from Itemm [5], a french leading lutherie training-center. The two guitars follow the specifications of the *Gibson Les Paul Junior DC*, a version of one of the two most important solid body electric guitars in history [Paté *et al.* 2012a]: original shape, quartersawn mahogany for body, neck and head, set-in neck, same equipment (bridge, bone nut, *P-90* pickup). The only intentional difference between the two guitars is the fingerboard wood. One guitar has an ebony fingerboard (E) and the other one a rosewood fingerboard (R). It should be kept in mind that other parameters may differ between the two guitars, mainly because of the wood variability and the handmade process. For schedule reasons, the guitars could not be measured prior to the gluing of the fingerboard. Samples of the woods used for the fingerboards were provided. Ebony density ρ_E =1180kg.m^{-1} and rosewood density ρ_R =751kg.m^{-1} are simply measured. Longitudinal Young's moduli $E_E = 3.02 \times 10^{10}$Pa and $E_R = 2.30 \times 10^{10}$Pa are identified with simple bending test. The two fingerboard woods have different characteristics: fitting the neck with one or another fingerboard wood may then change the vibrational behaviour of the instrument.

7.3.2 Experimental setup

The experimental setup is sketched in figure 7.1. The conductance is measured at every potential coupling point between string and structure, that is at every fret-string crossing on the neck. As in [Fleischer & Zwicker 1999], only the conductance normal to the plane of the fingerboard is studied. Only the coupling of the string polarisation in this direction is studied in this paper. As usual, force $F(\omega)$ is applied with an impact hammer equipped with a force sensor, and velocity $V(\omega)$ is measured with an accelerometer. Impact and measurement points must be as close as possible in order to obtain actual

4. Measurements of this section are made at the connected end of the string, so the dependence in L of $Y(L,\omega)$ is no longer specified.

5. http://www.itemm.fr

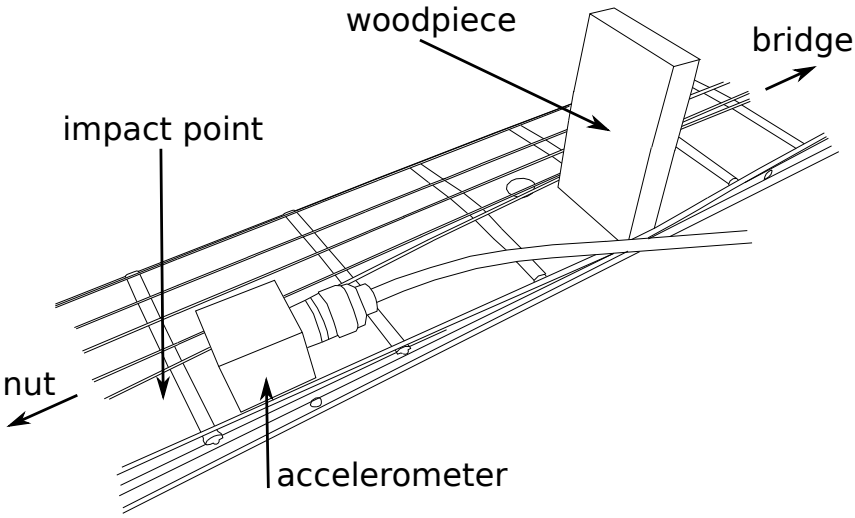


Figure 7.1: Setup for driving-point conductance measurement along the 5th string's axis, at a particular fret. An accelerometer is put on the one side of the fret. The hammer strikes at the other side of the fret. A very light piece of wood moves aside the strings and allows the accelerometer to stay between the two strings.

driving-point conductance. The modal domain (where peaks and modes are well identified) is from 20Hz to 700Hz. The useful impact bandwidth is from 20Hz to 2000Hz. It is decided to consider the coupling of only the fundamental frequency with the structure, so that $n = 1$ in all equations of the section 7.2. The guitar is laid on elastic straps supported by a frame. Resonant frequencies of the system {frame-straps} is below the resonant frequencies of the guitars, so that this setup provides a good approximation for free boundary conditions. Modeling clay is put on the pegs and on the screw of the truss rod to prevent them from vibrating. Paper is used to avoid string vibrations, which are unwanted here for the study of the guitar only.

Section 7.3.3 experimentally checks the model of section 7.2.

7.3.3 Validation of the model

In order to validate the model of section 7.2, a simple check is done. Figure 7.2 is an example (further discussed in section 7.3.4) of measured driving-point conductance: here at the 6th fret along the 2nd string for both guitars. The corresponding note is F4 with fundamental frequency $\mathrm{f}_{F4} = 349$Hz. This note is also recorded by picking the string with a guitar pick, fretting the 6th fret with a capo and taking the output signal of the guitar pickup. Figure 7.3 shows the temporal evolution of the fundamental of this note. This temporal evolution is extracted from the recorded signal. It is obtained by computing a short-time Fourier transform of the signal and determining the envelope of the bin centered on the fundamental frequency. The time constant τ, defined as the time needed for the amplitude to get divided by Euler's number e, can be estimated from the fundamental envelope signals for guitars E and R. The estimation of the global damping terms $\xi^E_{F4} = (2\pi f_{F4}\tau^E_{F4})^{-1} = 2.8 \times 10^{-4}$ and $\xi^R_{F4} = (2\pi f_{F4}\tau^R_{F4})^{-1} = 1.4 \times 10^{-3}$ is straightforward. Superscripts "R" and "E" refer to guitar R and E respectively. Subscript refers to the note.

Identical string sets provided the string for both guitars. String damping ξ^0_{F4} is then assumed to be the same for both guitars. The magnetic pickup could be a cause of string damping as well. Since the guitars are equipped with pickups of the same model series, the magnetic damping is assumed to be the same for both guitars. This magnetic damping can be included in ξ^0_{F4}. According to equation 7.8 with

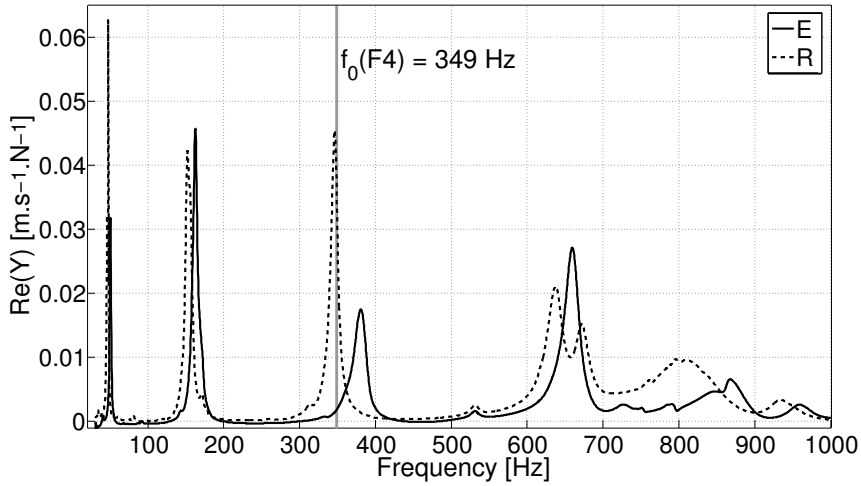


Figure 7.2: Driving-point conductance at the 6th fret along the 2nd string's axis. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R. Gray line highlights the fundamental frequency of the F4 played at this place.

$C(\omega) = \mathrm{Re}(Y(\omega))$, one expects :

$$\xi_{F4}^{R} - \xi_{F4}^{E} = \frac{Z_c}{2\pi}\left[C^R(2\pi f_{F4}) - C^E(2\pi f_{F4})\right] \tag{7.9}$$

Estimating the conductance values from measurements presented in figure 7.2 ($C^E(2\pi f_{F4}) = 1.9 \times 10^{-3}\mathrm{m.s^{-1}.N^{-1}}$ and $C^R(2\pi f_{F4}) = 3.2 \times 10^{-2}\mathrm{m.s^{-1}.N^{-1}}$) leads to:

$$\begin{aligned} \xi_{F4}^{R} - \xi_{F4}^{E} &= 1.1 \times 10^{-3} \\ \frac{Z_c}{2\pi}\left[C^R(2\pi f_{F4}) - C^E(2\pi f_{F4})\right] &= 1.0 \times 10^{-3} \end{aligned} \tag{7.10}$$

ξ_{F4}^{0} can be identified by subtracting the term $\frac{Z_c}{2\pi}C(2\pi f_{F4})$ from the experimental ξ_{F4}. The line with crosses in figure 7.3 is the decay curve with identified $\xi_{F4}^{0} = 2.3 \times 10^{-4}$.

The small difference between the two lines of equation 7.10 can be explained by our estimation of τ, and by the accuracy of our measurements. Nevertheless, the two values are quite close and the model of section 7.2 is validated.

7.3.4 Observation of dead spots

Figure 7.2 shows that at the fundamental frequency of the note, the conductance takes a low value for the guitar E. Thus the factor $\mathrm{Re}(Y)$ in equation 7.8 is small and so should be the string damping due to coupling with support. This is checked in figure 7.3 and in the calculations of section 7.3.3: the experimental computed decay is close to the intrinsic decay (i.e. the rigid-ends case). On the other hand, figure 7.2 shows a high conductance value for the guitar R. Figure 7.3 and calculations of section 7.3.3 confirm the "abnormal" damping of the fundamental. This damping is indeed higher for the guitar R, and the decay curve exhibits two slopes instead of the single slope decay for "normal" cases.

These two phenomena are consistently checked on the two guitars: a low conductance value leaves the note's decay unperturbed (live spot), a high conductance value makes the decay of the note shorter (dead spot).

When looking at other notes, it is found that both fingerboards exhibit dead spots. However, the note studied in this section showed a difference between the two fingerboard woods: for the same note

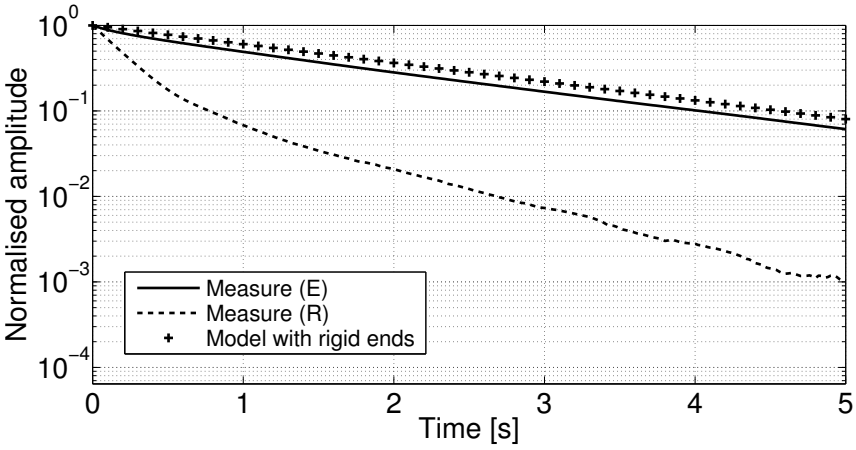


Figure 7.3: Temporal evolution of the fundamental frequency of the F4 (6th fret and 2nd string) played on both guitars. Solid line is for guitar E, dashed line is for guitar R, crosses show the computed decay of the same string with rigid ends.

at the same place on the neck, a guitar exhibited a live spot whereas the other exhibited a dead spot. Section 7.4 deals with the differences in sound that may appear between the two guitars.

7.4 Sound differences between the two fingerboards

The two fingerboard woods lead to the same dead/live spot phenomenon. However, it does not break out the same way depending on the instrument.

7.4.1 Dead spot location

Section 7.3.4 indicates that a difference between the two guitars is the places where dead spots occur. Since the representation of figure 7.2 is hard to handle if one wants to have an overview of every fret of one string, figures 7.4 and 7.5 propose a synthetic view of the string-structure frequency coincidences, a "dead spot map". The frequency-dependant driving-point conductance values at every fret along one string are represented on the same plot. Conductance value is transcribed as a continuous color coding from blue (very low conductance) to red (conductance peak). For each fret, the fundamental frequency of the note is plotted with a white cross. Hence, whenever a white cross gets close enough to a red spot, a dead spot is reached. Figures 7.4 and 7.5 can be used to quantify the number of dead spots of a guitar. Here on the 2nd string, the rosewood-fingerboard guitar has one dead spot (6th fret) and none at any other place. "Corresponding" dead spot for the guitar E is moved to the 7th and 8th frets. A first remark can be done, when looking at the "dead spot maps" for all six strings (five are not showed in this paper): the number of dead spots is roughly the same between the two guitars, but their locations often slightly (one or two frets) differ.

A second remark is that the conductance peaks (for example figures 7.4 and 7.5 around 400Hz and between 600Hz and 700Hz) seem to be higher for the guitar R than for the guitar E. This is the purpose of section 7.4.2.

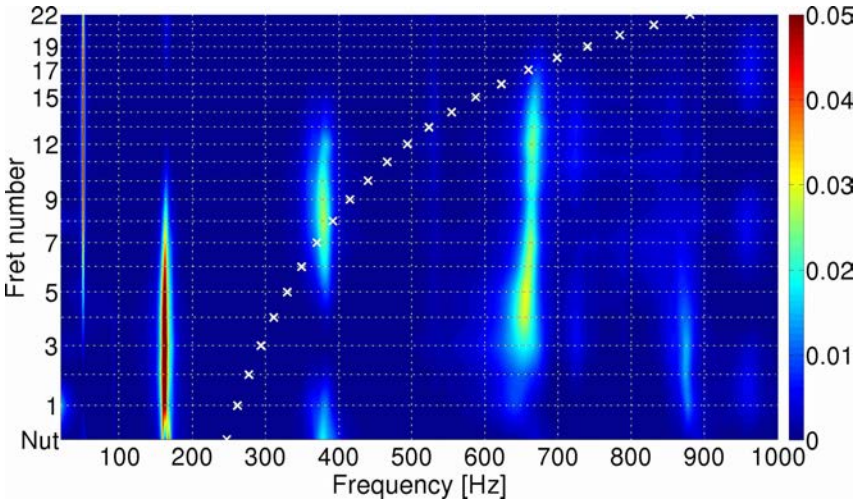


Figure 7.4: Guitar E: driving-point conductance values in the frequency range [20Hz–1000Hz] for all frets along the 2nd string. White crosses spot the fundamental frequencies of the notes played at each fret of the 2nd string. Unit of conductance is $m.s^{-1}.N^{-1}$.

7.4.2 Dead spot dangerousness [6]

Another kind of difference between the two fingerboard woods is the amplitude of conductance peaks, that is the potentially high damping of the note. That is what we call the "dangerousness" of a dead spot. Most of the measurements show that higher values of driving-point conductance are reached for the rosewood-fingerboard guitar. Figure 7.6 illustrates this tendency. It shows the measurement at 1st fret along the 4th string for both guitars. The conductance at the frequency of the note (D#3,155Hz [7]) is high for both guitars. Estimation of experimental damping coefficient ξ as in section 7.3.3 leads to $\xi^E_{D\#3} = 1.0$ 10^{-3} and $\xi^R_{D\#3} = 2.4$ 10^{-3} in this case. $\xi^0_{D\#3}$ is estimated as in section 7.3.3: $\xi^0_{D\#3} = 3.0$ 10^{-4}. For both guitars, $\xi_{D\#3}$ is much higher than $\xi^0_{D\#3}$: this clearly reveals a common dead spot. However, the dead spot is more pronounced for the guitar R than for the guitar E. Guitar R's conductance peak is closer to the frequency of the note than guitar E's one, and guitar R also has a higher peak guitar E's one.

Whatever the tuning (determining the frequencies of the notes) is, the string-structure coupling still occurs because the neck conductance still takes non-zero values. In order to characterise this conductance amplitude difference tendency between guitars E and R in a more tuning-independent way, a mean conductance value is computed. For each measurement (each fret) along a string, the mean of the conductance is computed in the frequency range [20Hz–2000Hz]. Figure 7.7 presents these computed mean conductance values as a function of the place on the neck along the 2nd string. For every fret the guitar R clearly stands out from the guitar E with systematically higher mean conductance. This would mean that whatever the tuning is, the rosewood-fingerboard guitar is likely to grasp more vibrating energy from the string. In figure 7.7 it can be seen that above 15th fret, the two curves become closer and the mean conductance tends to become smaller. This is because 15th fret and upper frets are close to the neck-body junction, an area where the neck motion is smaller.

These mean conductances can be linked to the computed time constants τ for each note along the 2nd string showed in figure 7.8. This computation is slightly different from section 7.3.3: a bandpass-filter (20Hz to 2000Hz) is applied to the pickup signal and τ is computed from this filtered signal. Guitar

6. L'annexe G présente une généralisation à six guitares des résultats sur la conductance moyenne obtenus ici sur les deux guitares E et R.

7. C'est un ré#2 en français

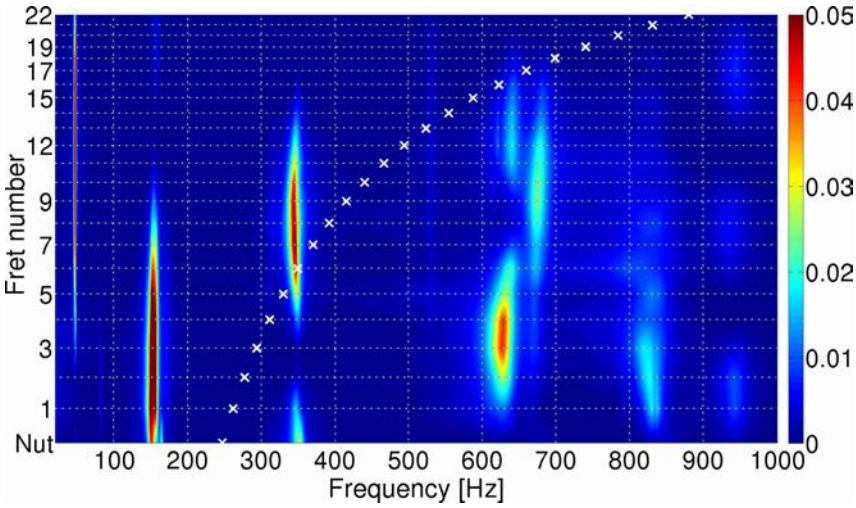


Figure 7.5: Rosewood-fingerboard guitar: driving-point conductance values in the frequency range [20Hz–1000Hz] for all frets along the 2nd string. White crosses spot the fundamental frequencies of the notes played at each fret of the 2nd string. Unit of conductance is $m.s^{-1}.N^{-1}$.

E almost always has a higher time constant. The smaller damping (for every partial in the frequency range [20Hz-2000Hz]) due to the smaller mean conductance for guitar E results in a higher time constant τ. The mean conductances and the time constants are computed along the five other strings. The tendency is confirmed: the guitar E almost always has a lower mean conductance value and a higher time constant. Rosewood might then perturb the string more than ebony.

7.5 Conclusion

Previous results on the influence of the structure on the vibration of the string have been confirmed. Because the vibrational behaviour of the electric guitar is highly dependent on the lutherie parts, which are numerous, it was decided to focus on the influence of a single lutherie parameter: the most prominent difference between the two guitars of the study was the wood of the fingerboard (ebony or rosewood). Comparative study of sound and driving-point conductance on these two guitars indicate that the wood of the fingerboard may have an influence upon the:

- **dead spot location:** the spatial and frequency coincidence of string and guitar resonances happens at different places depending on the fingerboard wood
- **dead spot dangerousness:** when this coincidence happens, the string damping may be bigger for rosewood-fingerboard guitar

Experimental investigation about dead spots and the related discussion are naturally not only valid for the fundamental of the string but also for partials. As equation 7.8 shows, each string partial may couple with higher structure modes. Hence the timbre is affected by the fingerboard.

The sound differences that may be induced by the change of fingerboard wood can then have consequences in:

- **instrument-making:** the guitar maker could attempt to change the resonance coincidences: for example fingerboard thickness, shape (the so-called "slim" and "slapboard" fingerboards by Fender) or sawing angle are parameters changing the modes of the structure. Hence the instrument-maker can reduce the differences between the woods or on the contrary increase them.
- **playing:** the same note can be played at different places on the neck. Depending on the location

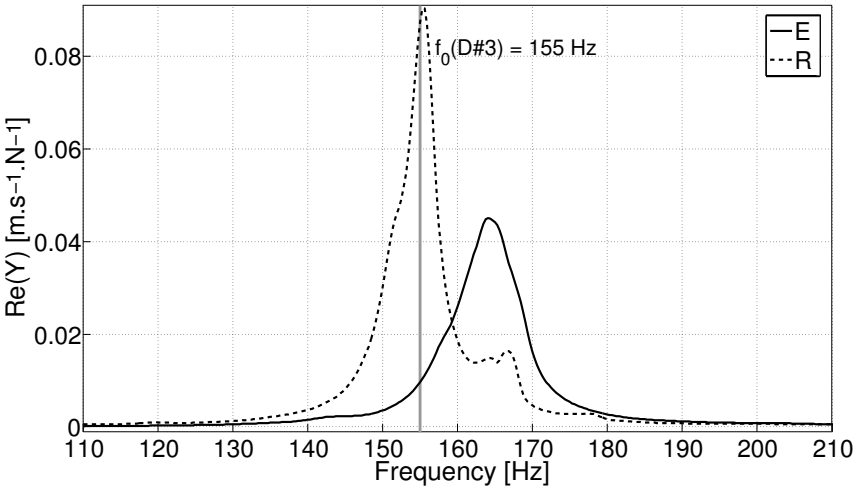


Figure 7.6: Driving-point conductance at the 1st fret along the 4th string's axis. Solid line is used for the guitar E and dashed line for guitar R. Gray line highlights the fundamental frequency of the D#3 played at this place.

and dangerousness of the dead spots, the player may be forced to avoid certain places on the neck and to conform his playing to the guitars' sound.

- **tuning:** actually, the frequency coincidence between the string and the structure depends on the tuning of the string. In order to avoid a too strong coupling, the guitar player can slightly change the tuning of the strings. This could be an explanation to the fact that some guitar players say that a guitar sounds better with a special tuning (e.g. all the strings a whole-tone lower) than with the standard tuning A-440Hz.

A perceptual study involving the two guitars of this paper has been carried out. The analysis is in progress and is expected to tell us to what extent the differences found here are perceptible for the guitar player.

Acknowledgments

The authors pay a special tribute to the luthiers Vincent Charrier, Loïc Keranforn, Lisa Marchand, Bela Pari, Alexandre Paul and Julien Simon and warmly thank as well Yann-David Esmans, Fred Pons and Pierre Terrien from Itemm. The efficient mediation of Vincent Doutaut made the collaboration with instrument-makers possible.

The authors also thank Rémi Blandin for his helpful contribution to the measurements on the guitars, and Benoît Navarret for fruitful discussion.

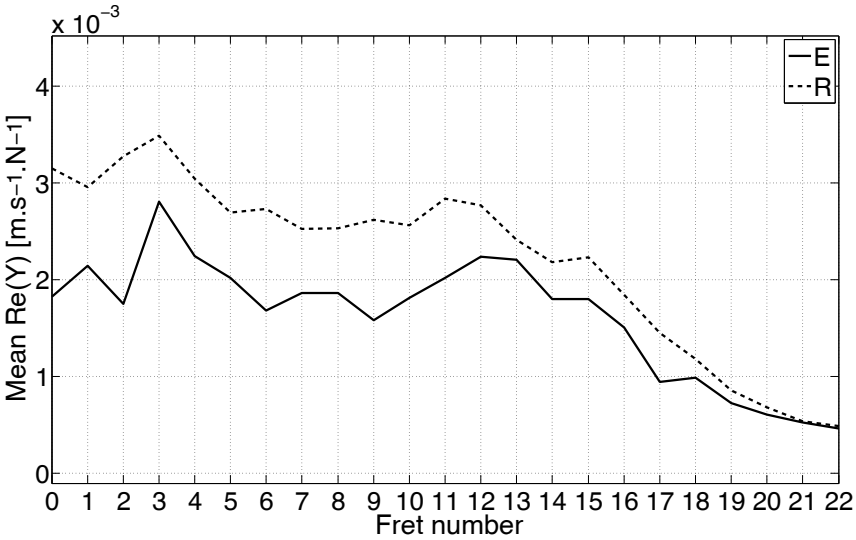


Figure 7.7: Mean value of conductance in the frequency range [20Hz–2000Hz] as a function of fret number/measurement place along the 2nd string. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R.

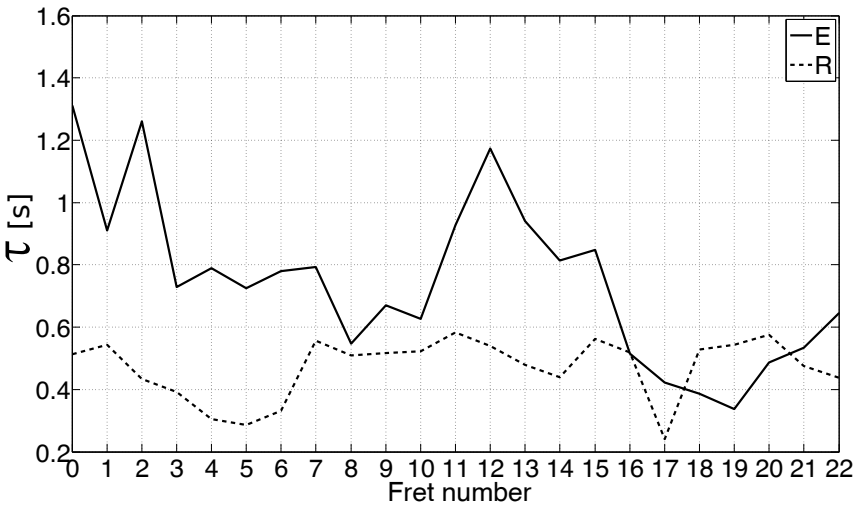


Figure 7.8: Computed time constants τ for each note of the 2nd string. A bandpass filter ([20Hz-2000Hz]) was applied to each note. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R.

Chapitre 8

De la variabilité inter-type à la variabilité intra-type

Il est attendu de la variation d'un élément de lutherie qu'elle modifie la structure de l'instrument, donc potentiellement son comportement vibratoire. Le chapitre 7 a montré qu'il était possible d'identifier des paramètres mécaniques qui étaient sensibles à la variation d'un élément de lutherie, le matériau de la touche. Il est néanmoins attendu, et il en a été question par exemple au chapitre 4, que deux guitares prétendues identiques offrent des différences de paramètres vibratoires. Ces différences devraient être liées à la variabilité intrinsèque des matériaux utilisés, notamment le bois, et aux variabilités dues aux outils et machines, ainsi qu'aux gestes de différents luthiers. Afin d'identifier les paramètres modaux sur les guitares que nous avons étudiées, nous avons effectué une analyse modale de celles-ci, afin de constater la variabilité. Après un bref rappel de méthode en section 8.1, la section 8.2 présentera l'analyse modale des guitares de l'étude portant sur le matériau de touche et la section 8.3 présentera l'analyse modale des guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps.

8.1 Analyse modale

Pour l'analyse modale, une méthode classique est utilisée : il s'agit dans un premier temps de recueillir la réponse vibratoire de la structure en autant de points de mesure qu'on souhaite, à une excitation en un certain point de la structure. Dans le but d'obtenir des déformées modales faciles à interpréter, les points de mesures sont dispersés sur la structure de l'instrument de manière à rendre compte de la géométrie de celui-ci. En réalité, pour des raisons de commodité expérimentale, on utilise le principe de réciprocité : les fonctions de transfert sont mesurées entre un unique point de mesure et de multiples points d'excitation. Les mesures sont réalisées sur un maillage de 54 points qui est représenté en figure 8.1. L'excitation est réalisée par un marteau d'impact et on recueille la réponse vibratoire avec un accéléromètre. L'analyse des mesures de fonctions de transfert est faite à l'aide du logiciel MODAN [Piranda 2001] et de la méthode LSCF (*Least-Square Complex Frequency*, voir [Guillaume *et al.* 2003]) implantée dans ce logiciel. Le logiciel nous fournit la base modale de la structure étudiée : déformées, fréquences et amortissements modaux.

8.2 Guitares de l'étude sur le matériau de touche

L'analyse modale expérimentale est effectuée sur chacune des six guitares de l'étude sur le matériau de touche. Rappelons que ces guitares, présentées au chapitre 3, sont de construction identique à l'exception du matériau de touche. Trois guitares (G1, G3 et G5) sont à touche en ébène et trois guitares (G2, G4 et G6) sont à touche en palissandre. Deux d'entre elles ont été retenues pour l'étude mécanique présentée au chapitre 7 : il s'agit de G5 (appelée E au chapitre 7) et de G6 (appelée R au chapitre 7). Le tableau H.1 en annexe H recense les fréquences et amortissements des modes identifiés sur les six guitares. Ces résultats sont récapitulés de manière synthétique en figures 8.2 (fréquences modales) et 8.3 (amortissements modaux).

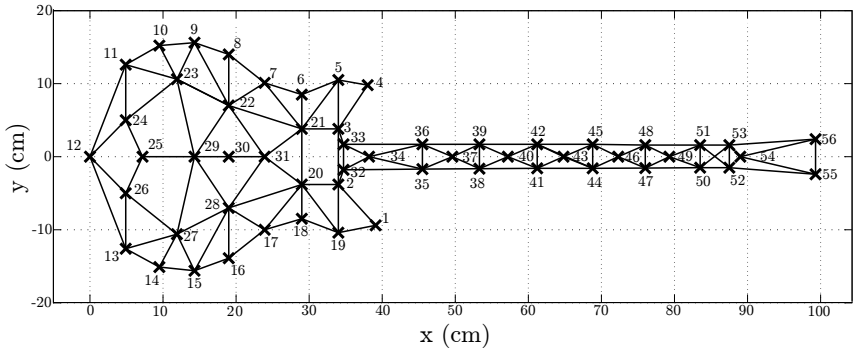


Figure 8.1: Maillage expérimental utilisé pour l'analyse modale sur les guitares construites à l'Itemm. A chaque point est associé un numéro pour les commodités de l'analyse. Les lignes représentant les points sont arbitraires mais facilitent la lecture des déformées modales.

A l'examen des figures 8.2 et 8.3, on retrouve une des constatations du chapitre 7, qui est celle d'une variabilité non-négligeable des paramètres modaux (fréquence et amortissement notamment). Cette variabilité est non seulement avérée entre deux guitares quasi-identiques (deux guitares aux matériaux de touche différents), mais également entre deux guitares prétendues identiques (deux guitares au matériau de touche nominalement identique). En effet, au niveau des paramètres modaux, la variabilité qu'on appelera "inter-type" (entre deux types de constructions) n'est pas supérieure à celle qu'on appelera "intra-type" (type de construction partagé). Ainsi, deux guitares prétendues identiques (mêmes protocole, conditions de fabrication, matières premières) peuvent présenter des paramètres modaux au moins aussi différents que deux guitares délibérément différentes. Notons que l'appréciation de la variabilité présentée ici est qualitative, et sa quantification pourra faire l'objet de travaux futurs.

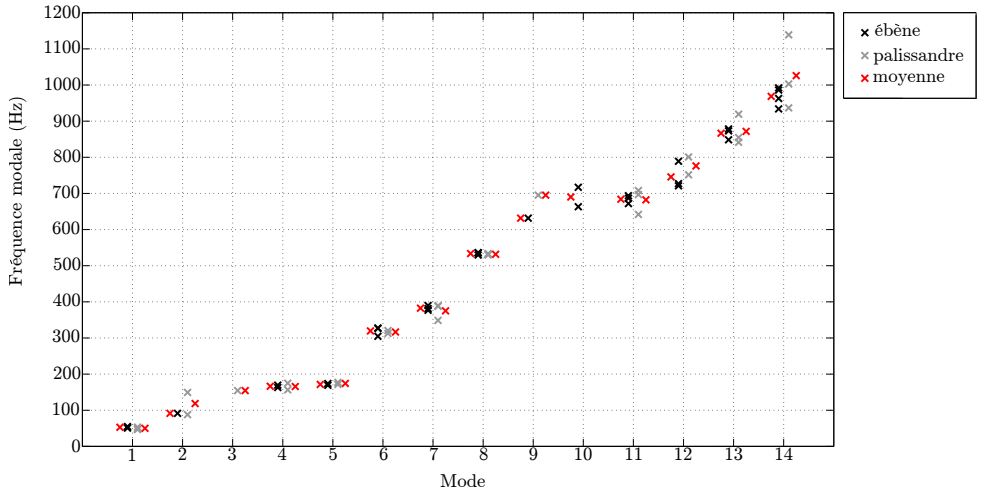


Figure 8.2: Fréquences modales identifiées sur les six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les croix noires sont utilisées pour les guitares à touche en ébène. Les croix grises sont utilisées pour les guitares à touche en palissandre. Pour chacune des catégories de guitare (touche en ébène ou touche en palissandre), la moyenne des fréquences est indiquée par une croix rouge placée du côté correspondant (à gauche pour les guitares à touche en ébène, à droite pour les guitares à touche en palissandre). Des croix manquantes indiquent des modes non identifiés.

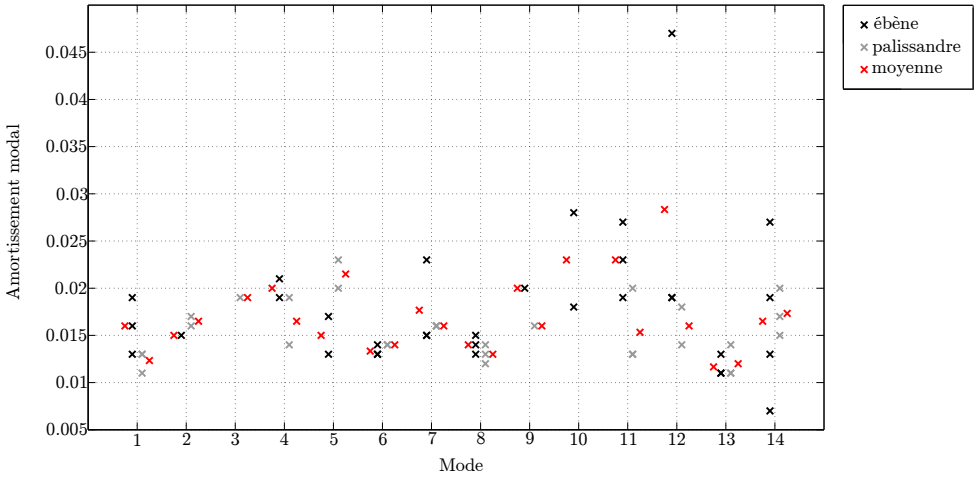


Figure 8.3: Amortissements modaux identifiés sur les six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les croix noires sont utilisées pour les guitares à touche en ébène. Les croix grises sont utilisées pour les guitares à touche en palissandre. Pour chacune des catégories de guitare (touche en ébène ou touche en palissandre), la moyenne des amortissements est indiquée par une croix rouge placée du côté correspondant (à gauche pour les guitares à touche en ébène, à droite pour les guitares à touche en palissandre). Des croix manquantes indiquent des modes non identifiés.

8.3 Guitares de l'étude sur la jonction du manche au corps

Les neuf guitares de l'étude ont déjà été présentées à la section 3.1. Rappelons seulement que neuf guitares copies de *Gibson Les Paul Junior* ont été construites à l'Itemm par les apprentis-luthiers de la promotion 2010–2011 : trois ont un manche vissé (G1, G2 et G3), trois ont un manche collé (G4, G5 et G6), et trois ont un manche traversant (G7, G8 et G9). Huit de ces guitares sont montrées en figure 8.4. La photographie a été prise juste avant l'étape consistant à monter l'accastillage (chevalet, mécaniques, boutons des potentiomètres, *pickguard*[1]) et l'électronique (*pickup*, câbles, potentiomètres). Afin de rendre indétectable le type de jonction du manche au corps lors du test perceptif, il a été décidé, de manière inhabituelle d'un point de vue organologique, d'apposer le manche par la face avant du corps (et non par la face arrière comme proposé habituellement sur les modèles de référence des industriels *Fender* ou *Gibson*). On peut ainsi voir en figure 8.4 la différence de jonction entre un manche vissé (quatrième guitare à partir de la droite), et un manche collé (troisième guitare en partant de la droite). Une fois le *pickguard* monté, cette différence n'est plus visible. La différence entre un manche collé et un manche traversant ne se détecte pas sur ce lot de guitare, en raison de l'étroitesse des joints et de l'opacité du vernis.

1. Il s'agit de la plaque en plastique prenant place sur le corps entre le *pickup* et le manche vissé, ayant une utilité à la fois esthétique et de protection du vernis contre les coups de médiator.

Figure 8.4: Huit des neuf guitares de l'étude concernant le type de jonction du manche au corps.

Dans l'optique de parvenir à discriminer les trois types de jonction par des paramètres mécaniques, un certain nombre d'indicateurs vibratoires a été testé : mobilité et conductance, à la fréquence fondamentale ou à celles des partiels des notes produites aux endroits correspondants, ou bien encore moyennées sur différentes bandes de fréquence, comme proposé au chapitre 7. Mais ces indicateurs n'ont pas montré de différence en fonction du type de construction. Au final, il n'a pas été trouvé de différence claire au niveau vibratoire entre les trois types de jonction du manche au corps. Il est attendu en revanche que des indicateurs issus de la statique des solides ou de la résistance des matériaux puissent différencier les types de jonction du manche au corps. De telles considérations restent cependant en-dehors de ce travail de thèse, qui, pour l'aspect mécanique, se concentre sur les aspects vibratoires.

Nous parlerons ici des résultats qui peuvent s'interpréter à la lumière de la variabilité inter-individuelle au sein d'un groupe de guitares identiques. Ainsi qu'il est expliqué dans [Paté 2011] (section 2.3), une analyse modale de chaque guitare a été effectuée en fin de construction suivant la méthode précédemment décrite. Les résultats sont récapitulés de manière synthétique dans les figures 8.5 et 8.6 avec des marqueurs de couleur grise, et dans de plus amples détails en annexe H dans le tableau H.2.

A l'instar des observations de la section 8.2, il apparaît (et ce point de vue est développé dans [Paté 2011]) qu'au niveau des paramètres modaux, il existe autant de différence entre deux guitares représentantes d'un même type de jonction qu'entre deux guitares ayant un type de jonction différent : la variabilité "intra-type" est du même ordre que la variabilité "inter-type".

L'analyse modale a également été effectuée sur les guitares assemblées, mais non munies de cordes, accastillage (chevalet, mécaniques d'accordage, *pickguard*) et électronique (câbles, *pickup*, composants électroniques divers). Les résultats de cette analyse modale sont présentés en figures 8.5 et 8.6 avec des marqueurs de couleur noire. Une version plus développée est disponible en annexe dans le tableau H.3. Dans le cas de guitares non-cordées et non-équipées comme dans le cas précédent (guitares cordées et équipées), aucune différence en terme de fréquences ou amortissements modaux pouvant départager le type de jonction du manche au corps n'est constatée. De plus, dans les cas "équipée" et "non-équipée", il existe toujours autant de variabilité intra-type que de variabilité inter-type. Encore une fois, la variabilité dont il est question n'est estimée que qualitativement. Il serait souhaitable de quantifier cette variabilité. Ceci pourrait requérir des mesures et/ou des guitares supplémentaires.

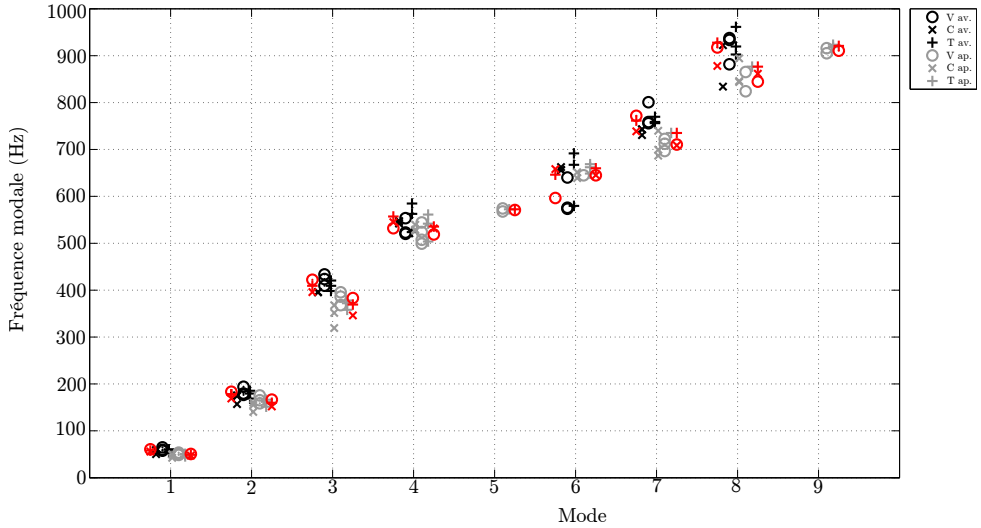


Figure 8.5: Fréquences modales identifiées sur les neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les cercles, "x"et "+" indiquent les guitares à manche vissé, collé et traversant respectivement. La couleur noire est utilisée pour indiquer les fréquences modales identifiées avant l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("av." pour "avant"). La couleur grise est utilisée pour indiquer les fréquences modales identifiées après l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("ap." pour "après"). Pour chacun des types de jonction corps–manche, la moyenne des fréquences est indiquée par un marqueur rouge. Des marqueurs manquants indiquent des modes non identifiés.

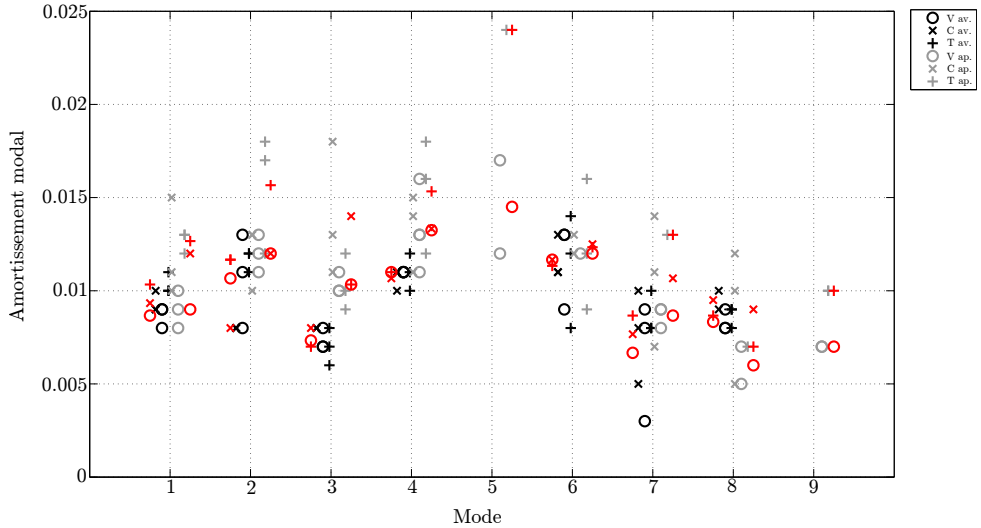


Figure 8.6: Amortissements modaux identifiés sur les neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les cercles, "x" et "+" indiquent les guitares à manche vissé, collé et traversant respectivement. La couleur noire est utilisée pour indiquer les amortissements modaux identifiés avant l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("av." pour "avant"). La couleur grise est utilisée pour indiquer les amortissements modaux identifiés après l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("ap." pour "après"). Pour chacun des types de jonction corps–manche, la moyenne des amortissements est indiquée par un marqueur rouge. Des marqueurs manquants indiquent des modes non identifiés.

Il se trouve qu'en comparant mode par mode le cas "guitares non-équipées" au cas "guitares équipées", des observations intéressantes sont faites. L'augmentation des amortissements modaux semble avérée avec l'arrivée de l'équipement des guitares. Il paraît raisonnable de modérer cette observation : la présence des cordes, des mécaniques d'accordage et de divers objets maintenus par des vis a nécessité l'ajout de matières (papier, pâte à modeler) permettant d'éliminer les vibrations parasites lors des mesures vibratoires. Ceci a pu procurer de l'amortissement à la structure. Les causes de l'augmentation d'amortissement ne sont donc pas clairement séparées. En revanche, il semble bel et bien y avoir une tendance dans l'évolution des fréquences modales entre l'avant et l'après équipement des guitares. Les fréquences modales des guitares équipées sont quasi-systématiquement plus basses que les fréquences modales des guitares non-équipées. Ainsi l'ajout de masse au moment de l'équipement des guitares semble piloter l'évolution des fréquences modales.

8.4 Vers une étude de la variabilité

On a vu dans ce chapitre que si des variations de paramètres mécaniques pouvait être imputées à des variations intentionnelles d'éléments de lutherie, il existe aussi une variabilité dans les paramètres de guitares nominalement identiques. Cette dernière variabilité peut s'expliquer par des facteurs tels que :

- ➢ La variabilité intrinsèque du bois : même si toutes les guitares ont été construites à partir de bois issus du même lot, il subsiste toujours, de par le caractère vivant et naturel du bois, de la variabilité dans les paramètres mécaniques de deux morceaux de bois réputés proches.
- ➢ La variation du geste entre plusieurs luthiers : en effet, même si pour chaque guitare les mêmes outils, plans et machines ont été utilisés, chaque guitare a été construite par un apprenti-luthier

différent.

- La variabilité due à la tolérance, notamment géométrique, des outils et machines utilisés lors de la construction.

Il serait intéressant de parvenir à départager, voire hiérarchiser, chaque cause de variabilité. En conséquence des résultats de l'étude mécanique de la jonction du manche au corps présentés dans ce chapitre, il semble naturel d'étudier la variation des paramètres modaux des guitares électriques en cours de construction. Connaître la manière dont évoluent les fréquences et amortissements modaux au cours du processus transformant des pièces de bois brutes en guitares peut d'une part permettre de comprendre l'influence de chaque étape de construction sur le comportement vibratoire de l'instrument, et potentiellement de prévoir dès l'origine du processus de fabrication les caractéristiques du produit fini, et ainsi prévoir le son de l'instrument (et le rectifier tôt dans le processus de production). D'autre part, si l'étude en cours de construction est réalisée sur plusieurs guitares construites à l'identique et en parallèle, elle nous permettrait de connaître l'évolution de la variabilité inter-individuelle des paramètres modaux au cours de la construction et d'identifier les sources de la variabilité constatée dans ce chapitre. L'étude en cours de construction est l'objet du chapitre 9.

Dès lors, la question de l'individualité de la guitare est posée. Cette question prend tout son sens en se souvenant que la guitare électrique *solid body* est un instrument principalement industriel : est-ce que des guitares produites en série varient ? Nous touchons à la problématique directrice du chapitre 10.

Chapitre 9

Evolution of the modal behaviour of nominally identical electric guitars during the making process [1]

ABSTRACT

Recent studies showed that the sound of the solid body electric guitar depends not only on the extended electronic chain running from the pickup to the loudspeaker, but also on the vibratory behaviour of its structure. Indeed, the strings couple with the structure of the instrument, so the vibratory behaviour of the structure alters the sound. However, nominally "identical" electric guitars can show different vibratory behaviours. Measurements during the making process might help finding the origin of these differences. The aim of the article is to understand how the modal behaviour of electric guitars changes during the making process. In this paper, the making process is split in 6 stages: raw neck, shaped neck, equipped neck, body, raw guitar, and equipped guitar. Vibratory measurements are performed on 11 nominally “identical” guitars at each of the 6 stages, in order to track the evolution of modal frequencies during the making process. Simple analytical models predict quite well the evolution of modal frequencies experimentally observed. The study also provides information about the evolution of modal damping ratios, and about the variability of the modal parameters among the 11 guitars. Knowledge of the evolution of modal parameters can be of great help for luthiers, for example to make a selection of suitable separated parts at the beginning of the making process. Knowledge of the modal parameter variability at each stage can help separating the respective influence of raw material properties and making process.

1. Ce chapitre est présenté sous la forme d’un article nommé « *Evolution of the modal behaviour of nominally identical electric guitars during the making process* » soumis en version révisée pour publication au journal *Acta Acustica united with Acustica* le 11 septembre 2014. Cette étude a été également partiellement publiée dans [Paté *et al.* 2014b].

9.1 Introduction

Two main transformations of the acoustic guitar have lead to the solid body electric guitar [Paté *et al.* 2012a]. In order to increase its sound volume, pickups (mostly electro-magnetic) were mounted on the guitar, allowing an amplification of the guitar's sound. In order to decrease the feedback problems occuring with high-level amplification, the soundbox of the guitar was removed and replaced by a thick body.

Because of the low sound radiation from the instrument itself, and of the extended electronic chain (pickup, cables, effect pedals, amplifier, and loudspeaker) altering the sound, there has been only a few studies about the acoustical and mechanical behaviour of the solid body electric guitar. Recent studies showed that the sound of the instrument also depends on its mechanical behaviour. As a matter of fact, the pickup converts the string velocity into a voltage supplying the electronic chain. Just like in purely acoustic string instruments [Gough 1981; Woodhouse 2004a], the string couples with the structure of the instrument. The lutherie quality therefore alters the sound of the instrument. A way to describe this coupling is to study the vibratory behaviour of the structure [Fleischer & Zwicker 1998 1999; Paté *et al.* 2014c]. In these latter articles, the input admittance of the structure is used to predict and characterise the string vibration. In particular, the modal frequencies, damping ratios, and effective masses of the structure are directly related to the output sound of the electric guitar.

The characterisation and comparison of string instruments with vibratory measurements or theoretical study of the structure has been performed for decades [Paté *et al.* 2013; McIntyre & Woodhouse 1978; Richardson 1994; Fletcher 1977; Hill & Richardson 2004]. However, nominally identical instruments can present notable differences in their vibratory behaviours [Meyer 1983b; French 2009]: this may at the end lead to sound differences. In musical acoustics, measurements are performed most of the time on complete instruments. These measurements can give evidence of dissimilar vibratory behaviours, but can hardly explain the reasons for these dissimilarities. Several causes can be suggested for elucidating it: variability of the raw material, variability among luthiers, and environmental variability like temperature or hygrometry. Notwithstanding its industrial history that led to a mass production of highly standardised and calibrated instruments, nominally identical electric guitars may show different vibratory behaviours as well.

Measurements during the making process might help finding the origin(s) of dissimilarities. To our knowledge, measurements during the making process have never been done for electric guitars. However, the classical guitar was several times investigated in that sense. In [Skrodzka *et al.* 2011], a modal analysis before and after the bridge and string assembling was carried out. Boullosa [Boullosa 2002] studied the vibration and radiation of soundboards isolated from the guitar, comparing different woods. An experimental and numerical study of the isolated soundboard, with or without the bridge, with the aim of characterising the influence of the bridge, was reported [Torres & Boullosa 2009]. The resonances of the classical guitar with those of the back and soundboard could be linked [Rossing *et al.* 1983]. In [Elejabarrieta *et al.* 2000], the vibratory behaviour of a soundboard was tracked during seven production stages, from the raw wood plate to the soundboard with definitive bracing. A similar study (with boundary conditions closer to the actual ones) used an experimentally-tuned finite-element model for the study of the seven production stages [Elejabarietta *et al.* 2001]. An experimental study [Richardson & Roberts 1983] investigated the next stages of the soundboard production: from definitive soundboard attached to the sides and back to the complete guitar. These previous studies either investigated partly the production stages, or focused on only one isolated part of the instrument. There has been a long tradition in violin acoustics research for giving an interpretation to a common practice of luthiers: the top and back plates are tapped and listened to by the maker, in order to tune them and to get a good-quality violin when the two plates are joined together. Acoustic characterisations of the luthiers' tuning and

Figure 9.1: One of the 11 guitars of the study. The crosses indicate the measurement points. Point A is close to the nut, on the 1st string's side. Point B is close to the bridge, on the 1st string's side

assembling strategies were obtained [Hutchins 1981; Hutchins *et al.* 1960; Jansson 2002].

This paper describes detailed measurements on solid body electric guitars at six stages of their construction. Separated parts (neck and body at different states of progress) as well as the whole guitar are experimentally studied and compared with analytic models. The aim of the article is to understand how the modal frequencies of electric guitars change during the making process. This paper focuses only on the modal parameters of the structure, so any link with the acoustic output of the instrument is beyond its scope. 11 nominally "identical" guitars are investigated, in order to get additional information about the variability of the modal behaviour at each stage. This information can be used to identify and separate the respective influences of the raw material and the making process including the differences in carving and assembly methods used by the expert makers.

Sections 9.2 introduces the guitars of the study and the production stages at the end of which the measurements are carried out. Section 9.3 derives analytical models predicting the evolution of modal frequencies of the necks and guitars. The measurement and analysis method is explained in section 9.4. Section 9.5 gives the results of the mode tracking throughout the 6 production stages for the guitars of the study.

9.2 Overview of the experimental material

9.2.1 The guitars

Although each of the 11 guitars studied here was built by a different luthier, everything was done in order to reduce the variability between instruments. All pieces of wood come from the same wood bundle (mahogany for bodies and necks, ebony for fingerboards). This should reproduce the wood variability that can be found in a guitar factory, where no mechanical test is done to select the raw materials prior to the making process in itself. Frets, bridge, pegs are nominally the same, and so do the pickup and the electronic parts. Each guitar is made according to the specifications (geometry and wood) of the reference model *Les Paul Junior* by manufacturer *Gibson* [Paté *et al.* 2012a]. Every luthier followed the same making process using the same tools and machines. All luthiers worked at the same time and place, so the environmental variability is controlled. As a result, all 11 guitars were expected to have similar vibratory properties. Figure 9.1 is a picture of one of these guitars.

9.2.2 The stages of the making process

This paragraph describes the making process that is monitored in this paper. The set of 11 guitars was measured at the end of each of the 6 following production stages:

S1: cutting of the raw neck, that is a neck with angled headstock and heel, and rectangular raw neck profile,

S2: shaping of the neck profile,

S3: placing of the truss-rod (narrow metal bar running throughout the neck, which can be curved at will in order to compensate for various string tensions) in a groove dug in the neck; gluing of the fingerboard on the neck, setting of the frets on the fingerboard,

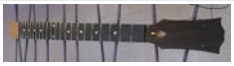
S4: machining of the body with cavities for the pickup and the electronic parts, as well as holes for the bridge to be screwed and for the neck to be inserted and glued,

S5: assembly of the "raw" guitar, that is gluing the complete neck of S3 to the body of S4; varnishing of the whole guitar, excepted the fingerboard,

S6: equipping the guitar with hardware (bridge, pegs), electronic parts (pickup, filters, pots), strings at playing tension.

Only 4 of the 11 guitars were available for measurements at S6. Table 9.1 sums up the measurement stages, with corresponding picture, count of the measured objects, and measurement points. In the following, we call “object” what is measured at one specific measurement stage (neck for S1, S2, and S3, body for S4, whole guitar for S5 and S6).

Table 9.1: Description and pictures of the production stages being monitored.

Picture	Stage	Measured objects
	S1	11 raw necks
	S2	11 shaped necks
	S3	11 necks fitted with fingerboard and frets
	S4	11 shaped body
	S5	11 raw guitar
	S6	4 fully-equipped guitar

9.3 Modelling the making process

The evolution of modal frequencies is the focus of this article. Given the knowledge of the production stages, this evolution can be predicted by analytical models. Beam models are used to predict the modal frequency evolution from S1 to S3. The modal frequency evolution from S5 to S6 is related to an increase of mass. No quantitative prediction is done for S4 (no evolution can be tracked for only one measurement stage on the bodies), and for the transition from separated parts (S3 and S4) to whole guitars (S5). The method proposed here consists in identifying the parameters on which the modal frequencies depend, and to evaluate the ratios between the modal frequencies at one stage and the modal frequencies at the previous stage.

9.3.1 Vibrations of a beam

For simplicity reasons, the necks of stages 1 to 3 are modelled as simple beams: the length of the headstock is included in the total length of the beam, but not its specific shape and mass distribution. Some formulæ are given in this paragraph for the calculation of beam frequencies of vibration.

Let us define a coordinate system as shown for example in figure 9.2a. Orthogonal axis e_1, e_2, and e_3 are associated with coordinates x_1, x_2, and x_3 respectively. Let e_1 be the axis of the beam. The bending vibration around axis e_2 are studied, as well as the torsional vibration around axis e_1. Given the dimensions of the beam, some other vibrations (bending around axis e_1, torsion around e_2 and e_3) are expected to appear at frequencies outside the frequency range of the study (limited for experimental reasons, see section 9.4.1). The bending vibrations around axis e_3 may occur in the frequency range of the study, but do not involve out-of-plane motion (see section 9.4.1).

9.3.1.1 Bending vibrations

The cross-sectional area $\mathcal{S}$ of the beam is calculated from the physical dimensions and the second moment of area I_{bend} is given by equation 9.1, where $\bar{x_3}$ is the neutral axis [2].

$$I_{bend} = \iint_{\mathcal{S}} (x_3 - \bar{x_3})^2 \mathrm{d}x_3 \mathrm{d}x_2 \tag{9.1}$$

For a rectangular section of width w (along axis e_2) and height h (along axis e_3), those quantities become $S = wh$ and $I_{bend} = \frac{wh^3}{12}$. Additionally, let the beam have a Young's modulus E, a density ρ (the beam is considered as homogeneous), and a length L. The beam natural frequencies f_{bend} for bending vibrations around axis e_2 are [Morse & Ingard 1986]:

$$f_{bend} = \frac{\pi \beta_n^2}{2L^2} \sqrt{\frac{EI_{bend}}{\rho S}} \tag{9.2}$$

where the β_n are coefficients taking into account the boundary conditions, and depending on the mode rank [3]. Assuming that the variations in length L are negligible (all luthiers used the same machine and did not further alter the length of the neck), one has:

$$f_{bend} \propto \sqrt{\frac{EI_{bend}}{\rho S}} \tag{9.3}$$

2. The neutral axis $\bar{x_3}$ is given by $\bar{x_3} = \frac{\int\int_S x_3 dS}{S}$
3. For free-free conditions, one has $\beta_1 = 1.5056$, $\beta_2 = 2.4997$, and $\beta_n = n + 1/2$ for $n > 2$

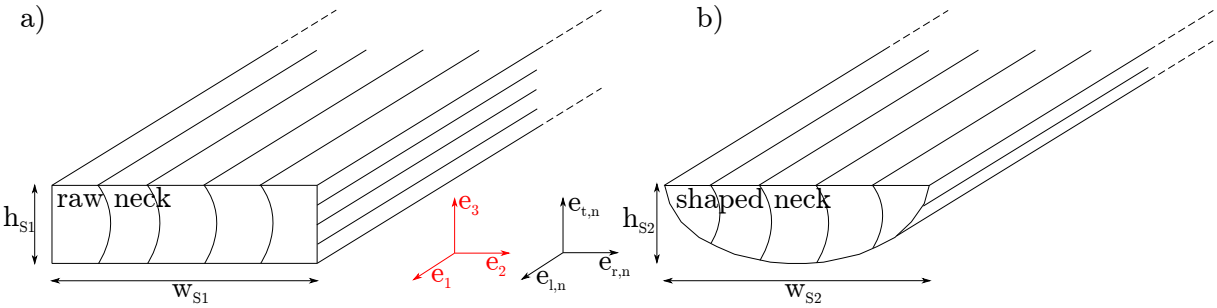


Figure 9.2: a) Model of the S1-neck as a beam of rectangle cross-section. b) Model of the S2-neck as a beam of realistic cross-section.

9.3.1.2 Torsional vibrations

Let us denote G the shear modulus of the beam describing torsional motions around axis e_1. The torsional frequencies of a beam of rectangular cross-section are given by [Young & Budynas 2002]:

$$f_{tors} \propto \sqrt{\frac{GJ_{tors}}{\rho I_{tors}}} \tag{9.4}$$

where I_{tors} is the polar moment of area, and J_{tors} is the torsional constant. For a rectangular cross-section of width w and height h, those quantities are defined as [Chen *et al.* 2012]: $I_{tors} = \frac{hw^3+wh^3}{12}$, and $J_{tors} = \frac{wh^3}{3}\left[1 - \frac{0.63h}{w} + 0.052\frac{h^3}{w^3}\right]$.

9.3.2 Raw necks to shaped necks (S1 → S2)

No torsional mode is experimentally identified at S1 (see section 9.5.1). No frequency evolution in torsional modes can therefore be studied between S1 and S2. This paragraph then focuses on the bending vibration modelling. The transition from S1 to S2 is a forming of the neck profile. The features that are expected to change are S and I_{bend}.

The area and second moment of both the rectangular (S1, figure 9.2a) and shaped (S2, figure 9.2b) neck cross-sections are calculated from the expressions in section 9.3.1.1 using dimensions from the technical drawings (profile of S2 necks is extracted with image processing).

No change in the wood properties occurs, so that E and ρ are kept constant. Equation 9.3 becomes

$$f_{bend} \propto \sqrt{\frac{I_{bend}}{S}} \tag{9.5}$$

In order to characterise the evolution between S1 and S2, the ratio between the modal frequencies at S2 and the modal frequencies at S1 can be written:

$$\frac{f_{bend,S2}}{f_{bend,S1}} = \frac{\sqrt{\frac{I_{bend,S2}}{S,S2}}}{\sqrt{\frac{I_{bend,S1}}{S,S1}}} \tag{9.6}$$

9.3.3 Shaped necks to necks with fingerboards (S2 → S3)

The transition between S2 and S3 can be modelled as the transition between a simple beam and a composite beam. For simplicity reasons and without restricting the generality of the modelling, the special shape of the neck at S2 and following stages is not taken into account in this paragraph. Let the neck of S2 be modelled by a simple beam with rectangular section, as in figure 9.3a. As shown in

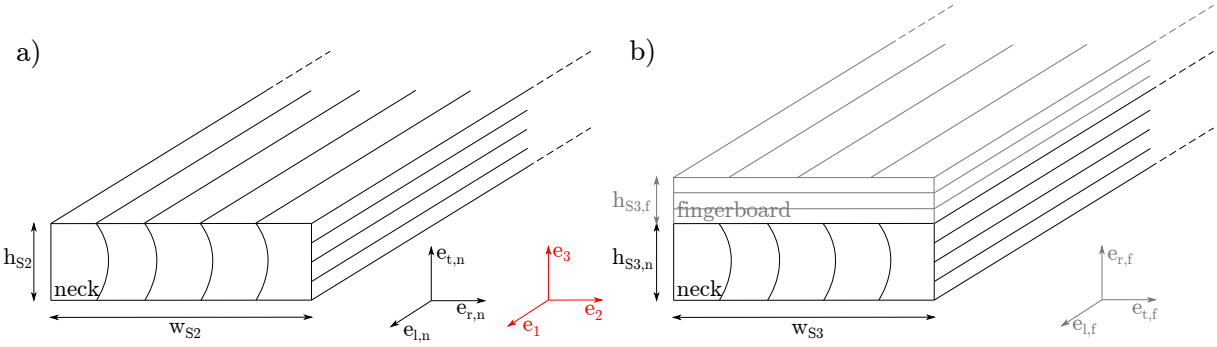


Figure 9.3: a) Model of the S2-neck as a beam of rectangular cross-section. b) Model of the S3-equipped neck as a composite beam made of two beams (one for the neck and one for the fingerboard) of rectangular cross-section. The local coordinates corresponding to the neck (resp. fingerboard) are written in black (resp. gray). Standard coordinates for an orthotropic material like wood are used: the subscript l refers to the longitudinal direction (parallel to grain), r to the radial direction (perpendicular to the rings), and t to the tangential direction (tangential to the rings). The common coordinate system is written in red.

figure 9.3b, the neck and the fingerboard of S3 can be modelled as a composite beam, made of two beams of rectangular cross-section: one beam for the neck, the other one for the fingerboard. The two beams have the same width $w_{S3} = w_{S2}$ and different heights: $h_{S3,n}$ (resp. $h_{S3,f}$) is the height of the neck (resp. fingerboard). These dimensions are estimated with the drawings of the guitars.

Note that in this study, the woodcuts of the two pieces differ: the fingerboard is flatsawn whereas the neck is quartersawn. It results in a change of local coordinates. In figure 9.2, the local coordinates corresponding to the neck (resp. fingerboard) are written in black (resp. gray). Standard coordinates for an orthotropic material like wood are used: the subscript l refers to the longitudinal direction (parallel to grain), r to the radial direction (perpendicular to the rings), and t to the tangential direction (tangential to the rings). The shared coordinate system described in paragraph 9.3.1 is written in red.

The simple beam of S2 is described with the mechanical properties of mahogany of table 9.5 in appendix 9.7. The composite beam of S3 is described in terms of "equivalent" mechanical properties.

9.3.3.1 Bending vibrations

As equation 9.3 states, the definition of equivalent Young's modulus E_{eq}, density ρ_{eq}, cross-section area S_{eq} and second moment $I_{bend,eq}$ is required in order to know the bending frequencies of the composite beam. S_{eq} and I_{eq} are simply obtained with the definitions of section 9.3.1.1 for a rectangular cross-section beam of width w_{S3} and total height $h_{S3,f} + h_{S3,n}$. I_{eq} is centered around the neutral axis of the composite beam.

The equivalent density of a composite beam such as that of S3 is given in [Gay & Van Hoa 2007]:

$$\rho_{eq} = \frac{\rho_n \hat{V}_n + \rho_f \hat{V}_f}{\hat{V}_n + \hat{V}_f} \tag{9.7}$$

where the subscripts n and f refer to neck and fingerboard respectively. $\hat{V}_n$ (resp. $\hat{V}_f$) represents the volume of the neck (resp. fingerboard) beam divided by the total volume of the composite beam. The beam standing for the neck (resp. fingerboard) has the mechanical properties of mahogany (resp. ebony), so that $\rho_n = \rho^{eb}$ and $\rho_f = \rho^{ma}$. Material and mechanical properties of the woods of the study are given in appendix 9.7

In terms of Young's modulus, we are interested only in the longitudinal one, since the bending modes

of interest are around axis e_2. [Ashby & Jones 2005] gives the equivalent Young's modulus E_{eq} of a rectangular composite beam such as that of figure 9.3b:

$$E_{eq} = \frac{E_n \hat{V}_n + E_f \hat{V}_f}{\hat{V}_n + \hat{V}_f} \tag{9.8}$$

The beam standing for the neck (resp. fingerboard) has the mechanical properties of mahogany (resp. ebony), so that $E_n = E_L^{eb}$ and $E_f = E_L^{ma}$.

With equation 9.3 the evolution between S2 and S3 can be characterised by the ratio between the bending modal frequencies at S3 and the bending modal frequencies at S2:

$$\frac{f_{bend,S3}}{f_{bend,S2}} = \frac{\sqrt{\frac{E_{eq} I_{eq}}{\rho_{eq} S_{eq}}}}{\sqrt{\frac{E_L^{ma} I_{S2}}{\rho^{ma} S_{S2}}}} \tag{9.9}$$

9.3.3.2 Torsional vibrations

As equation 9.4 states, the definition of equivalent shear modulus G_{eq}, density ρ_{eq}, polar moment of area $I_{tors,eq}$, and torsional constant $J_{tors,eq}$ is required in order to know the torsional frequencies of the composite beam. ρ_{eq} is defined in section 9.3.3.1. $I_{tors,eq}$ and $J_{tors,eq}$ are simply obtained with the definitions of section 9.3.1.2 for a rectangular cross-section beam of width w_{S3} and total height $h_{S3,f} + h_{S3,n}$.

The torsional vibrations of interest occur around axis e_1. Then the sought equivalent shear modulus is $G_{eq} = G_{12}$ with respect to the common coordinate system (e_1,e_2,e_3). G_{eq} is expressed as a function of G_{LR}^{ma} and G_{LT}^{eb}, according to the local coordinate systems of the neck and the fingerboard. The equivalent shear modulus G_{eq} is given by [Halpin & Kardos 1976]:

$$G_{eq} = G_n \frac{1 + \eta \hat{V}_f}{1 - \eta \hat{V}_f} \tag{9.10}$$

with

$$\eta = \frac{\frac{G_f}{G_n} - 1}{\frac{G_f}{G_n} + 1} \tag{9.11}$$

where $G_f = G_{LT}^{eb}$ and $G_n = G_{LR}^{ma}$ with the values of table 9.5 in appendix 9.7.

According to equation 9.4, the theoretical frequency ratio between torsional modal frequencies at S3 and torsional modal frequencies at S2 is then:

$$\frac{f_{tors,S3}}{f_{tors,S2}} = \frac{\sqrt{\frac{G_{eq} J_{tors,S3}}{\rho_{eq} I_{tors,S3}}}}{\sqrt{\frac{G_{LR}^{ma} J_{tors,S2}}{\rho^{ma} I_{tors,S2}}}} \tag{9.12}$$

9.3.4 Raw guitars to fully-equipped guitars (S5 → S6)

Two main changes occur between S5 and S6. First S6 introduces some pre-stress in the structure with the presence of strings attached at playing tension. This pre-stress was shown in a previous work [Le Carrou *et al.* 2010] not to have a significant influence on the modal frequencies of the structure. This is checked in appendix 9.8.

S6 can be viewed as a stage of adding mass to the structure. Indeed, during S6, the lutherie modifications are: the mounting of the hardware (pegs, bridge, pickguard), the mounting and wiring of the electronic parts (pickup, pots, capacitors, cables, jack base), and of course the mounting of the strings. Additional mass may have a different influence on the neck, body, or global modes depending on its distribution on the structure. We make the rough assumption that the mass is homogeneously distributed, so

that it is expected to lower the modal frequencies of the structure, as the modal frequencies are inversely proportional to the square root of the mass. An estimate of the additional mass Δm is given by the comparison between the masses of guitars in S5 and S6 (figure 9.5). Assuming that only additional mass and no additional stiffness appears at S6, and that the structure modes can be approximated by simple mass-spring systems, the evolution from S5 to S6 can be tentatively described by the theoretical ratio between modal frequencies at S5 and modal frequencies at S6:

$$\frac{f_{S6}}{f_{S5}} = \sqrt{\frac{m}{m + \Delta m}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{\Delta m}{m}}} \tag{9.13}$$

where m is the mean mass of the 11 guitars at S5, and Δm is the difference between m and the mean mass of the guitars at S6.

9.4 Measuring the making process

9.4.1 Experimental protocol

The measurement of the impulse response at typical points where string and structure couple is relevant for the study of the sound of a string instrument [Gough 1981]. Furthermore, it has been shown that out-of-plane (along axis e_3 of figure 9.2) measurements are sufficient for the characterisation of string/structure coupling in the case of the solid body electric guitar [Fleischer & Zwicker 1999; Paté *et al.* 2014c].

Standard driving-point impulse response measurements of the "freely supported" vibrational modes of the measured objects supported on elastic straps are made using a PCB impulse hammer and accelerometer. The excitation spectrum is flat up to 1000 Hz, so that the accelerometer signal represents directly the impulse response of the structure.

The measurements are designed to be reproducible at any time by a luthier in his workshop, during the making process. In order to not disturb the making process, only a few measurement points are investigated. They are shown in figure 9.1. In order to obtain information on both bending and torsional modes, measurements are done on the 1st-string side of the string attachment point, close to the bridge (point B for S4) or to the nut (point A for all other stages). The mass of each measured object is also recorded.

9.4.2 The ESPRIT method

It is known that in the linear case, the impulse response of the structure can be written as a sum of damped sinusoids [Ewins 1984]. This suggests the use of the ESPRIT method [Roy *et al.* 1986], that has already been successfully used for measurements on musical instruments' structures [Elie *et al.* 2013].

The impulse response writes as:

$$h(t) = \sum_{k=1}^{K} a_k sin(2\pi f_k t + \phi_k) e^{-2\pi f_k \xi_k t} \tag{9.14}$$

where, for the kth component, a_k, f_k, ξ_k, and ϕ_k are the modal amplitude, frequency, damping ratio, and phase respectively. K is simply the number of components in the frequency range of interest.

The present use of the ESPRIT algorithm is inspired by [Le Carrou *et al.* 2009; Paté *et al.* 2014c]. From a 3-second impulse response, the principal modal frequencies are derived. The signal is then filtered by a high-Q-filter around each individual resonance. The ESPRIT algorithm is used to extract accurate values

for both modal frequencies and damping ratios.

For each mode and each production stage, having identified the frequencies f_k and damping ratios ξ_k of all objects, the mean values $\bar{f}_{k,exp}$ and $\bar{\xi}_{k,exp}$ are computed, as well as the standard deviations $\sigma_{f,k}$ and $\sigma_{\xi,k}$.

The above measurements at 1 point provide a quick, *in situ*, and non-disturbing way of tracking modal frequencies of individual instruments at each stage of construction. However, such measurements do not identify the associated mode shapes, which can be obtained by finite-element modeling. In practice, mode tracking can only be confidently achieved if the modes are shown to have the same mode shapes.

9.4.3 Finite-element model

Finite-element computations have been used to identify the shapes of the measured modes. The finite-element mesh, model, and solving are made with the software CAST3M [software website 2014]. For each stage, an exact geometry of the object being measured is used. This exact geometry comes from the drawings of the guitars supplied by the luthiers. The same geometry is used for S5 and S6. Prismatic elements are used. The exact geometry is made of 8825, 7009, 15208, 9084, and 24292 elements for S1, S2, S3, S4, and S5/S6 respectively. The finite-element model takes into account the orthotropy of the woods and the woodcuts (flatsawn or quartersawn). The gluing of separated parts (neck and fingerboard, neck and body) has been modelled by imposing a similar displacement to the nodes of the corresponding separated parts that spatially coincide.

The densities ρ are measured on wood samples. Because the measurement protocol aims at being easily and quickly reproducible for example by a luthier in his workshop, no identification of other wood parameters was done on the very woods of the study. The wood mechanical parameter identification is beyond the scope of this paper: the only goal of the present finite-element model is to give an information on the modal shapes and their order of appearance. Experimental to numerical modes matching is based on computed frequency ratios, which are relatively insensitive to variations in physical properties. Hence the material properties of the woods (mahogany and ebony) are taken from the literature: [Guitard 1987] for all mechanical constants except E_L for ebony that is taken from [CIRAD 2014]. All mechanical parameters used for the FEM simulation are listed in appendix 9.7.

9.5 Results

This section first explains how the mode shapes are inferred from the numerical results to the experimental results. Then, the experimental mean frequencies are compared to the frequencies obtained with the analytical model in section 9.5.2. Finally, values and mean values of modal frequency, mass, and modal damping ratios are used in sections 9.5.3, 9.5.4, and 9.5.5.

9.5.1 Matching experimental identification to numerical simulation

For each measurement stage, the finite-element simulation provides a modal basis (frequencies and shapes) of a conservative system. Because of the expected difference between the wood mechanical properties used for the numerical simulation and the ones of the woods used for the present guitars, the modal frequencies of the simulation and of the measurements differ. However, because of the geometry, the modes are expected to appear in the same order, with identical frequency ratios f_k/f_1, where f_1 is the lowest modal frequency.

Details on the comparison of modal frequencies and modal frequency ratios between numerical simulations and experimental measurements are given in tables 9.2 (for S1 to S4) and 9.3 (for S5 and S6).

Experimental mean frequency ratios $r_{exp} = \bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$ are compared with numerical frequency ratios $r_{num} = f_{num}/f_{num,1}$: if for one given mode, the experimental frequency ratio is close to the numerical one, then the experimental modal frequency $\bar{f}_{exp}$ is matched to the modal frequency f_{num} obtained by simulation, and the corresponding numerically-obtained mode shape is associated to the experimental mean modal frequency. The relative error between the ratios r_{num} and r_{exp} is also given, in order to assert the quality of the matching between experiment and simulation. This relative error is defined as $|r_{exp} - r_{num}|/r_{num}$.

Tables 9.2 and 9.3 show good agreement in general between simulation and experiment. Hence the mode shapes from the simulation correspond to the modal frequencies from the experiment. The identified mode shapes are shown in figure 9.4 presenting the modal frequency tracking.

Note that the torsional mode at S1 and the torsional neck mode at S6 are not shown in figure 9.4 because no agreement between simulation and experiment was found to be good enough for a clear mode shape identification.

Now that it is possible to associate mode shapes to experimentally-identified modal frequencies, the model of section 9.3 can be compared to the experimental results.

Table 9.2: Stages 1 to 3 (necks) and 4 (bodies): comparison of the modal frequency ratios obtained by finite-element simulation and experiment. For each mode, a modal frequency ratio is defined as the ratio of the modal frequency and the lowest modal frequency. The relative error between the experimental $\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$ and the numerical $f_{num}/f_{num,1}$ frequency ratios is also given.

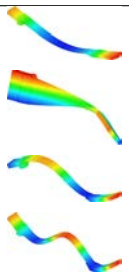
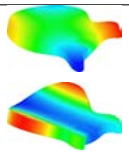
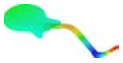
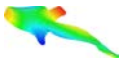
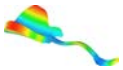
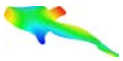
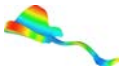
	FEM			Experiment		
Stage	Mode shape	f_{num} (Hz)	$f_{num}/f_{num,1}$	$\bar{f}_{exp}$ (Hz)	$\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$	Rel. error
1		111.01	1	160.51	1	–
		302.42	2.72	423.67	2.64	3%
		589.58	5.31	816.21	5.09	4%
2		108.66	1	117.93	1	–
		295.95	2.72	274.14	2.32	15%
		305.09	2.81	331.37	2.81	0%
		598.23	5.51	642.57	5.45	1%
3		136.97	1	152.70	1	–
		332.63	2.43	364.79	2.39	2%
		342.81	2.50	410.17	2.69	8%
		680.29	4.97	709.37	4.65	6%
4		622.69	1	576.00	1	–
		678.19	1.09	726.93	1.26	16%

Table 9.3: Stages 5 and 6 (whole guitars): comparison of the modal frequency ratios obtained by finite-element simulation and experiment. For each mode, a modal frequency ratio is defined as the ratio of the modal frequency and the lowest modal frequency. The relative error between the experimental $\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$ and the theoretical $f_{num}/f_{num,1}$ frequency ratios is also given.

	FEM			Experiment		
Stage	Mode shape	f_{num} (Hz)	$f_{num}/f_{num,1}$	$\bar{f}_{exp}$ (Hz)	$\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$	Rel. error
5		63.74	1	69.27	1	–
		195.54	3.07	200.18	2.89	6%
		238.99	3.75	266.79	3.85	3%
		430.19	6.75	424.54	6.13	9%
		645.33	10.13	681.54	9.84	3%
		681.93	10.70	782.25	11.29	6%
6		63.74	1	57.64	1	–
		195.54	3.07	172.25	2.99	3%
		430.19	6.75	395.16	6.86	2%
		645.33	10.13	562.48	9.76	4%
		681.93	10.70	688.56	11.95	12%

Note that the torsional mode of the neck is not identified at S1, and that the 3rd mode of S5 is not identified either at S6.

9.5.2 Comparison of analytical models and measurements for the evolution of modal frequencies

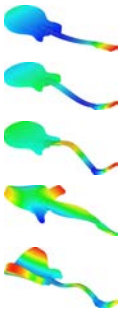
The models of section 9.3 are compared to the measurements. For the experiment, ratios are computed between the mean modal frequencies $\bar{f}_{exp}$ at some production stage and the mean modal frequencies at the previous stage: these will be called "experimental ratios" in the following. They are compared to the computed ratios from the models of section 9.3. All "theoretical" values for the models are listed in tables 9.5 and 9.6 in appendix 9.7.

9.5.2.1 From S1 to S2

Inserting the values of table 9.6 (appendix 9.7) in equation 9.6, the theoretical frequency ratio between S2 and S1 is found to be equal to 0.92. For each identified neck mode, table 9.4 shows the theoretical and experimental frequency ratios between S2 and S1. The relative error between theoretical and experimental frequency ratios is also given.

As it can be seen in table 9.4 (appendix 9.7), the decrease in frequency between S1 and S2 is predicted by this simple model. The 14% to 20% relative error may be partly due to the geometrical simplifications for the simulation, and is twice larger than the inter-guitar variability (see section 9.5.3).

Table 9.4: For stage transitions S1 to S2, S2 to S3, and S5 to S6, comparison of experimentally-identified ratios of mean modal frequencies $\bar{f}_{exp}$ and theoretical f_{theo} modal frequency ratios for all identified modes. Experimentally-identified ratio is computed from the mean value among the measured objects at each stage. The relative error between the experimental and theoretical ratios is indicated.

	Mode shape	$f_{S2,theo}/f_{S1,theo}$	$\bar{f}_{S2,exp}/\bar{f}_{S1,exp}$	relative error (%)
S1 → S2		0.73	0.92	20
		0.78	0.92	15
		0.79	0.92	14
	Mode shape	$f_{S3,theo}/f_{S2,theo}$	$\bar{f}_{S3,exp}/\bar{f}_{S2,exp}$	relative error (%)
S2 → S3		1.23	1.29	5
		1.09	1.33	22
		1.23	1.24	1
		1.23	1.10	10
	Mode shape	$f_{S6,theo}/f_{S5,theo}$	$\bar{f}_{S6,exp}/\bar{f}_{S5,exp}$	relative error (%)
S5 → S6		0.91	0.83	9.1
		0.91	0.86	6.0
		0.91	0.93	1.7
		0.91	0.83	9.8
		0.91	0.88	3.8

9.5.2.2 From S2 to S3

Inserting the values of table 9.6 (appendix 9.7) in equation 9.9, the theoretical frequency ratio between S3 and S2 for bending modes is found to be equal to 1.23. With equation 9.12, the theoretical frequency ratio between S3 and S2 for torsional modes is 1.09. For each identified neck mode, table 9.4 shows the theoretical and experimental frequency ratios between S3 and S2. The relative error between theoretical and experimental frequency ratios is also given.

Table 9.4 shows good agreement between the composite beam model and the measurements for bending modes. The composite beam model predicts well the frequency changes that occur when gluing a fingerboard to a neck. A greater relative error between the model and the experiment is found for the torsional mode. This can be explained by the fact that the torsional mode identification at S2 is not as good as the bending modes one (see table 9.2).

9.5.2.3 From S5 to S6

The mass added between S5 and S6 is: $\bar{m}_{S6} - \bar{m}_{S5} = 0.56$ kg. According to equation 9.13, the theoretical frequency ratio due to the additional mass of the hardware and electronics is: 0.91. For each identified neck mode, table 9.4 shows the theoretical and experimental frequency ratios between S5 and S6. The relative error between theoretical and experimental frequency ratios is also given. Table 9.4

shows good agreement between the analytical model and the experiment. The mass-dependency of the modal frequencies explains the frequency change between S5 and S6. Note that for all this paragraph, the frequency ratios have been rounded, this explains that apparently similar frequency ratios give different relative errors (for example the 1st and 4th guitar modes in table 9.4).

9.5.3 Modal frequency tracking

Figure 9.4 presents an overview of modal frequency tracking during the making process. For S1 to S3, as well as S5 to S6, modes are connected together with a solid red line if they have the same modal shape. Although the geometry substantially changes between the separated parts and the whole guitars, some connections between modes of S3 or S4 and modes of S5 can be identified: they are shown with red dashed lines. First, the mass and moment of inertia of the body change the boundary conditions at the end of the neck beam, resulting in the transformation of freely-supported neck modes into modes of the assembled instruments. This is what happens with the three lower freely-supported neck modes. For modelling purposes, note that the end conditions provided by the body to the neck at S5 are a bit more complicated than fixed-free beam conditions. Indeed fixing one end of the beam is expected to decrease the frequencies, whether it concerns bending or torsional beam modes [Morse & Ingard 1986]. This is experimentally checked for the torsional neck mode, but not for the neck bending modes. Further investigations about identifying the end conditions due to the junction of the neck to the body would be very interesting. Second, the bending and torsional modes of the body couple to the freely-supported neck modes having close frequencies and sharing the same symmetric or anti-symmetric shape about the lengthwise axis (e_1). Modes of the separated parts and modes of the whole structure can then be tentatively connected.

In figure 9.4, the trends predicted by the analytical model in section 9.5.2 can still be clearly observed: the mean modal frequencies $\bar{f}$ (red crosses) decrease from S1 to S2, increase from S2 to S3, and decrease between S5 and S6.

For all modes at all stages, we define the “variability” of modal frequencies around the mean modal frequency $\bar{f}$ as twice the standard deviation: $2\sigma_f$. In figure 9.4, the quantity $2\sigma_f$ (σ_f below and above $\bar{f}$) is represented as a solid red line between two red circles. $2\sigma_f$ is also expressed as a percentage of $\bar{f}$: this is the normalised variability $2\sigma_f/\bar{f}$ indicated in red alongside each mode. In this paper, since the number of objects is relatively small, the standard deviation is rather to be understood as a measure of spread around a mean value than as the classic statistical tool.

The main cause of inter-objects variability at S1 is the wood. With the exception of the lowest mode, this variability seems to be lowered for the neck modes at S2: the luthiers’ skills of shaping the necks may make different objects converging towards a common behaviour. On the other hand, except for the 1st neck mode, S3 expands the variability of the neck modes at S2, in such a way that the original (at S1) variability is found again. S3 consists in fitting each neck with a fingerboard, 22 frets, a truss-rod and some glue: each of those extra items come from a set having its own variability, hence it may provide some extra variability among the necks of S3.

Figure 9.4 shows a decrease in the inter-objects normalised variability in whole guitar modal frequencies between S5 and S6 for the 1st, 5th, and 6th guitar modes (mode numbering at S5). On the contrary, this variability seems to increase for the 2nd and 4th guitar modes. It is possible that the final lutherie step of mounting the hardware to the guitar includes some adjustment from the luthier. Different luthiers could be able to reach a consensus in the guitar adjustment, so that some modal frequencies converge to some "optimal" value. This deserves further investigation. Since S6 involved only 4 guitars, the interpretation of standard deviations and variability should be treated with some care.

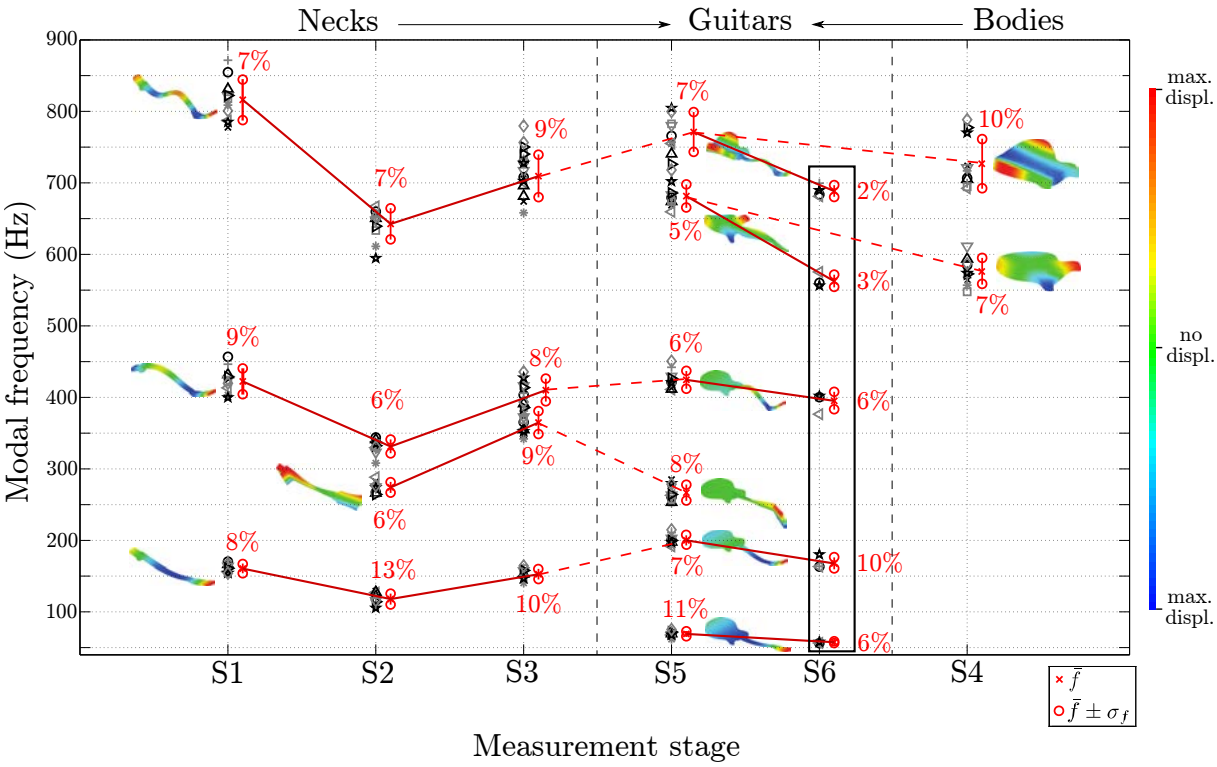


Figure 9.4: Mode tracking during the whole making process: modal frequency versus measurement stage. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean values $\bar{f}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_f/\bar{f}$ is indicated as a percentage of $\bar{f}$. The mode shapes are shown alongside the corresponding markers. Solid red line indicate modes being well tracked between two measurement stages. Red dashed lines indicate supposed relationships between separated parts (necks of S3, and bodies of S4) and whole guitars.

9.5.4 Mass variability

9.5.4.1 Mass tracking

The mass tracking is represented in figure 9.5. The various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean mass values $\bar{m}$, and the red circles indicate the typical mass variability defined as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each stage, percentages in red present the normalised mass variability $2\sigma_m/\bar{m}$. The variability keeps unchanged between S1 and S2, and decreases with S3. The latter production stage may involve some handcraft work (adjusting the neck to receive the fingerboard, adjusting the neck groove to receive the truss-rod, etc.) that leads to closer shapes and volumes, hence closer masses among the equipped necks. The $2\sigma_m/\bar{m}$ value is the same at S5 as at S3, and of the same order of magnitude at S4 and S5: the mass variability is preserved at the transition between separated parts and whole guitars. Note that only two guitars were weighed at S6, so no interpretation is proposed for this production stage. However, the mass variability is expected to be preserved between S5 and S6 because of the small mass variability expected for the industrial objects added at S6: pickups (made of plastic and metal), bridge (made of metal), and other hardware (mainly made of metal). No individual tendencies are noticed from S1 to S3: the ordering by masses of the different guitars (each having its own black or gray marker) changes from S1 to S3. On the contrary, heavier bodies at S4 seem to correspond to heavier whole guitars at S5. This seems reasonable, because the 3 production stages for the neck involve substantial structure changes, and because the bodies are at least 5 times heavier than the necks. Furthermore, a heavy (resp. light) mass for a single guitar or separated part (figure 9.5) is not consistently related to lower (resp. higher) modal frequencies (figure 9.4).

9.5.4.2 A link between the frequency variability and the mass variability

We take the example of S1, for ease-of-calculation reasons. Assuming that the neck of S1 is a beam, equation 9.2 can be re-written into:

$$f_{bend,n} = \frac{\pi\beta_n^2}{2}\sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^3}} \tag{9.15}$$

The frequency change induced by only a mass variation σ_m is:

$$\frac{\Delta f_n^m}{f_{bend,n}} = \frac{|f_{bend,n}^{\uparrow,m} - f_{bend,n}^{\downarrow,m}|}{f_{bend,n}} \tag{9.16}$$

where:

$$\begin{aligned} f_{bend,n}^{\uparrow,m} &= \tfrac{\pi\beta_n^2}{2}\sqrt{\tfrac{EI}{(\bar{m}+\sigma_m)L^3}} \\ f_{bend,n}^{\downarrow,m} &= \tfrac{\pi\beta_n^2}{2}\sqrt{\tfrac{EI}{(\bar{m}-\sigma_m)L^3}} \end{aligned} \tag{9.17}$$

Taking the mass values of figure 9.5 and the other values in appendix 9.7, a frequency change induced by only a variation in mass is expected to be $\frac{\Delta f_n^m}{f_{bend,n}} = 3\%$, which is three times smaller as the actually observed ratio $\frac{2\sigma_f}{\bar{f}}$, ranging from 7% to 9% (figure 9.4). That means that the mass variation is not the only responsible for the modal frequency variation.

The width w, height h and length L were not measured at each production stage, so only a rough estimation of the frequency variation dependence on these parameters can be done. Luthiers report that

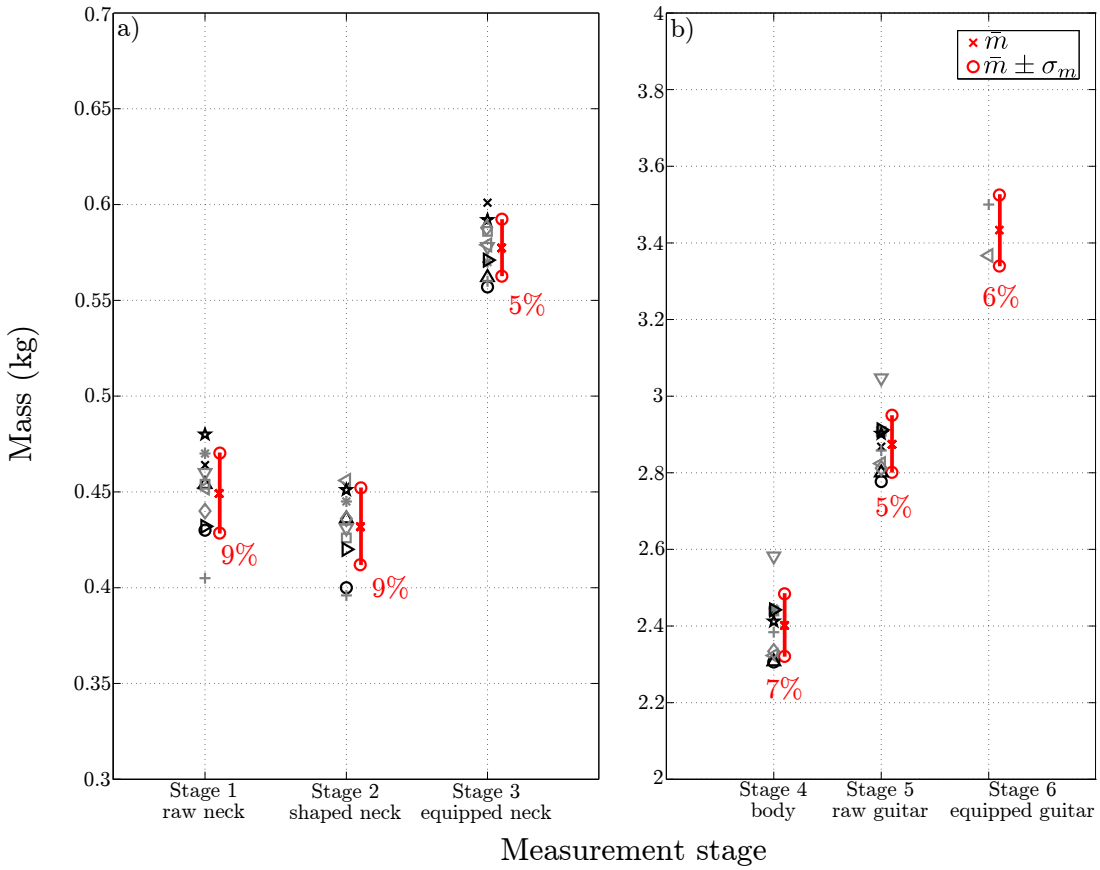


Figure 9.5: Masses of the measured objects, for each measurement stage. a) Stages involving the neck only. b) Stages involving either the body or the whole guitar. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean values $\bar{m}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each stage, percentages in red present the normalised variability $2\sigma_m/\bar{m}$ as a percentage of the mean mass $\bar{m}$.

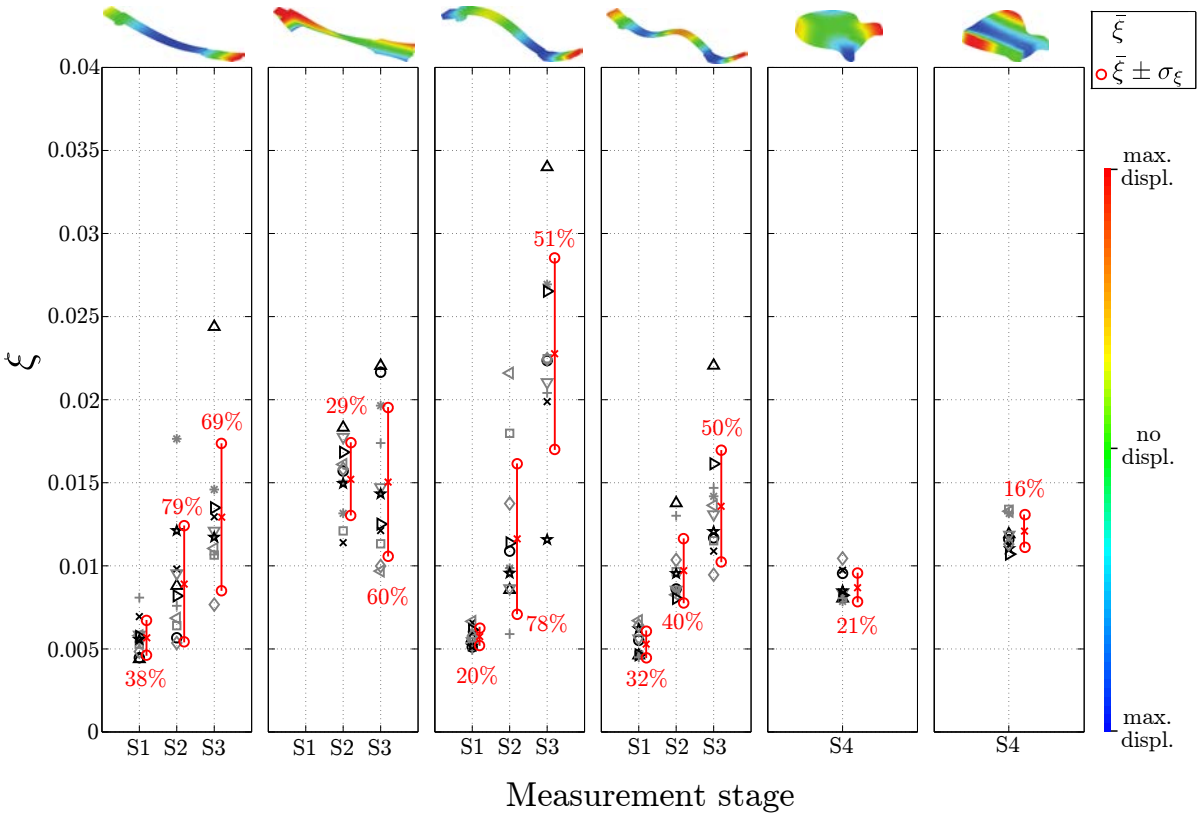


Figure 9.6: Modal damping tracking for the separated necks and bodies. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean value $\bar{\xi}$, red circles indicate the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_\xi/\bar{\xi}$ is indicated as a percentage of $\bar{\xi}$. The mode shapes are shown above the corresponding modes.

the machines and tools they used have a 0.5 mm tolerance (the same template was used by every luthier). The same calculation as above gives $\frac{\Delta f_n^L}{f_{bend,n}} = 0.1\%$ and $\frac{\Delta f_n^I}{f_{bend,n}} = 7\%$: the modal frequencies may be more sensitive to variations of I than to mass variations, and length variations might be of second importance.

9.5.5 Modal damping tracking

Modal damping ratios have also been identified for all modes on the measurements. Because modal damping ratios are associated with the modal frequencies that have already been tracked, a modal damping tracking is straightforward and can be of some interest for the derivation of some future modelling.

Figures 9.6 and 9.7 present an overview of modal damping tracking during the making process. For the modal damping tracking, the modes involving either the neck only or the body only (figure 9.6) are separated from the modes involving the whole guitar (figure 9.7), for clarity reasons. In figures 9.6 and 9.7, the mean modal damping ratios $\bar{\xi}$ are indicated with a red cross. The variability of damping ratios $2\sigma_\xi$ around the mean damping ratio $\bar{\xi}$ is indicated with red solid lines with red circle ends. The variability $2\sigma_\xi$ is also shown as a percentage of $\bar{\xi}$ alongside each mode.

The higher the stage number (the further the making process), the higher the mean damping ratio for neck bending modes, as seen in figure 9.6. This is to be qualified with the following observation: the variability of modal damping ratios $2\sigma_\xi$ are often of the same order of magnitude as the mean damping

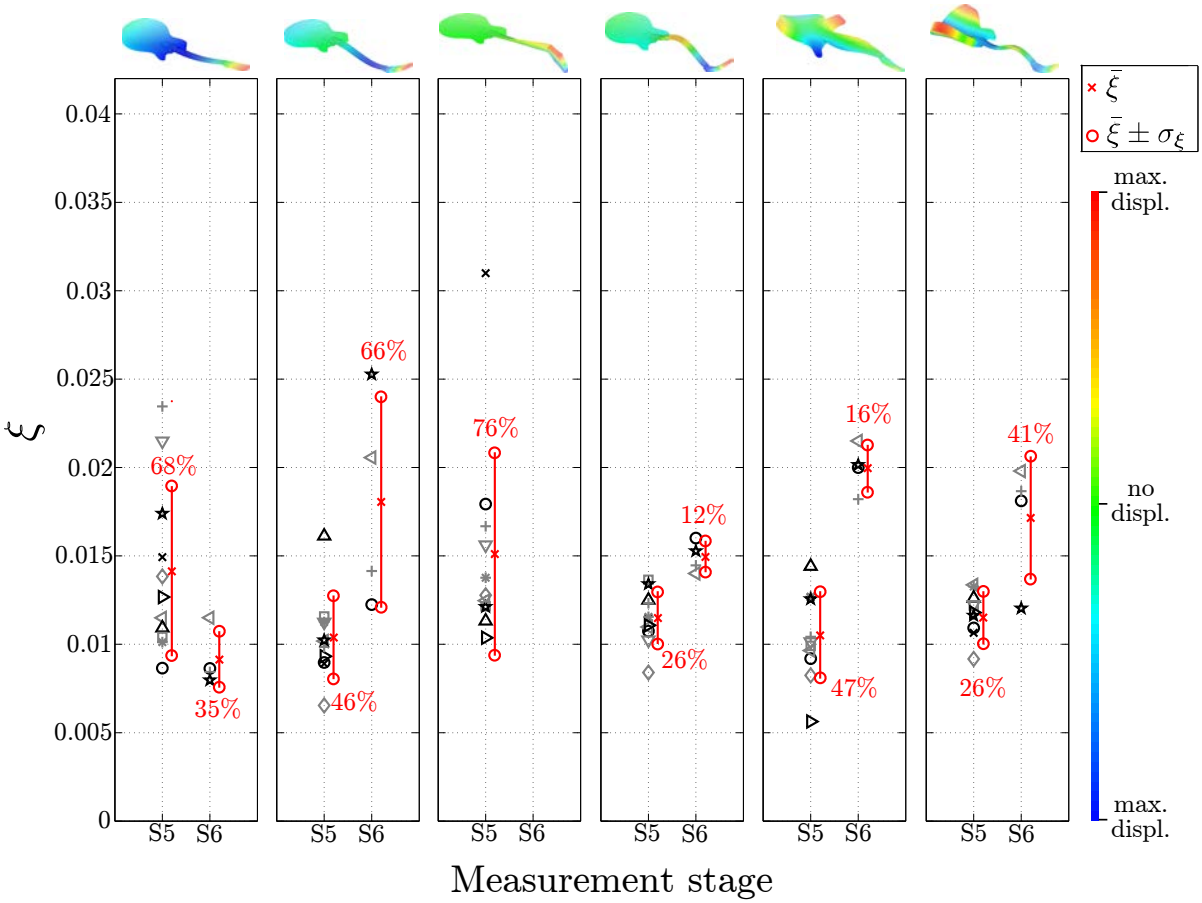


Figure 9.7: Modal damping tracking for the assembled guitars. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean value $\bar{\xi}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_\xi/\bar{\xi}$ is indicated as a percentage of $\bar{\xi}$. The mode shapes are shown above the corresponding modes.

ratios $\bar{\xi}$, as illustrated in figure 9.6.

However, it can be noticed that all neck modes show an inter-objects variability in damping ratios that increases between S1 and S2. This can be explained by the nature of S2: a lot of hand work is involved. Between S2 and S3, a certain amount of new materials (frets, fingerboard wood, glue, truss-rod) added to the neck could explain the variations in damping ratios. These can significantly alter the structure and its damping ratio, in as many ways as the number of luthiers.

Body mode damping ratios can not be tracked, because only one measurement stage dealt with the body alone. But it can be seen that the damping ratios of the separated body are of the same order of magnitude as the damping ratios of the separated necks, with a lower inter-objects variability.

Figure 9.7 shows that for all but the first whole guitar modes, the modal damping ratio increases at S6. An explanation to that fact is the presence of extra material (electronics, pegs, bridge, etc.) providing additional damping to the structure. No trend in the inter-objects damping ratio variability can be seen. The modal damping tracking shows various trends that have to be further studied in future works.

9.6 Conclusion

Vibratory measurements have been carried out on necks and guitars during the making process of 11 solid body electric guitars. These guitars were made of the same raw materials, with the same tools, machines, and specifications. Each of the guitar was made by a different luthier. The making process is thus quite atypical. Care should then be taken with the conclusions drawn from measurements on these guitars.

A method has been described to identify and track the modes throughout the production stages. There are systematic trends in the modal frequencies from one measurement stage to another: neck modal frequencies consistently decrease from S1 (raw necks) to S2 (shaped necks), and increase from S2 to S3 (neck and glued fingerboard); guitar modal frequencies decrease from S5 (raw guitars) to S6 (fully-equipped guitars). These systematic trends from one stage to another are related to changes in mechanical and geometrical parameters. Simple mechanical models can predict theses trends in modal frequencies. The changes in cross-sectional area and second moment of area between S1 and S2 partly explains the modal frequency decrease. The modelling of S3 by a composite beam predicts with good accuracy the frequency shift between S2 (shaped neck modelled as a simple beam) and S3 (neck with fingerboard modelled as a composite beam). The frequency decrease between S5 and S6 is well anticipated by the knowledge of the additional mass of electronic parts and hardware.

The variability between each of the 11 objects at each production stage was investigated. Inter-objects variability can have two causes: the guitar maker, and the wood. Inter-object variability in modal damping ratios is found to be very high and significantly changing throughout the making process. This can be explained by the wood intrinsic variability, or by hand tasks like the assembly of separated parts.

The inter-object variability in mass is globally preserved throughout the making process: the mass variability observed for separated parts is the same as the mass variability observed for the whole guitars. No clear link between a high (resp. low) mass and low (resp. high) modal frequencies has been found. Nevertheless, it has been shown that the observed mass variability is responsible for the half of the observed modal frequency variability. The other half is likely due to the variability in mechanical parameters, and to small geometrical differences between parts or guitars.

Variability in modal frequencies exhibits clearer trends. S1 and S3 exhibit similar inter-object variability in modal frequencies. S2 and S6 seem to reduce the variability, in comparison with S1 and S5. S1 and S3 come at points of the making process where either the wood is raw, or some extra wood is added to the structure: the variability in frequencies is very likely due mainly to the wood intrinsic variability. S2 and S6 are results of tricky and precise handwork by the luthiers (neck shaping, guitar adjusting): the variability in frequencies is presumably due to the guitar maker. At S2 and S6, each luthier adjusted his own neck or guitar, making the modal frequencies converge, that is, making the variability in frequencies lower.

Taking into account the fact that only string/structure coupling at the neck matters for the sound of the solid body electric guitar, the vibratory behaviour of the whole guitar could be eventually seen as a kind of fixed-free beam with related frequencies. Further investigations about the relationship between frequencies of separated parts and of the whole guitar should be done. An expected result is the prediction of the behaviour of the final guitar with only one measurement on the neck at the very beginning of the making process, with the knowledge of the variability. This can be of great help for luthiers and manufacturers, for example to make a selection of suitable necks at the beginning of the making process. This would additionally require the knowledge of the expected vibratory behaviour of the final instruments. A possible strategy would be to select guitar modal frequencies that minimise the chance of coupling with the strings [Paté *et al.* 2014c]. Further investigations in that sense should be done.

Table 9.5: Material properties of mahogany (used for the body and the neck) and ebony (used for the fingerboard). Superscript *ma* (resp. *eb*) refers to mahogany (resp. ebony). Densities are measured on sample woods, all other properties are taken from the literature [Guitard 1987] for all mechanical constants except E_L for ebony that is taken from [CIRAD 2014].

Mahogany		Ebony	
E_L^{ma}	11.60×10^9 Pa	E_L^{eb}	15.50×10^9 Pa
E_R^{ma}	1.24×10^9 Pa	E_R^{eb}	$E_L^{eb}/8$ Pa
E_T^{ma}	0.74×10^9 Pa	E_T^{eb}	$E_L^{eb}/13.5$ Pa
$G_{LR^{ma}}$	1.00×10^9 Pa	G_{LR}^{eb}	1.26×10^9 Pa
G_{RT}^{ma}	0.33×10^9 Pa	G_{RT}^{eb}	0.37×10^9 Pa
G_{LT}^{ma}	0.76×10^9 Pa	G_{LT}^{eb}	0.97×10^9 Pa
ν_{LR}^{ma}	0.39	ν_{LR}^{eb}	0.39
ν_{LT}^{ma}	0.46	ν_{LT}^{eb}	0.46
ν_{RT}^{ma}	0.67	ν_{RT}^{eb}	0.67
ρ^{ma}	528 kg.m^{-3}	ρ^{eb}	1180 kg.m^{-3}

9.7 Appendix 1: Data and computed values for the models and simulation

This appendix gives the data used for the models and numerical simulations. Table 9.5 lists the material and mechanical properties of mahogany and ebony. Densities are measured, other mechanical parameters are taken from the literature.

Table 9.6 sums up the geometric and mass data and associated computed values that are used for the model of section 9.3.

9.8 Appendix 2: Comparison between unstrung and strung guitar

With the method described in section 9.4, modal frequencies and dampings were identified for 3 modes of one guitar in the two following cases: with strings attached at playing tension ("strung"), and without strings ("unstrung"). Table 9.7 shows these identified modal frequencies and dampings.

As it can be seen in table 9.7, the pre-stress due to the strings do not change the modal frequencies (nor the modal dampings) in a significative way.

Acknowledgements

The authors warmly thank the electric guitar luthiers at Itemm: Jérémy Bart, Damien Chattelard, Clovis Cruchet, Emeric Delcamp, Héloïse Dubrulle, Julien Dupont, Nicolas Gamond, Guillaume Gauny, Florent Guesdon, Maxime Jan, and Nicolas Pinateau. Thanks go as well to their supervisors Fred Pons, Yann-David Esmans, and Pierre Terrien. The stimulating collaboration between Itemm and the LAM team at Institut Jean Le Rond d'Alembert is the work of Vincent Doutaut: many thanks to him.

Special thanks are addressed to Rémi Blandin and Joël Frelat for helping with the finite-element model, and to Benoît Navarret for fruitful discussion.

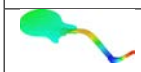
The authors would like to thank the two anonymous reviewers for their remarks allowing a substantial

improvement of the quality of this article.

Table 9.6: Data and computed values, used for the models of section 9.3. Widths w and heights h are estimated from the drawings of the guitars. Mean masses $\bar{m}$ are the mean of measured masses. Cross-sectional areas S, second moment of area I, polar moment of area I_{tors}, and torsional constants are computed from the dimensions w and h. Equivalent mechanical parameters for S3 are computed with the values of table 9.5. Bending (resp. torsional) frequency proportionality factors are the quantities to which the bending (resp. torsional) beam frequencies are proportional (see equations 9.4 and 9.5).

Stage 1	width	$w_{S1} = 5 \times 10^{-2}$ m
	height	$h_{S1} = 1.5 \times 10^{-2}$ m
	2nd area moment	$I_{bend,S1} = 1.14 \times 10^{-8}$ m^4
	cross-sectional area	$S_{S1} = 6.35 \times 10^{-4}$ m^2
	bending frequency proportionality factor	$\sqrt{\frac{I_{S1}}{S_{S1}}} = 4.2 \times 10^{-3}$ m
Stage 2	width	$w_{S2} = 5 \times 10^{-2}$ m
	height	$h_{S2} = 1.5 \times 10^{-2}$ m
	2nd area moment	$I_{bend,S2} = 7.42 \times 10^{-9}$ m^4
	cross-sectional area	$S_{S2} = 4.90 \times 10^{-4}$ m^2
	polar moment of area	$I_{tors,S2} = 1.70 \times 10^{-7}$ m^4
	torsional constant	$J_{tors,S2} = 4.57 \times 10^{-8}$ m^4
	bending frequency proportionality factor	$\sqrt{\frac{I_{S2}}{S_{S2}}} = 3.9 \times 10^{-3}$ m
	torsional frequency proportionality factor	$\sqrt{\frac{G_{LR}^{ma} J_{tors,S2}}{\rho^{ma} I_{tors,S2}}} = 712.86$ m.s^{-1}
Stage 3	width	$w_{S3} = 5 \times 10^{-2}$ m
	neck height	$h_{S3,n} = 1.5 \times 10^{-2}$ m
	fingerboard height	$h_{S3,f} = 5.5 \times 10^{-3}$ m
	equivalent Young's modulus	$E_{eq} = 1.26 \times 10^{10}$ Pa
	equivalent shear modulus	$G_{eq} = 9.92 \times 10^{8}$ Pa
	equivalent cross-sectional area	$S_{eq} = 1.0 \times 10^{-1}$ m^2
	equivalent 2nd area moment	$I_{tors,eq} = 3.59 \times 10^{-8}$ m^4
	polar moment of area	$I_{tors,S3} = 2.49 \times 10^{-7}$ m^4
	torsional constant	$J_{tors,S3} = 1.07 \times 10^{-7}$ m^4
	equivalent density	$\rho_{eq} = 708.29$ kg.m^{-3}
	bending frequency proportionality factor	$\sqrt{\frac{I_{S2}}{S_{S2}}} = 3.9 \times 10^{-3}$ m
	torsional frequency proportionality factor	$\sqrt{\frac{G_{eq} J_{tors,S3}}{\rho_{eq} I_{tors,S3}}} = 778.01$ m.s^{-1}
Stage 5	mean mass	$\bar{m}_{S5} = 2.87$ kg
Stage 6	mean mass	$\bar{m}_{S6} = 3.43$ kg

Table 9.7: Identified modal frequencies f and damping ratios ξ for 3 modes of 1 guitar in 2 cases: with strings attached at playing tension ("strung guitar") and without strings ("unstrung guitar"). The uncertainty is given with a 95% confidence interval.

	strung guitar		unstrung guitar	
mode	f (Hz)	ξ ($\times 10^2$)	f (Hz)	ξ ($\times 10^2$)
	58.40 ± 0.14	0.97 ± 0.09	58.09 ± 0.44	0.99 ± 0.05
	166.73 ± 0.68	1.57 ± 0.29	166.54 ± 0.30	1.94 ± 0.18
	378.92 ± 0.68	1.23 ± 0.42	375.79 ± 1.82	1.28 ± 0.18

Chapitre 10

Modal parameter variability in industrial electric guitar making : manufacturing process, wood variability, and lutherie decisions [1]

ABSTRACT

Recent studies showed that mechanical coupling between structure and strings can alter the sound of the solid body electric guitar. Modal frequencies and damping ratios of the structure can explain some sound differences between instruments. These vibratory parameters can vary because of lutherie decisions (*e.g.* intentionally fitting guitars with different woods for sound quality purposes), wood intrinsic variability, or making process variability. Yet the vast majority of solid body electric guitars comes from an industrial mass-production: the manufacturing process is designed for producing guitars that are the most similar possible. However, musicians and makers know that guitars of the same model both share features, and still have some individual properties. The experimental quantification of the modal parameter variability of nominally identical electric guitars in an industrial context is the aim of this article. This variability is assessed on one guitar set, and compared to other industrial objects. A second guitar set is investigated: it consists of guitars with maple or rosewood fingerboard, all other specifications being identical. This second set allows the comparison between making process and wood variability, with the variability due to an intentional lutherie decision: the change of the fingerboard wood.

1. Ce chapitre est sous la forme d'un article nommé « *Modal parameter variability in industrial electric guitar making : manufacturing process, wood variability, and lutherie decisions* », soumis pour publication au journal *Applied Acoustics* le 3 juillet 2014. Un abrégé de ce chapitre est paru sous le nom « Modal parameter variability in industrial electric guitar manufacturing » dans les actes de la conférence *International conference on noise and vibration engineering (ISMA) / Uncertainty in Structural Dynamics (USD)* 2014 à Leuven, Belgique [Paté *et al.* 2014a]

10.1 Introduction

The sound of the solid body electric guitar comes from the string velocity signal which is captured by the electromagnetic pickup, and sent through an electro-acoustical chain basically made of signal processing devices (effect pedals), an amplifier, and a loudspeaker for the sound radiation [Paté *et al.* 2012a]. Without reconsidering the importance of the electro-acoustic chain, it is reasonable to think that the mechanical behaviour of the string has an influence upon the sound of the solid body electric guitar. Even if the structure of the instrument has been designed to avoid vibrations (the "solid" body overcomes feedback problems occuring with high-volume amplification), it is still found to vibrate. Strings and structure constitute a mechanically coupled system.

The string/structure coupling has been studied for various string instruments [Valette 1995; Gough 1981; Fletcher 1977; Woodhouse 2004a]. For the special case of the solid body electric guitar, Fleischer [Fleischer & Zwicker 1998 1999] showed that the string/structure coupling is well described by the driving-point conductance value at the fretting point on the neck. A model allowing a prediction of decay time and timbre change effects from the knowledge of the conductance has been recently proposed [Paté *et al.* 2014c]. The coincidence between a string playing frequency and a structure resonance may provoke a great energy transfer from the string to the structure. The resonance of the corresponding string partial is altered, causing decay time or timbre changes. The study of the modal basis of the solid body electric guitar therefore makes sense: modal frequencies control the conductance peak positions, and modal damping ratios control the spread of the conductance peak, so the chance of coupling.

The solid body electic guitar is the first musical instrument in history to have been originally designed for a mass-production: even if numerous craftsmen have gained a solid reputation among the guitar player community, the solid body electric guitar market has been dominated by the industry for over sixty years. In this context, the question of unit-to-unit vibratory behaviour variability deserves to be explored, since some guitar players claim they can notice differences between nominally identical solid body electric guitars.

Even if their making process is highly standardised, mass-produced musical instruments can present notable differences that can be measured physically or psychologically [Meyer 1983ba; Mamou-Mani & Sharp 2010; Mamou-Mani *et al.* 2012]. However, to the knowledge of the authors, no study covering a large scale of nominally identical musical instruments has been undertaken so far. Such investigations are a particular lack in the context of the solid body electric guitar. Industrial research has been interested in quantifying the uncertainties in the vibro-acoustical behaviour of industrial products. Indeed, it is a well-known fact that nominally identical products present variations, in particular in their vibratory behaviour [Bernhard 1996]. It is also known that small variations in geometry or in assembly can lead to large variations in the final product's vibratory behaviour [Guyader & Parizet 1997]. The aim of variability studies in an industrial context is often to numerically predict the vibro-acoustic behaviour of some mass-produced products [Durand *et al.* 2008; Borello *et al.* 2008; Gagliardini *et al.* 2008]. Experimental studies are reported, for example for acoustic noise in cars originating from vibratory phenomena [Hills *et al.* 2008; Bernhard & Kompella 1993]. Some studies focused on the unit-to-unit variability of industrially-made nominally identical products: wind turbine blades [Griffith *et al.* 2006] or automotive brake calipers [Gallina *et al.* 2012] for example.

In the case of the solid body electric guitar, the variability in modal parameters can have different sources, such as the wood intrinsic variability, the industrial making process (machine tolerance, geometrical uncertainties, etc.), the lutherie decisions (different lutherie parameters, *e.g.* the wood of the fingerboard). The lutherie decisions and their influence on the modal behaviour have been previously investigated. In [Le Carrou *et al.* 2010] it was shown that different wood species for the body control differently the torsional behaviour of the neck. Another study observed different vibratory behaviours that

may be related to different neck-to-body junctions [Paté *et al.* 2012b]. The difference between ebony and rosewood fingerboard has been mechanically quantified [Paté *et al.* 2013] in terms of mean conductance value over the low- and mid-frequency range.

This article aims at experimentally quantifying the modal parameter variability of nominally identical electric guitars in an industrial context. This variability is assessed on one set of 17 guitars, and takes into account the intrinsic variability of nominally identical wood species, and the variability due to the industrial making process. A second set of 24 guitars is investigated: it consists in 10 guitars with a maple fingerboard and 14 guitars with a rosewood fingerboard, all other specifications being nominally identical. This second set is used to compare the variability due to the industrial making process and intrinsic variability of nominally identical woods, with the variability due to an intentional lutherie decision: the change of the fingerboard wood.

Section 10.2 deals with the description of the experimental material and method, as well as the vibratory measurement analysis method. The identified modal frequencies and damping ratios are presented in section 10.3. These results are then discussed in section 10.4: the unit-to-unit variability observed for electric guitars is compared to that observed for other industrial products. Then a comparison of modal parameter variability due to the making process (including wood selection) with that due to an intentional lutherie decision is proposed, using two particular guitar sets.

10.2 Experimental method

This section explains the experimental protocol and analysis method carried out on the guitars described in paragraph 10.2.1: the driving-point mobility is measured on each guitar (paragraph 10.2.2), and the modal parameters are identified from these measurements (paragraph 10.2.3).

10.2.1 The guitars of the study

The unique opportunity of measuring industrially-made electric guitars in large number has been given by one of the world's leaders in the solid body electric guitar market. Guitars in warehouse of this manufacturer are either in transit from the factory to the music stores, or sent back by customers for small aesthetic defects (wrong colour or varnish). In any case, the measured instruments are ready-to-play guitars meeting the specifications and expected quality standards of the brand. Two distinct sets of guitars are investigated:

the *Type-1* set: three versions of the model are available: the only intentional difference are the magnetic pickups mounted on the guitars. The size of the pickups, hence of the corresponding hollows in the body, is very similar. From the mechanical point of view, these guitars are therefore nominally identical. A mahogany neck with a 62.9 cm-scale length is glued to a mahogany body with maple top and single cutaway. Headstock and body are virtually symmetrical. The fingerboard is made of rosewood. Measurement are performed on 17 specimens of this model.

the *Type-2* set: two versions of the model are available. The baseline guitar is common to the two models: a maple neck with a scale-length of 64.75 cm is screwed to a maple body with double cutaway. Headstock and body are strongly asymmetrical. *Type-2* guitars are further split into two groups, depending on the fingerboard wood: 10 guitars have a rosewood fingerboard, and 14 have a maple fingerboard. The former are denoted *RN*, and the latter are denoted *MN*, the designations *rosewood neck* or *maple neck* being inaccurate but usual in electric guitar making language. For clarity reasons, the terms *Type-2 RN* and *Type-2 MN* will be replaced by the terms *RN* and *MN* in the following of this article.

10.2.2 Measurement protocol

Two kinds of measurements are carried out on each guitar. First the guitar is weighed with the industrial weighing scale avaiblable at the warehouse. This scale has a 10×10^{-3} kg precision.

Vibratory measurements are then performed. They consist in classic transfer function measurements on the structure. In order to avoid the unwanted string vibration, the strings are damped with felt during the measurements. The guitar is laid on a frame onto which elastic straps are attached. This provides boundary conditions close to free conditions above 20 Hz, which is the upper limit for rigid body modes due to the supporting structure. An impact hammer (*PCB Piezotronics 086C01*) provides an excitation force $f(t)$ to the structure, and the acceleration response $a(t)$ of the instrument is measured with an accelerometer (PCB Piezotronics 352C65). The acceleration signal is integrated, providing the velocity signal $v(t)$ of the structure. A Fourier transform of the force and velocity signals is done, giving a transfer function classically defined as the mobility:

$$Y(\omega) = \frac{V(\omega)}{F(\omega)} \tag{10.1}$$

where ω is the angular frequency. The energy transfer between string and structure is described by the driving-point conductance [Valette 1995; Fleischer & Zwicker 1998 1999; Paté *et al.* 2014c]. The conductance $C(\omega)$ is the real part of the mobility:

$$C(\omega) = \Re(Y(\omega)) = \Re\left(\frac{V(\omega)}{F(\omega)}\right) \tag{10.2}$$

The driving-point condition is obtained by excitating the structure with the hammer as close as possible to the measurement point. The co-location is then checked with the mobility phase values, that stay in the range $[-\pi/2 : \pi/2]$ in case of driving-point mobility measurements [Ewins 1984]. This is confirmed in figure 10.1 b, which presents the phase of a mobility from a measurement on one of the *Type-2* guitars. Figure 10.1 a shows the magnitude of the same mobility measurement.

End-of-chain measurements are aimed to be quick and non-damaging, particularly in the present case, where the investigated objects are guitars about to be shipped to music stores. The non-damaging constraint is addressed with the use of a soft head for the hammer. Figure 10.2 shows the excitation corresponding to the measurement shown in figure 10.1: the excitation spectrum no longer contains enough energy above roughly 800 Hz. Furthermore, the modal overlap seems to become more significant starting from this frequency, as the figure 10.1 a shows. The bandwidth of the study is then limited to an upper bound of 800 Hz. The frequency bandwidth of the study is finally [20 Hz : 800 Hz].

The issue of measurement rapidity is addressed by the restriction to only one measurement point. However, the selection of this point is not trivial: its location has to avoid the coincidence with the nodes of the modes in the frequency range of interest. A preliminary modal analysis is required both for the selection of the measurement point and for interpreting the driving-point measurements. Modal analysis methods are described in section 10.2.3.

10.2.3 Modal parameter identification

This section describes the modal analysis methods that are used in this study. First (section 10.2.3.1) the preliminary modal analysis on an experimental mesh is described, and then the method used for the driving-point measurement analysis is detailed (section 10.2.3.2).

10.2.3.1 Preliminary measurements on a mesh

It was possible to undertake a thorough study of one *Type-1* guitar and one *Type-2* guitar (assumed was that different fingerboard woods do not change the modes' order of appearance, and that they induce

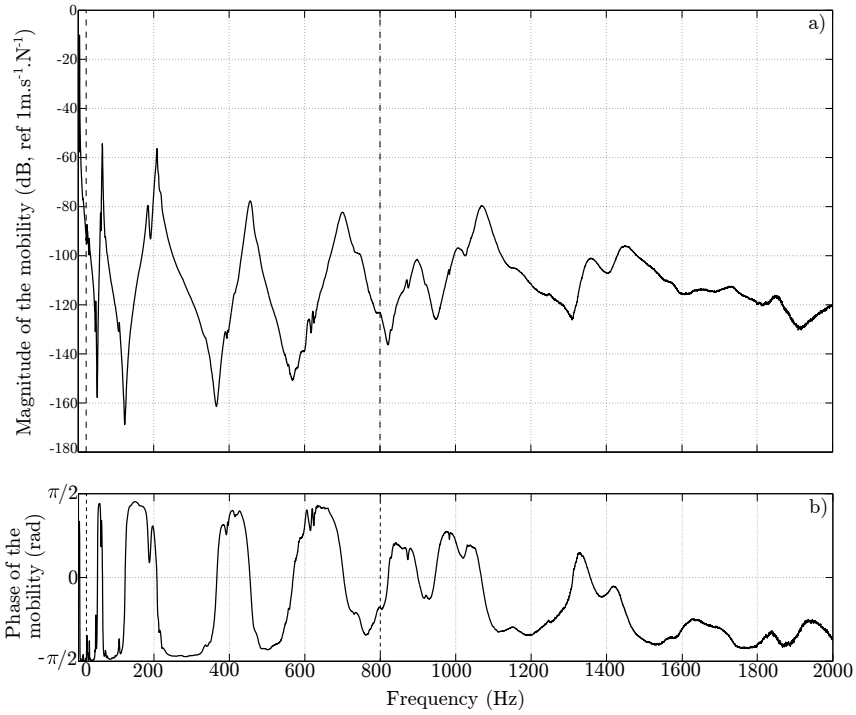


Figure 10.1: Mobility measurement on one *Type-2* guitar. a) Magnitude in dB scale normalised to 1 m.s^{-1}.N^{-1}. b) Phase. The thick black dashed lines indicate the frequency bandwidth of the study [20 Hz : 800 Hz].

small modal frequency changes). A modal analysis is carried out on these two guitars: transfer functions are measured on an experimental mesh (47 measurement points for the *Type-1*, 51 measurement points for the *Type-2*), and then analysed with the least-square complex frequency (LSCF) method implemented in the software MODAN [Piranda 2001]. Experimental meshes are shown in figures 10.3 and 10.4.

In order to assert the validity of a modal identification, the measured and synthesised frequency response functions are usually compared. Figure 10.5 shows an example of such a comparison between measured accelerance (ratio in the frequency domain between the acceleration of the structure and the excitation force) and synthesised accelerance, for the example of the sample *Type-1* guitar.

Figure 10.5 is a typical example of a modal identification performed by MODAN. The dashed line curve is the measured accelerance, the solid line curve is the synthesised accelerance after modal identification with the LSCF method. No satisfactory identification could be done for the highly-damped peaks at 420 Hz and between 520 Hz and 650 Hz. The mode near 100 Hz is identified when running the LSCF algorithm over a reduced frequency range centered around the accelerance peak. Some unevennesses on the measured accelerance curve can be noticed and attributed to "parasitic" vibrations, like those of the strings or pegs, that have not been removed in order to keep the adjustment made by the luthiers. No additional information would be given by the showing of the same kind of measurement/synthesis comparison for the sample *Type-2* guitar: exactly the same phenomena are acting, observed, and identified.

Good agreement is found between the measured and the synthesised accelerances for the identified modes of the sample *Type-1* and *Type-2* guitars. The modes are therefore well identified and reliable. The results of this preliminary modal analysis are presented in section 10.3.1. They give the knowledge of the modal shapes, that allows to select the measurement point for the driving-point measurement

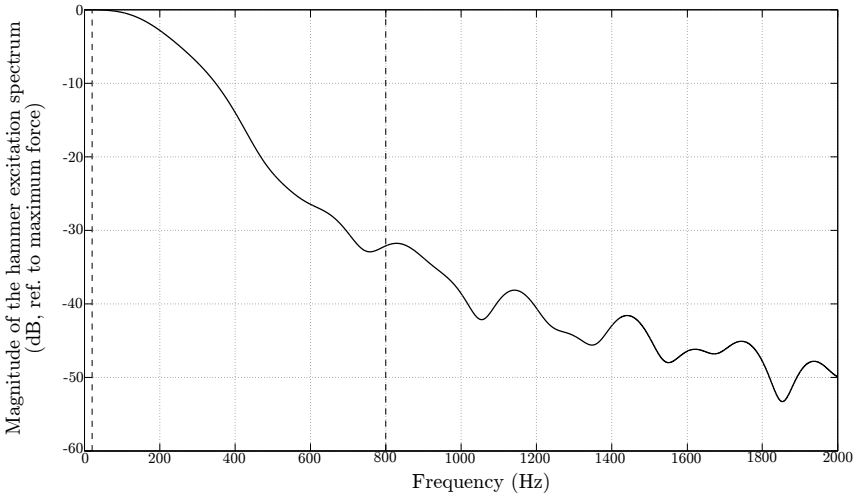


Figure 10.2: Magnitude of the hammer excitation spectrum. The dB scale is normalised to the maximum force value. The thick black dashed lines indicate the frequency bandwidth of the study [20 Hz – 800 Hz].

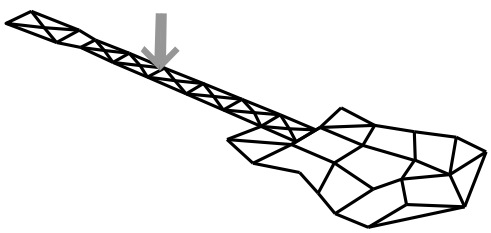


Figure 10.3: Mesh used for the modal analysis of the *Type-1* guitar. The gray arrow indicates the measurement point for the driving-point mobility measurement.

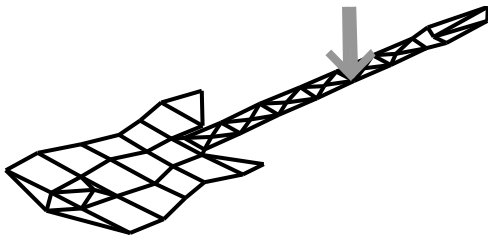


Figure 10.4: Mesh used for the modal analysis of the *Type-2* guitar. The gray arrow indicates the measurement point for the driving-point mobility measurement.

described in section 10.2.3.2.

10.2.3.2 Driving-point mobility measurement and analysis method

Since the string/structure coupling occurs mainly on the neck [Fleischer & Zwicker 1998 1999; Paté *et al.* 2014c], the measurement point should be located on the neck. A close look at the mode shapes of tables 10.1 and 10.2 shows that some points on the neck never coincide with nodes of structure modes. Measurements at such points allow to get information about all the modes of the frequency bandwidth of the study. The measurements points that are chosen are: at the intersection between fret 4 (resp. fret 5) and 1st string axis for the *Type-1* (resp. *Type-2*) model. These points are shown in figures 10.3 and 10.4. A driving-point mobility measurement is carried out on every guitar of each of the two sets, at the corresponding measurement point.

In order to allow for a quantitative comparison of guitars belonging to the same set, this paper proposes to focus on the modal parameters. The musical acoustics context of this study is the string/structure coupling and its influence on the sound. The structure conductance (real part of the mobility) value is responsible for the additional string damping leading to decay time or timbre problems, but such coupling effects arise only in case of coincidence between the string playing frequencies and the structure

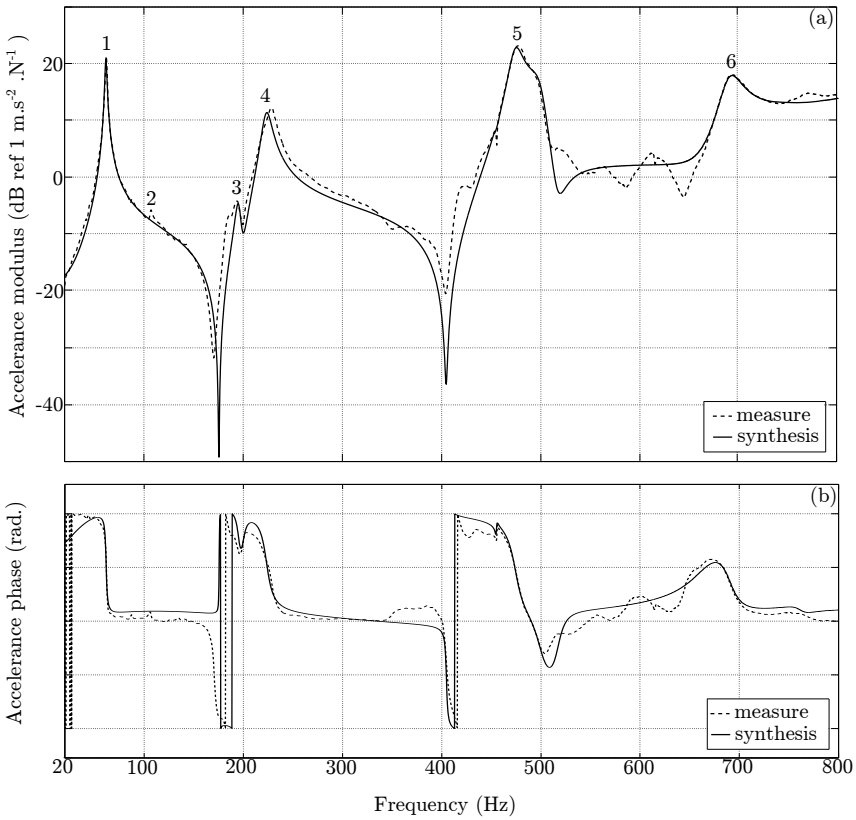


Figure 10.5: Sample *Type1* guitar (tendencies are the same for the sample *Type 2* guitar): modal identification with the LSCF method implemented in the software MODAN. (a) modulus, (b) phase. The dashed line curve is the measured accelerance, the solid line curve is the synthesised accelerance. A mode numbering is indicated. The mode 2 is identified separately. The mode near 500 Hz is a mode that does not involve the neck, so it is not numbered.

modal frequencies [Paté *et al.* 2013]. That is to say, the chance of coupling depends on the location of conductance peaks (structure modal frequencies) and on the spread of those conductance peaks (structure modal damping). Therefore the present article particularly focuses on the modal frequencies and modal damping ratios.

Modal frequencies and damping ratios are global parameters, that is to say they can be obtained from velocity measurements (mobility), as well as acceleration (accelerance) measurement for example. Furthermore, the hammer excitation force has a smooth spectrum in the frequency bandwidth of the study, so that the acceleration signal can be said to represent the impulse response of the structure without being normalised by the input force. Assuming that the excitation force is small enough to stay in a linear approximation, the acceleration signal can be written as [Ewins 1984]:

$$a(t) = \sum_{k=1}^{N} a_k sin(2\pi f_k t + \phi_k) e^{-2\pi f_k \xi_k t} \tag{10.3}$$

where a_k, f_k, ϕ_k, and ξ_k are respectively the modal amplitude, frequency, phase, and damping ratio of mode k. Equation 10.3 tells that the vibratory response of the structure can be modelled as a sum of damped sinusoids. This suggests the use of the ESPRIT method [Roy *et al.* 1986] for the identification of modal parameters. The ESPRIT method has already been successfully used for modal parameter identification from structural measurements of string music instruments [Elie *et al.* 2012 2013].

In practice, a 2-s long portion of the acceleration signal is analysed, starting 0.1 s after its onset time, in order to avoid the attack transient effects. The signal portion is filtered around the modal frequency of interest. The filtered signal is then multiplied by a complex exponential at the frequency of interest, in order to get the corresponding spectrum centered around this frequency. Next the result is highly decimated in order to reduce the computation time. This signal is finally analysed with the ESPRIT method. This procedure is repeated for each modal frequency and each measurement. More details are given in [Paté *et al.* 2014c; Le Carrou *et al.* 2009]. Identified modal frequencies f and damping ratios ξ are the focus of the following of this article. The results of the modal parameter identification are given in section 10.3.

10.3 Results

This section gives the results of the measurements: modal parameters (shapes, frequencies, and damping ratios) and masses. These results are discussed in section 10.4

10.3.1 Modal parameters of the first two guitars

This paragraph presents the results of the modal analysis on the experimental mesh described in section 10.2.3.1. Modal shapes are required to give an interpretation of the results obtained from the driving-point measurements. We make the hypothesis that the modal shapes and their order of appearance does not change between the guitars of the preliminary modal analysis on the mesh and the other guitars of the same model. In consequence, modes will be from now on refered to according to the mode numbering defined in the present section.

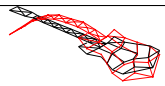
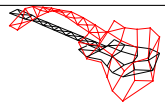
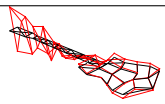
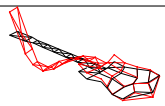
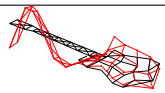
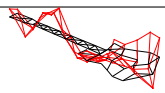
Table 10.1 shows the modal shapes, frequencies, and dampings for the six modes identified in the frequency bandwidth of the study on the analysed sample *Type-1* guitar. Note that the mode near 500 Hz that can be seen in figure 10.5 is a body mode. Since we focus on the string/structure coupling at the neck, this mode will not be discussed in the following.

Table 10.2 shows the modal shapes, frequencies, and dampings for the six modes identified on the analysed sample *Type-2* guitar in the frequency bandwidth of the study. All modes involving the neck in the frequency range of the study are well identified.

10.3.2 Mobility curves

Figure 10.6 presents the driving-point mobility measurements for all guitars of the *Type-1* set. Individual mobility curves are represented with thin gray lines. For each frequency bin, the mean and standard deviation of the 17 curves is computed. The mean mobility is plotted with a thicker black line. The gray area is the region bounded by 2 standard deviations below and above the mean mobility curve.

Table 10.1: Results of the preliminary modal analysis carried out on one *Type-1* guitar: mode shape and associated modal frequency and damping.

Mode number	Mode shape	f (Hz)	ξ (%)
1		61.65	1.6%
2		106.69	1.1%
3		195.47	1.5%
4		223.30	2.3%
5		474.19	1.5%
6		689.96	1.6%

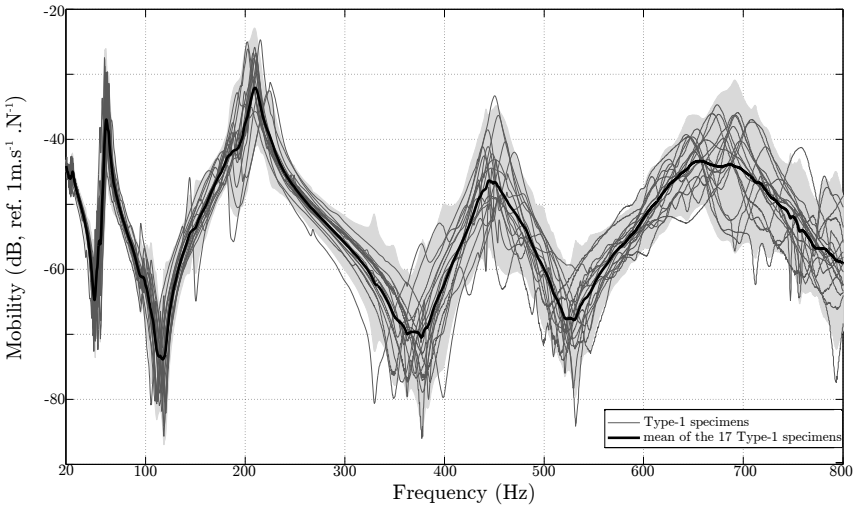
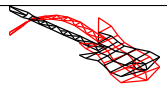
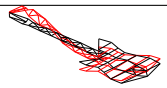
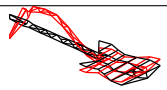
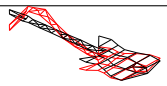
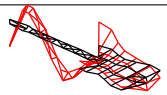
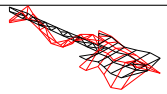


Figure 10.6: Superimposition of all mobility curves for the 17 *Type-1* specimens. Individual mobility curves are represented with thin gray lines. The thick black line is the mean mobility. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility.

Figures 10.7 and 10.8 present the driving-point mobility curves for the measurements on the *Type-2 RN* and *Type-2 MN* guitars respectively. Individual mobility curves are plotted with thin gray lines (dashed for the *RN* guitars, and solid for the *MN* guitars). Like for *Type-1* guitars, means and standard deviations are computed for each frequency bin: the thicker red line (dashed for the *RN* guitars, and solid for the *MN* guitars) represents the mean of the mobility curves, and the gray area is the region bounded by 2 standard deviations below and above this mean mobility curve. The thick black solid line

Table 10.2: Results of the preliminary modal analysis carried out on one *Type-2* guitar: mode shape and associated modal frequency and damping.

Mode number	Mode shape	f (Hz)	ξ (%)
1		59.79	0.9%
2		102.59	1.3%
3		173.82	2.1%
4		187.57	1.8%
5		401.84	1.7%
6		667.44	1.4%

indicates the mean mobility of the whole 24-*Type-2* set.

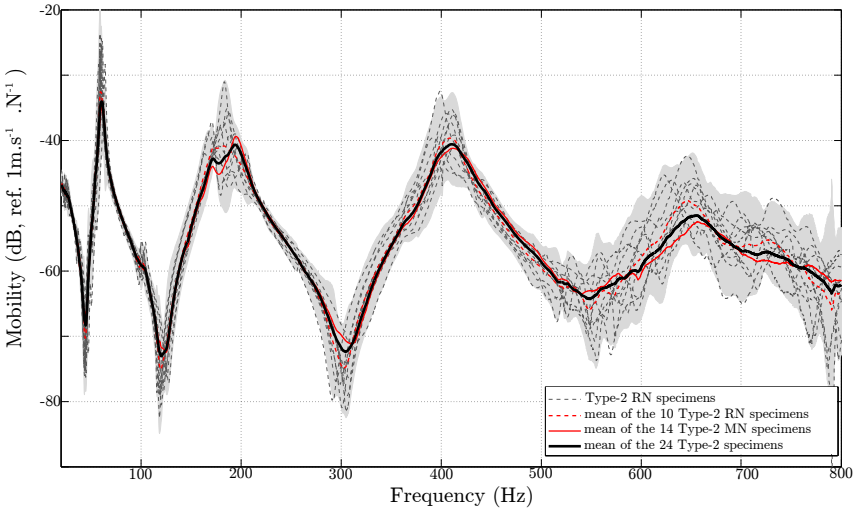


Figure 10.7: Superimposition of all mobility curves for the 10 *Type-2 RN* specimens. Individual mobility curves are represented with thin dashed gray lines. The mean mobility of the 10 *Type-2 RN* specimens is plotted with a dashed red line. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility. The thick black line is the mean of the mobility curves of all 24 *Type-2* guitars. For comparison purposes, the mean mobility of the 14 *Type-2 MN* specimens is plotted with a solid red line.

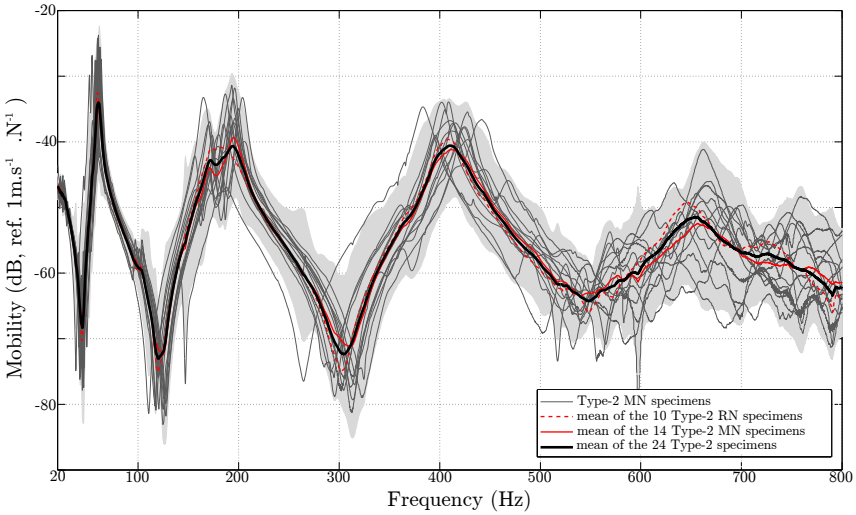


Figure 10.8: Superimposition of all mobility curves for the 14 *Type-2 MN* specimens. Individual mobility curves are represented with thin solid gray lines. The mean mobility of the 14 *Type-2 MN* specimens is plotted with a solid red line. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility. The thick black line is the mean of the mobility curves of all 24 *Type-2* guitars. For comparison purposes, the mean mobility of the 10 *Type-2 RN* specimens is plotted with a dashed red line.

Mobility curve superimpositions of figures 10.6, 10.7 and 10.8 suggest the same qualitative remarks. Among one guitar set, all mobility curves have the same appearance: they follow the shape of the mean mobility curve. Looking a bit closer gives clues to identify differences between nominally identical guitars: mobility peak heights, peak locations (modal frequencies), or peak width seem to vary inside a set of nominally identical guitars. At this point, no clear trend is seen allowing to discriminate between the *RN* and *MN* guitars. It is noticed however that *Type-2 MN* guitars show a higher variability than *Type-2 RN* guitars: this could be due to the fact that one or two *Type-2 MN* guitars stand out from the others. More quantitative comparisons can be obtained with the investigation of identified modal parameters.

10.3.3 Masses

Figure 10.9 shows the masses of the guitars of the *Type-1* set. Each guitar is represented as a bar whose height is proportional to the guitar mass. The black solid line gives the mean mass μ_m, and the black dashed lines give the area bounded by one standard deviation σ_m below and one standard deviation below μ_m. The 2-standard deviation spread around the mean is indicated as a percentage of the mean mass.

Figure 10.10 shows the masses of the guitars of the *Type-2* set. Light gray bars represent the *RN* specimens and dark gray bars represent the *MN* specimens. The mean mass values are represented by horizontal solid lines: black for the whole *Type-2* set μ_m, light gray for *RN* guitars $\mu_{m,RN}$, and dark gray for *MN* guitars $\mu_{m,MN}$. The spread around the mean mass is represented by dashed lines: black for the whole *Type-2* set $\mu_m \pm \sigma_m$, light gray for *RN* guitars $\mu_{m,RN} \pm \sigma_{m,RN}$, and dark gray for *MN* guitars $\mu_{m,MN} \pm \sigma_{m,MN}$. The 2-standard deviation spreads around the mean are indicated as a percentage of the mean mass.

Heavier (resp. lighter) guitars could be expected to have lower (resp. higher) modal frequencies. Nonetheless no such link between the mass of an individual instrument and its modal frequencies was

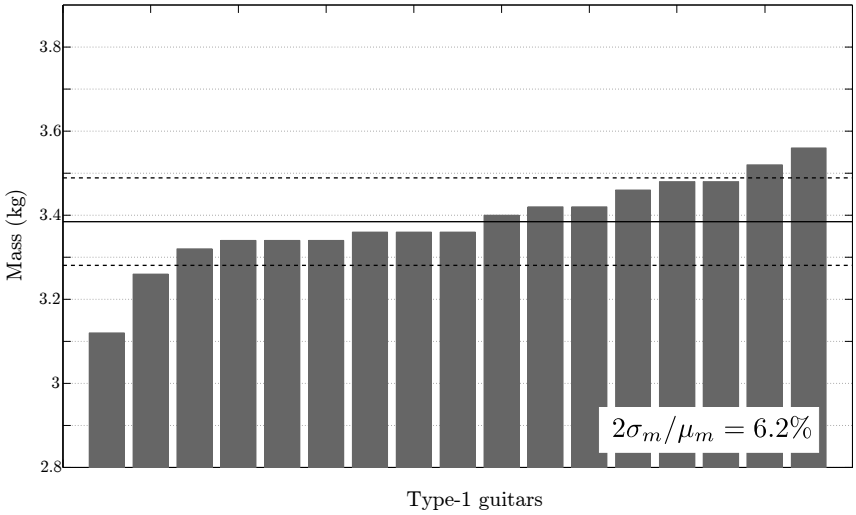


Figure 10.9: Bar plot of the masses of the 17 *Type-1* guitars. The black solid line indicates the mean mass μ_m. The black dotted lines indicate the spread around the mean mass as 1 standard deviation below and above the mean mass: $\mu_m \pm \sigma_m$. The 2-standard deviation spread around the mean is indicated as a percentage of the mean mass.

observed on the two guitar sets. Two explanations can be found for that fact. First, the wood density (hence the mass) is certainly not the only parameter varying between two guitars: mechanical parameters such as Young's moduli, Poisson's ratios, or shear moduli are known to have non neglectible variations for nominally identical woods [(U.S.) 2010]. Second, the modal masses are obviously related to the total mass of the guitar, but also to the mode shapes. The identified mode shapes seem to involve the neck more than the body, so that in terms of mass-dependence, the modal masses would rather depend on the mass variability of wood pieces used for the necks. This mass variability between necks may be not precisely rendered by the measurements of total guitar masses. Actually, the total masses ought to be determined rather by the "solid" body masses than by the neck masses.

10.3.4 Modal frequencies

Figure 10.11 shows the identified modal frequencies for the *Type-1* guitars. For each mode, black crosses indicate the single modal frequencies, and a red cross indicates the mean value μ_f of the 17 single modal frequencies. The red circles indicate the spread of the modal frequencies, as 1 standard deviation σ_f below and above the mean value: $\mu_f \pm \sigma_f$. This spread $2\sigma_f$ is expressed as a percentage of μ_f with the red numbers beside the mean frequencies. The variability $2\sigma_f/\mu_f$ is quite consistent among modes. Note that the modes with the lowest modal frequency variability are the neck bending modes numbered 4, 5, and 6. Highest $2\sigma_f/mu_f$ values are reached for modes involving a neck torsion (2 and 3). This higher variability for torsional modes may be explained by the angle of the wood cut, to which the torsional behaviour of the neck may be very sensitive. Here the *Type-1* guitars have a quartersawn rosewood fingerboard glued to a quartersawn mahogany neck, the *RN* guitars have a quartersawn rosewood fingerboard glued to a flatsawn maple neck, and the *MN* guitars have a quartersawn maple fingerboard glued to a flatsawn maple neck. There is some tolerance upon the wood cut angle of each wood piece. The assembling of two wood pieces (fingerboard and neck), both with uncertainties in the wood cut angle, may by a factor of variation in the torsional behaviour of the necks. Furthermore the tree trunks are known to undergo torsional pre-stress during their growth. This could alter the torsional behaviour of

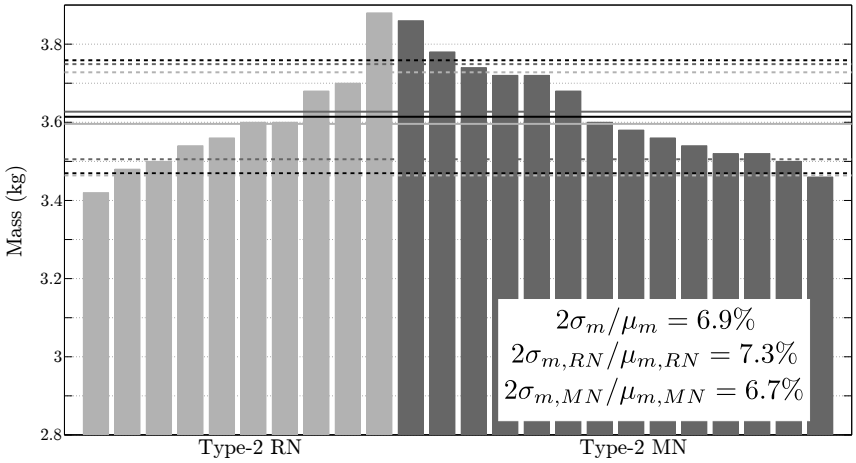


Figure 10.10: Bar plot of the masses of the 24 *Type-2* guitars. The light (resp. dark) gray bars represent the *RN* (resp. *MN*) specimens. The black, light gray, and dark gray solid lines indicate the mean mass μ_m of all 24 specimens, $\mu_{m,RN}$ of the *RN* specimens, and $\mu_{m,MN}$ of the *MN* specimens respectively. The black, light gray, and dark gray dashed lines indicate the quantity $\mu_m \pm \sigma_m$ of all 24 specimens, $\mu_{m,RN} \pm \sigma_{m,RN}$ of the *RN* specimens, and $\mu_{m,MN} \pm \sigma_{m,MN}$ of the *MN* specimens respectively. The 2-standard deviation spreads around the means are indicated as a percentage of the corresponding mean mass.

the necks.

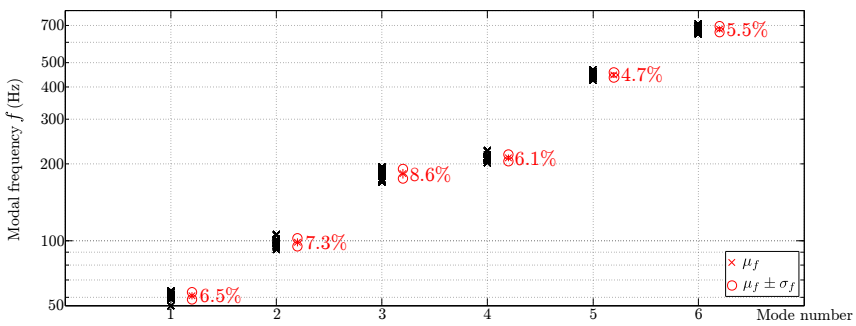


Figure 10.11: Identified modal frequencies for the 17 *Type-1* specimens. For each mode, the black crosses indicate the single modal frequencies. For each mode, the red crosses indicate the mean value μ_f of the 17 modal frequencies. The red circles indicate the spread of the modal frequencies, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_f \pm \sigma_f$. Red numbers indicate the value σ_f/μ_f.

Figure 10.12 shows the identified modal frequencies for the *Type-2* guitars. For each mode, the left (resp. right) cluster of black crosses indicates the individual modal frequencies for the *RN* (resp. *MN*) guitars. Associated with each black cross cluster is the corresponding mean value $\mu_{f,RN}$ or $\mu_{f,MN}$ (isolated black cross), and spread around the mean value $\mu_{f,RN} \pm \sigma_{f,RN}$ or $\mu_{f,MN} \pm \sigma_{f,MN}$ (black circles). For each mode, the red cross indicates the mean value μ_f of the 24 single modal frequencies (the whole *Type-2* set), and the red circles indicate the corresponding modal frequency spread $\mu_f \pm \sigma_f$. This spread $2\sigma_f$ (resp. $2\sigma_{f,RN}$ and $2\sigma_{f,MN}$) is expressed as a percentage of μ_f (resp. $\mu_{f,RN}$ and $\mu_{f,MN}$) with the red (resp. black) numbers beside the frequency clusters. Just as in the case of the *Type-1* guitars, the

frequency variability for the whole set of *Type-2* is consistent for all modes. The frequency variability within the two subsets is a bit less consistent: the *RN* subset shows frequency variations from 3.1% (mode 2) to 8.4% (mode 3), and the *MN* subset from 5.5% (mode 6) to 9.0% (mode 1). This time, it is not clear whether neck torsional modes tend to have higher frequency variabilities $2\sigma_f/mu_f$: mode 3 have a shape very similar to mode 4, but with additional torsional motion of the headstock. Both modes show comparable frequency variabilities.

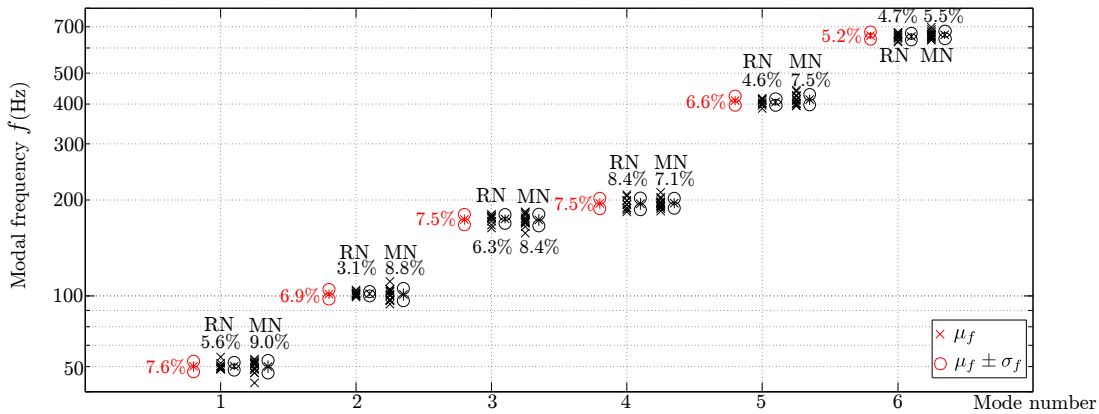


Figure 10.12: Identified modal frequencies for the 24 specimens *Type-2*. Black crosses indicate the individual modal frequencies. For each modal frequency, the red crosses indicate the mean value μ_f of the 24 identified frequencies, and the red circles indicate the spread of the modal frequencies, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_f \pm \sigma_f$. For each mode, the two black crosses clusters refer to the modal frequencies of the *RN* guitars, and *MN* guitars, from left to right. Associated with each cluster is the corresponding mean value, and spread around the mean value. Red (resp. black) numbers indicate the value σ_f/μ_f (resp. $\sigma_{f,RN}/\mu_{f,RN}$ and $\sigma_{f,MN}/\mu_{f,MN}$).

10.3.5 Modal damping ratios

Figure 10.13 shows the identified modal damping ratios for the *Type-1* guitars. Black crosses indicate the single modal damping ratios, and a red cross indicates the mean damping ratio μ_ξ for each mode. The red circles indicate the spread of the modal damping ratios $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. This spread $2\sigma_\xi$ is expressed as a percentage of μ_ξ with the red numbers beside the mean frequencies.

The two first modes involving a motion of the whole guitar show similar damping ratios. Modes 5 and 6, which are neck bending mode with or without body motion have analogous damping ratios. Mode 4 has slightly higher damping ratios. Neck and headstock torsional mode 3 significantly stands out from the others with a much higher damping ratio. The inter-variability in damping ratio keeps very stable from one mode to another.

Figure 10.14 shows the identified modal damping ratios for the *Type-2* guitars. For each mode, the left (resp. right) cluster of black crosses indicates the single modal damping ratios for the *RN* (resp. *MN*) guitars. Each cluster is associated with its mean value $\mu_{\xi,RN}$ or $\mu_{\xi,MN}$ (isolated black cross) and spread around the mean value $\mu_{f,RN} \pm \sigma_{f,RN}$ or $\mu_{f,MN} \pm \sigma_{f,MN}$ (black circles). For each mode, the red cross indicates the mean value μ_ξ for the whole *Type-2* set, and the red circles indicate the corresponding spread $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. The red (resp. black) numbers beside the clusters express the quantity $2\sigma_\xi$ (resp. $2\sigma_{\xi,RN}$ and $2\sigma_{\xi,MN}$) as a percentage of μ_ξ (resp. $\mu_{f,RN}$ and $\mu_{f,MN}$).

Just like *Type-1* guitars, the two first modes (which are whole guitar modes) of the *Type-2* set have significantly lower damping ratios. A level higher are the modes 4 to 6 (which involve both body motion,

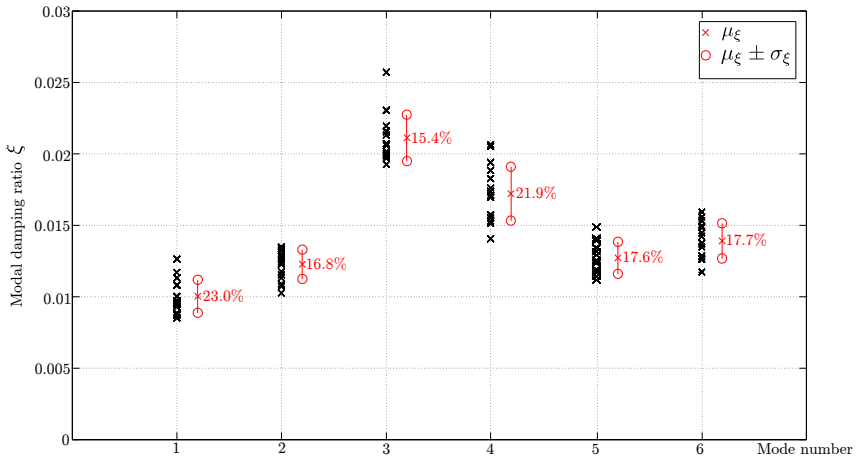


Figure 10.13: Identified modal damping ratios for the 17 *Type-1* specimens. For each mode, the black crosses indicate the single modal damping ratios. For each mode, the red crosses indicates the mean value μ_ξ of the 17 modal damping ratios. The red circles indicate the spread of the modal damping ratios around the mean value, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. Red numbers indicate the value σ_ξ/μ_ξ.

but more importantly neck modes with beam-like shapes). Like the 3rd mode of the *Type-1* guitars, the 3rd mode of the *Type-2* guitars involves headstock torsion and seems to have a higher mean damping ratio. However, the facts that the damping ratio variability for the 3rd *Type-2* mode is about two times higher than for the 3rd *Type-1* mode makes this tendency not as clear as for *Type-1* guitars. The whole *Type-2* set shows variability values σ_ξ/μ_ξ of the same order of magnitude as the *Type-1* set for modes 1, 5, and 6. For other modes, the variability in damping ratio is higher for the *Type-2* set.

Section 10.4 first sums up the modal parameter variability order of magnitudes obtained on the present large sets of industrial electric guitars and compares it to results from the literature obtained with other industrial products. The discussion is then turned towards the comparison between the variability originating from the making process and the variability due to an intentional lutherie change: the fingerboard wood.

10.4 Discussion

This section discusses the modal parameter variabilities presented in section 10.3. First they are compared to the variability reported for other industrial objects, and then a comparison between intra-group and inter-group variabilities attempts to tell apart two causes of variability: that due to the making process (including the wood selection) and that due to an intentional lutherie decision like the wood of the fingerboard.

10.4.1 Modal parameter variability for electric guitar as industrial objects

Investigations on three guitar sets (*Type-1*, *Type-2 RN*, and *Type-2 MN*) give a good overview of the modal parameter variation for nominally identical electric guitars. In terms of modal frequency, the spread $2\sigma_f/mu_f$ takes values from 3.1% to 9.0%. For purposes of comparison, this modal parameter spread can be expressed in terms of variation range. For a given mode, the variation range of a modal parameter is defined as the difference between the maximum and the minimum values within the set: the

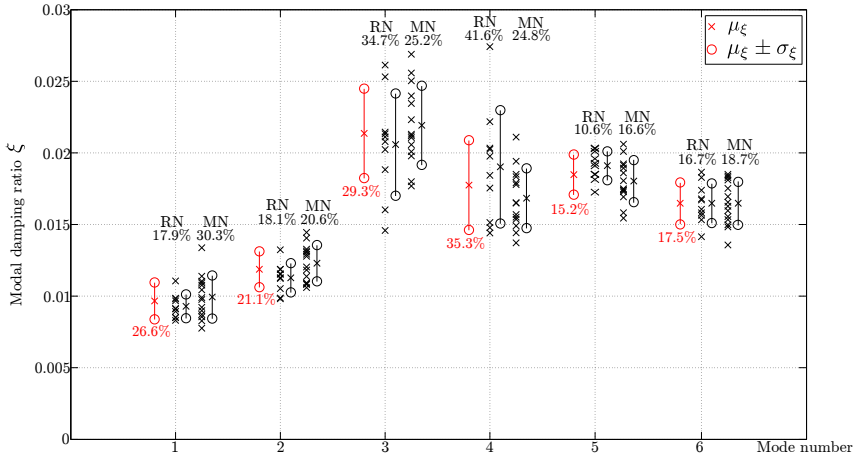


Figure 10.14: Identified modal damping ratios for the 24 *Type-2* specimens. Black crosses indicate the individual modal damping ratios. For each modal damping ratio, the red crosses indicate the mean value μ_ξ of the 24 identified damping ratios, and the red circles indicate the spread of the modal damping ratios, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. For each mode, the two black cross clusters refer to the modal damping ratios of the *RN* guitars, and the *MN* guitars, from left to right. Associated with each cluster is the corresponding mean value, and spread around the mean value. Red (resp. black) numbers indicate the value σ_ξ/μ_ξ (resp. $\sigma_{\xi,RN}/\mu_{\xi,RN}$ and $\sigma_{\xi,MN}/\mu_{\xi,MN}$).

modal frequency variation range is defined as $\Delta_f = f_{max} - f_{min}$ and the modal damping ratio variation range as $\Delta_\xi = \xi_{max} - \xi_{min}$. These variation ranges are given in table 10.3 as percentages of the mean value for the corresponding guitar set.

Δ_ξ values range from 16.1% to 77.2% for the sets of nominally identical electric guitars of the present study, and from 4.0% to 140.0% (most of the values lying from 20% to 50%) for the study of the wind turbine blades [Griffith *et al.* 2006]. It is noticed that electric guitars present less varying modal damping than other industrial objects. Modal dampings are consistent for nominally identical electric guitars, that means that the spread of the conductance peaks partly responsible for string/structure coupling is a parameter that is quite well controlled by the guitar manufacturers.

For sets of nominally identical guitars, Δ_f values range from 5.1% of μ_f (*Type-2 RN*) up to 16.6% (*Type-2 MN*). The study of two nominally identical wind turbine blades [Griffith *et al.* 2006] reports modal frequency differences ranging from 0.1% to 1.7%. The study of more than a hundred brake calipers [Gallina *et al.* 2012] reports a maximum modal frequency deviation of 5%. Theses two results obtained on industrial objects can be compared to the present results, because they express a variation range as a percentage of the mean. Electric guitars show higher frequency variations than other industrial objects. This seems reasonable, for at least two reasons. First, even if many manufacturing steps of the electric guitars of the study are automated, some steps involve handwork: shaping of the neck profile, fretting the fingerboard, joining the neck to the body, etc. This may be a cause of inter-objects variation. Second, the brake calipers [Gallina *et al.* 2012] are made of aluminium alloy and the wind turbine blade [Griffith *et al.* 2006] of plastic and carbon fibres, whereas the electric guitars of the present study are made of wood. Wood is a material that is known for showing a quite large variability in mechanical parameters [(U.S.) 2010; Guitard 1987]. This may result in the larger frequency variability observed for the guitars in comparison to the other industrial objects. This uncertainty about the conductance peak location for two nominally identical guitars may explain partly the difference felt by the guitar players when testing several guitars of the same model. The vibratory characteristics of each specimen lie somewhere within

Table 10.3: Variation ranges of modal frequencies Δ_f and damping ratios Δ_ξ, for each mode and each guitar set/subset. Δ_f and Δ_ξ are given as percentages of the mean values μ_f and μ_ξ of the corresponding guitar set.

	mode	1	2	3	4	5	6
$\Delta_f = f_{max} - f_{min}$	*Type-1*	13.2%	13.8%	13.6%	11.4%	9.6%	9.2%
	all *Type-2*	18.3%	16.5%	15.1%	14.2%	13.4%	10.8%
	Type-2 RN	9.0%	5.1%	9.5%	12.5%	7.3%	7.1%
	Type-2 MN	16.6%	16.5%	15.2%	13.7%	11.5%	9.4%
	mode	1	2	3	4	5	6
$\Delta_\xi = \xi_{max} - \xi_{min}$	*Type-1*	41.0%	26.2%	30.5%	38.3%	29.1%	30.2%
	all *Type-2*	58.1%	39.0%	57.6%	77.2%	28.0%	30.9%
	Type-2 RN	29.6%	30.3%	56.1%	68.4%	16.1%	27.4%
	Type-2 MN	56.6%	31.4%	42.0%	43.9%	28.7%	29.9%

the variation range imposed by the model specifications: this make each guitar have both proper sound characteristics and shared common features with other guitars of the same model.

10.4.2 Lutherie change vs. making process: influence on the modal parameter variability

The typical modal parameter intra-variability within a set of nominally identical guitars can be identified considering the *Type-1*, *Type-2 RN*, and *Type-2 MN* set. The two latter sets can also be compared one to another in order to get information about the amount of variability caused by an intentional lutherie change.

Figure 10.12 shows that for each mode the mean frequencies of the subsets $\mu_{f,RN}$ and $\mu_{f,MN}$ are very similar. Both are extremely close to the mean modal frequency μ_f of the whole *Type-2* set. Furthermore, the frequency spreads $2\sigma_{f,RN}$ and $2\sigma_{f,MN}$ around the mean values strongly overlap. This means that no significant difference in modal frequency is observed between *RN* (rosewood fingerboard) and *MN* (maple fingerboard) guitars. A trend can however be noticed: except for mode 4, the *MN* subset exhibits higher variability than the *RN* subset. The same trend is noticed without exception in table 10.3. Every piece of wood that the manufacturer buys is systematically stored for months in a dry place, in order to guarantee the highest possible stability for the woods, before the making process starts. The maple used for the present guitars comes either from the United States or Canada, whereas the rosewood comes from India. Because of the very large number of guitars produced by the manufacturer, various wood suppliers are involved. The factories are located in North-America. On the one hand, a higher wood variability is expected for the wood that travelled the most (rosewood), because of climate, temperature, hygrometry changes. On the other hand, maple is known by luthiers to be a less stable wood than rosewood, that is to say it could be subject to higher strain (caused by the pre-stress due to the wood history). This latter fact may be of greater influence than the former, explaining the slightly higher variability noticed for *MN* guitars.

Differences in mean damping ratios can be found between *RN* and *MN* guitars in figure 10.14: μ_{MN} is higher than μ_{RN} for modes 1, 2, and 3, whereas the contrary holds for modes 4, and 5. μ_{RN} and μ_{MN} have almost exactly the same value for mode 6. These differences are however not significant, since the bars representing the spread $2\sigma_{f,RN}$ and $2\sigma_{f,MN}$ around the corresponding mean values tightly overlap. Figure 10.14 and table 10.3 do not show any trend in terms of modal damping variability between the two *Type-2* subsets: no subset consistently exihibits higher damping ratio variability.

In the end, nor higher neither significantly different modal parameter variability is found between two sets of guitars differing in a single intentional lutherie parameter (here the fingerboard wood) than within sets of nominally identical guitars. This could mean that the main cause of modal parameter variability for electric guitars is rather the making process or the intrinsic variability of the wood than an intentional lutherie change like the wood of the fingerboard.

10.5 Conclusion

Vibratory measurements have been carried out on different sets of industrially-made guitars. The first set is made of 17 nominally identical *Type-1* guitars. The second set contains 24 *Type-2* guitars, that are to be further split into two subsets according to the only intentional difference: a subset is made of 10 guitars with a rosewood fingerboard (*RN*), and the second subset is made of 14 guitars with a maple fingerboard (*MN*). The measurements have been analysed in order to identify the modal frequencies and dampings of each guitar in the low-frequency range.

The study of the *Type-1*, *Type-2 RN*, and *Type-2 MN* sets, each grouping together nominally identical guitars, allows to quantify the typical variability in modal frequency and damping ratio due to the making process and the wood intrinsic variability. This study is the first of its kind for industrially-made electric guitars. Typical variability in modal frequencies are shown to be higher for electric guitars than for other industrial products. This may have two explanations: first the manufacturing process of electric guitars still involves handwork critical tasks (fretting the fingerboard, joining neck and body, adjusting the whole guitar), which is in general not the case for industrial objects. Second, like many string instruments, the electric guitar is made of wood, a quite varying material. Typical modal damping ratio variability in electric guitars has been found to be quite high, but it is much more consistent than for other industrial products, when comparing the different modes one with another. It could mean that the spread of the conductance peaks (determined by the modal damping) partly responsible for the string/structure coupling is a parameter that is quite well controlled by the guitar manufacturers.

The *Type-2 RN* and *Type-2 MN* sets are expected to differ only in one lutherie parameter: the wood of the fingerboard. The modal frequency and damping ratio differences between these two sets are then expected to be mainly due to this lutherie change. None of these guitar sets stands out from the other, and no higher variability is noticed between intentionally different guitars (*RN* and *MN* guitars) than between two nominally identical guitars (guitars from the same set).

Modal frequency and damping ratio are important for the description of the string/structure coupling. They can explain sound differences related to energy losses from the string's point of view. But they strongly depend on coincidences that might occur between string playing frequencies and structure frequencies. In the general case, such a coincidence does not occur so clearly, and other mechanical features than modal frequency and damping ratio may be more appropriate for characterising the influence of the structure on the sound. The use of mean conductance values has been proposed in a previous study for the discrimination between ebony and rosewood fingerboards [Paté *et al.* 2013]. For the guitars of the present study, this mechanical parameter did not give clear results, so future work should concentrate on finding other mechanical parameters allowing to render the difference between maple and rosewood fingerboards.

An important thing to be noted is that a high variability or variation range means in no case an impaired making process, or non-reliable guitars. This variability is rather to be seen as a chance. Different guitars of the same model share common properties, that are imposed by the specifications of the model. But each of them also has its own characteristics. Within the *Type-2* family, a *RN* guitar and a *MN* guitar share some properties, and some features are not common to the two guitars. Some properties

are likely due to the fingerboard wood, and some of these may be compensated by other features. Many guitar players have a holistic approach to the guitar: the instrument is perceived and evaluated as a whole. This may be why guitar players often test several guitars befor purchasing one, or why they can play many guitars of the same model for many different purposes, music styles, etc. Nowadays many phenomena are explained by scientific investigations, but some lutherie subtleties still escape the mechanical modelling.

This study has focused on modal parameters, so have been restricted to the modal domain, that only covers the frequency range called *bass* of *low-mids* by the players. The study should then be completed with a vibratory characterisation and comparison of the guitars in the mid- and high- frequency domain, with the use of other descriptors like for example mean mobility or mobility envelope curves [Elie *et al.* 2012; Skudrzyk 1980].

Acknowledgements

A very special and warm thank goes to everyone from the electric guitar manufacturing company. Thanks to Benoît Navarret, Gary Scavone, Claudia Fritz, Marcelo Wanderley, and Hossein Mansour for fruitful discussions.

Quatrième partie

Conclusion générale

Chapitre 11

Conclusion et perspectives

Une évolution possible des sciences de l'ingénieur est de se tourner vers l'interdisciplinarité. La guitare électrique *solid body*, en tant qu'objet à la fois culturel, technique et industriel, se prête bien à une approche interdisciplinaire. Le défi posé au mécanicien est de pouvoir expliquer pourquoi cette épaisse planche de bois supposée inerte est trouvée par les musiciens avoir une influence sur le son. Nous avons vu au cours de ce travail de thèse que la caractérisation mécanique et perceptive des éléments de lutherie de la guitare électrique *solid body* était possible.

Les études perceptives menées dans ce travail s'inscrivent dans une approche de cognition située. Ceci nous a permis de prendre en compte les spécificités de l'instrument et de son instrumentiste. Si la philosophie de notre méthodologie n'est pas à proprement parler nouvelle, on constate qu'elle reste marginale dans le domaine de l'acoustique musicale. Pourtant, il semble à la fois fondé et modeste de maximiser la liberté du musicien, surtout lorsque le scientifique dispose de peu de visibilité sur un nouvel objet d'étude, comme c'est le cas pour la guitare électrique *solid body*.

Les études mécaniques se sont inscrites dans le cadre de l'analyse modale expérimentale. Nous avons montré qu'une modification d'un élément de lutherie altérait le comportement vibratoire de la structure de l'instrument. Par description du couplage mécanique entre la corde et la structure, nous avons pu identifier comment la vibration des cordes pouvait être perturbée par cette altération. La notion d'élément de lutherie, si elle ne recouvrait au début de ce manuscrit qu'une notion de décision délibérée du luthier, est au final étendue à d'autres facteurs de variabilité dans le comportement dynamique des instruments : le processus de fabrication et les matières premières.

Les principales conclusions de ce travail de thèse sont résumées ici.

✓ La sémantique des guitaristes électriques a été établie.
La diversité et la richesse de l'expression des guitaristes confirment que la volonté d'accéder au subjectif par le discours est adaptée et fructueuse. Une analyse sémantique du discours nous a permis d'effectuer un calibrage du vocabulaire des guitaristes électriques : nous avons identifié dix catégories sémantiques qui représentent dix concepts guidant la perception qu'ont les guitaristes électriques de leur instrument. Nous avons étiqueté ces catégories de la manière suivante : AGRESSIVITÉ, ATTAQUE, BASSES, BRILLANCE, ÉQUILIBRE, MÉDIUM, HAUT-MÉDIUM, BAS-MÉDIUM, PRÉCISION et SUSTAIN. La focalisation d'études futures sur l'un ou l'autre de ces aspects de la perception de la guitare électrique *solid body* est à présent justifiée.

✓ Les musiciens perçoivent les différences d'éléments de lutherie.
Les éléments de lutherie ont une réelle influence sur le son perçu d'un instrument électroacoustique tel que la guitare électrique *solid body*. En particulier, la différence entre une touche en ébène et une touche en palissandre peut être perçue en situation de jeu par certains guitaristes. Une caractérisation de chacun des deux matériaux par des descripteurs psychologiques a été proposée. Celle-ci est fondée sur des représentations en mémoire élaborées au cours de plusieurs années de pratique de l'instrument. Cette caractérisation est liée à des jugements d'après les catégories sémantiques ATTAQUE, ÉQUILIBRE, et surtout PRÉCISION. La touche en ébène semble procurer une meilleure *précision* : *les notes se détachent un peu*

les unes des autres, au lieu de se mélanger.

✓ Un modèle de couplage corde–structure a été développé.
La guitare électrique *solid body* peut être vue comme une corde fixée rigidement au chevalet et attachée à un corps mobile du côté du manche. C'est la vibration de cette corde qui est captée par le *pickup*. Le modèle développé rend compte du comportement vibratoire de la corde couplée à l'aide de deux termes :

- ➢ L'un représente les mécanismes d'amortissement intrinsèques de la corde. Ce terme est identifié expérimentalement pour chaque partiel de chaque note produite sur la corde.
- ➢ L'autre représente un amortissement supplémentaire des partiels de la corde. Cet amortissement est lié à la mobilité hors-plan de la structure au point de couplage, qui est mesurée sur les guitares.

Le modèle de couplage permet, avec la connaissance des propriétés de la corde et du comportement dynamique de la structure, de prévoir la décroissance de chaque partiel des notes sortant du *pickup*.

✓ Les éléments de lutherie peuvent être caractérisés mécaniquement.
Un changement d'élément de lutherie se manifeste en particulier par une modification de l'emplacement et de la hauteur des pics de conductance, c'est-à-dire par l'« élection » de la note (ou du partiel) qui sera perturbée par couplage avec la structure, et par l'intensité de cette perturbation. Dans un contexte moins dépendant de l'accordage de l'instrument, on peut trouver des indicateurs mécaniques permettant de discriminer clairement les différentes formes d'un élément de lutherie. La moyenne fréquentielle de la conductance mesurée sur le manche est trouvée être systématiquement plus grande pour des guitares à touche en palissandre que pour des guitares à touche en ébène. La touche en palissandre est donc plus susceptible de perturber la vibration des cordes.

✓ Les éléments de lutherie ne sont pas les seules causes de variabilité.
Il est fait le constat que des guitares nominalement identiques (mêmes matériaux, même procédé de fabrication) présentent des différences, notamment au niveau des paramètres modaux. Cela nous amène à considérer qu'outre les variations d'éléments de lutherie, la variabilité intrinsèque du bois et la variabilité due au procédé de fabrication ou aux différences entre luthiers jouent un rôle important.

✓ L'évolution du comportement modal des guitares en cours de construction a été modélisée et mesurée.
Des mesures vibratoires ont été réalisées au cours de la construction de guitares électriques artisanales. Nous avons montré qu'il existe dans l'évolution des fréquences modales des tendances systématiques d'une étape à l'autre. Ces tendances sont mesurées et modélisées, si bien que le comportement dynamique final de l'instrument achevé peut être prévu à partir d'une mesure sur le manche en tout début de construction.

✓ La source des variabilités inter-individuelles a été déterminée pour chaque étape de construction.
La variabilité des paramètres modaux a été quantifiée à chaque étape de construction par la comparaison des mesures sur différents spécimens. L'évolution de cette variabilité rend possible une interprétation de ses causes. Certaines étapes de construction correspondent à l'ajout de bois : on constate un accroissement de la variabilité inter-individuelle des paramètres modaux. Le choix du bois est donc certainement le principal responsable de la variabilité observée. D'autres étapes sont le fruit de gestes experts des luthiers : on constate une diminution de la variabilité. Les luthiers arrivent dans une certaine mesure à homogénéiser les paramètres modaux des guitares.

✓ La variabilité inter-individuelle des paramètres modaux d'instruments issus d'une pro-

duction industrielle est quantifiée.
Nous avons obtenu une quantification de la variabilité des paramètres modaux parmi une population de guitares électriques industrielles nominalement identiques. Ceci permet de situer la guitare électrique *solid body* parmi les objets industriels et de constituer une base de données de référence à la fois pour le mécanicien (possiblement numéricien), le fabricant et le musicien.

✓ **Variabilité de paramètres modaux due aux matières premières et au procédé de fabrication, et variabilité apportée par un changement d'élément de lutherie sont du même ordre.**
Nous avons montré qu'en contexte industriel, la variabilité des paramètres modaux induite par le procédé de construction ainsi que par la variabilité intrinsèque des matières premières peut être du même ordre de grandeur que la variabilité induite par la modification d'un élément de lutherie. Loin de nier l'influence des éléments de lutherie, ceci illustre peut-être simplement l'adage gestaltiste « le tout est plus que la somme des parties » : tous les éléments, des décisions de lutherie aux tolérances des machines utilisées lors de la fabrication, contribuent au comportement dynamique, donc au son. C'est aussi ce que tend à montrer le test de catégorisation libre du chapitre 4 : une guitare est appréhendée comme un tout par les guitaristes.

Nous proposons à présent quelques perspectives à ce travail de thèse. Celles-ci sont distribuées selon différents points de vue : celui du scientifique d'abord, mais aussi ceux du musicien et du luthier. L'ouverture d'un dialogue avec les vendeurs est finalement proposée, afin que notre étude puisse à terme réunir tous les acteurs de la guitare électrique *solid body*.

❑ Perspectives du point de vue du scientifique

➢ Le lien action/jugement

La comparaison des résultats du test d'écoute et du test en situation de jeu mérite une réflexion méthologique. Si le test d'écoute permet d'offrir à chaque sujet des stimuli identiques dans des conditions habituelles d'écoute, il s'avère limité en ceci que le jugement des guitaristes lors d'un tel test ne se construit qu'à partir de la dimension auditive de leur perception. Donner aux guitaristes la possibilité d'être acteurs lors des tests perceptifs semble, au moins en ce qui concerne le jugement d'instruments de musique, souhaitable en ceci que les jugements produits sont plus précis et complets. Lors du test en situation de jeu, le guitariste utilise ses autres modalités sensorielles (notamment le toucher), produit ses sons lui-même, voire lutte contre l'instrument pour parvenir à produire le son qu'il souhaite. Comme une conséquence méthodologique pour les études futures, il semble qu'en comparaison avec un test d'écoute, un test en situation de jeu donne l'occasion de jugements experts plus fins car produits dans une situation plus écologique.

➢ Quelle articulation entre les études mécanique et perceptive ?

Par necessité temporelle, les approches mécanique et perceptive ont été menées ici de front. Cela leur a garanti un dialogue et un enrichissement mutuel constant. Cette étude ayant suffisamment défriché l'étude de la guitare électrique *solid body* dans les deux domaines que sont la mécanique et la perception, on peut imaginer pour d'éventuelles suites une approche plus linéaire :

De la perception à la mécanique : Nous avons montré qu'il était possible, moyennant une interprétation des critères des musiciens en termes physiques, de piloter les études mécaniques par les résultats d'une étude perceptive. Cela ouvre des portes à la mécanique, en lui indiquant des pistes

qu'elle n'avait peut-être pas imaginées. On pourra alors identifier les paramètres mécaniques liés à la perception, caractériser les éléments de lutherie en fonction de ces paramètres, et enfin identifier la source de variation de ces paramètres.

De la mécanique à la perception : Une fois le point précédent mené à bien, il est possible par exemple d'élaborer des modèles mécaniques destinés à la synthèse sonore pour tester la sensibilité des musiciens à ces paramètres physiques. La démarche est donc clairement psychophysique, avec des fondements établis comme psychologiquement pertinents.

➢ Vers un lien entre descripteurs psychologiques et vibratoires.

S'il reste à établir un lien ferme et explicite entre les paramètres pertinents du point de vue mécanique et les paramètres pertinents pour les musiciens, on peut proposer quelques éléments de réflexion. Au chapitre 4 certains guitaristes ont trouvé commune aux guitares à touche en ébène une certaine *homogénéité*. En ceci les guitares à touche en ébène étaient en opposition avec les guitares à touche en palissandre. Les acousticiens ont l'habitude d'interpréter cette notion par la « régularité » du spectre, c'est-à-dire par l'absence de variation brusque dans le profil des amplitudes des différents partiels de la note. Si cette interprétation est avérée, alors la conductance moyenne moins élevée mesurée sur les guitares à touche en ébène est certainement l'explication à une moindre perturbation des différents partiels de la corde, donc à un spectre plus *homogène*. De plus, le manque de *précision* dont sont qualifiées les guitares à touche en palissandre est défini par les musiciens eux-mêmes par la perception de notes qui se *mélangent*. La présence simultanée de notes à spectres de formes/profils différents pourrait mener à une difficulté d'interprétation et de discernement de ces notes, surtout en contexte de distorsion :

> *On a beaucoup de bazar, c'est pas très agréable à jouer en accords en saturé, 'fin toujours avec ce niveau de saturation encore une fois.* (sujet 1 de l'étude présentée en section 3.2)

➢ Extension de l'étude du couplage corde–structure.

Dans le modèle de couplage élaboré au cours de cette thèse, corde et structure ont été considérées comme étant cinématiquement liées : leurs vitesse et déplacement sont considérés invariablement identiques. C'est bien entendu une simplification et on peut s'interroger entre autres sur la nature du contact entre la frette et la corde, ou entre le chevalet et la corde. En effet, ce contact pourrait bien être le siège de différents phénomènes de frottement sec, de frottement hystérétique [Evangelista 2011] ou de contrainte unilatérale [Valette 1995], qui ne sont pas pris en compte dans ce travail [1]. De plus, le cadre théorique de l'approche mécanique développée dans cette thèse s'est limité aux vibrations linéaires et au domaine basses fréquences. Ce seront des limitations à lever lors de prochaines études. En particulier, l'excitation des cordes réalisée par le guitariste et son médiator peut faire atteindre aux vibrations de cordes des amplitudes sortant du domaine linéaire. De plus, l'intérêt des guitaristes pour les domaines des moyennes fréquences est manifeste, en témoignent les continuelles références aux bandes des BAS-MÉDIUMS, MÉDIUMS et HAUT-MÉDIUMS. Pour décrire de telles fréquences, l'utilisation d'indicateurs tels que la conductance moyenne dans les domaines basses et moyennes fréquences semble plus indiquée que celle des paramètres modaux, qui maintiennent nécessairement l'étude dans le domaine des basses fréquences (où le recouvrement modal est faible, pour permettre une identification fiable).

1. Des études prospectives sous forme de projets tutorés d'étudiants ont eu lieu lors de cette thèse.

➢ Vers une modélisation de la variabilité inter-individuelle du comportement vibratoire

L'identification, la modélisation et la prévision des variabilités ou incertitudes dans les paramètres vibratoires de structures industrielles produites en masse est un sujet porteur à notre époque, en témoigne la tenue de la conférence bisannuelle *Uncertainty in Structural Dynamics (USD)*[2]. Notre travail s'est inscrit dans cette dynamique en proposant d'identifier la variabilité inter-individuelle des paramètres modaux au sein d'une population de guitares électriques. L'identification de la variabilité est une première étape vers sa modélisation et sa prévision, qui pourraient intéresser l'industriel producteur de guitares.

Gardons en tête la limitation de la mesure des seuls paramètres modaux, qui n'expliquent pas l'intégralité de la contribution de la lutherie au son (voir chapitre 7). La modélisation de la variabilité inter-individuelle du comportement modal des guitares devrait permettre d'examiner d'autres indicateurs mécaniques.

➢ Quelle est l'influence du musicien sur le comportement vibratoire de l'instrument ?

Nous parlons ici d'une limitation de notre approche mécanique : nous avons réduit le système mécanique au seul instrument et délibérément écarté le musicien. Ceci a permis de réduire l'objet d'étude, rendant possible le développement de modèles et méthodes expérimentales simples. On peut néanmoins s'interroger sur l'influence du musicien sur le comportement vibratoire de l'instrument. En effet, le guitariste électrique, par sa tenue de l'instrument, génère sur celui-ci des conditions aux limites qui ne sont pas ordinaires pour le mécanicien. Les contacts entre le corps du guitariste et la guitare se réalisent :

- ➢ au niveau de la main (gauche dans la plupart des cas) qui entoure le manche et exerce une pression ponctuelle particulière à l'endroit où la corde est frettée ;
- ➢ entre le ventre (et peut-être la poitrine) du musicien et le dos du corps de la guitare ;
- ➢ entre la cuisse (droite dans la plupart des cas) du musicien et le bas du corps de la guitare, si le guitariste joue en position assise.

Une étude préliminaire a été effectuée et publiée [Le Carrou *et al.* 2014a]. Il s'agissait de procéder à l'analyse modale d'une guitare électrique *solid body* en situation de jeu, c'est-à-dire quand le musicien tient la guitare. Dans une pespective écologique, il n'est peut-être pas judicieux (et confortable pour le guitariste !) de procéder à une analyse modale classique avec une instrumentation de type marteau d'impact. Une méthode d'analyse modale opérationnelle a donc été préférée : l'excitation de la structure est fournie par le guitariste qui joue les cordes de manière habituelle. La guitare est équipée de neuf accéléromètres positionnés le long du manche et l'excitation de la structure est réalisée par le guitariste qui met la corde en vibration avec son médiator. Plusieurs mesures sont réalisées : le guitariste appuie successivement sur différentes frettes le long du manche, en se tenant soit assis soit debout. Si la connaissance de la géométrie des modes est requise par ailleurs, les algorithmes d'analyse modale opérationnelle permettent d'identifier les autres paramètres modaux de manière autonome.

Les paramètres modaux identifiés pour chaque position du musicien sont comparés aux paramètres modaux issus d'une analyse modale classique en conditions libres. Pas de différence significative en termes de fréquence modale n'est trouvée. En revanche, les amortissements modaux subissent des changements. La main gauche du musicien est trouvée se comporter comme un amortisseur ponctuel à l'endroit où elle tient le manche (où la corde est frettée). Si la main gauche est positionnée sur le ventre de vibration

2. Cette conférence se tient à Leuven en Belgique et est organisée par le département de mécanique de la *Katholieke Universiteit Leuven*.

d'un mode de manche, alors celui-ci sera très amorti. Si au contraire la main se situe proche d'un nœud de vibration d'un mode de manche, alors l'influence de la main sera négligeable. Les mêmes phénomènes sont observés pour les contacts entre le guitariste et la guitare du côté du corps : cuisse et abdomen agissent également tels des amortisseurs ponctuels. Mais, ainsi qu'il a été vu au cours de cette thèse, la plus grande partie du transfert d'énergie entre corde et structure se réalisant au niveau du manche, il est attendu que l'amortissement procuré par la cuisse ou l'abdomen du musicien soit d'une importance secondaire pour le son.

En résumé, le musicien, par sa tenue de l'instrument, agit comme un amortisseur ponctuel. Ce faisant, il ne modifie ni la géométrie des modes, ni leur fréquence. Les études des instruments en conditions libres sans instrumentiste restent donc valables et souhaitables car simples à réaliser pour un résultat précis.

Il reste à réaliser un modèle de l'amortissement procuré par l'instrumentiste pour pouvoir quantifier l'abaissement des valeurs de conductance « vue » par la corde à l'endroit du manche où la note est produite. Une amélioration du modèle de couplage corde–structure développé dans cette thèse pourra être proposé, prenant en compte l'effet mécanique du musicien. Qualitativement, dans le cas où le contact entre l'instrument et le corps du guitariste se fait à l'endroit d'un ventre de certains modes, il est attendu que les « pics » de mobilité soient abaissés, donc que le couplage entre la corde et la structure soit moins prononcé, et que finalement la « gravité » du potentiel *dead spot* soit amoindrie.

➢ Comment le guitariste impose-t-il son identité à l'instrument ?

Parfois les musiciens, tout en ne niant pas l'importance de la lutherie, insistent sur l'influence du guitariste, en tant qu'expert du son et de son façonnage :

> *Le son aujourd'hui, avec une guitare à même 100, à 80 euro, on peut l'avoir, le son c'est les doigts, c'est l'effet qu'on va mettre derrière, mais avant tout c'est les doigts.* (Sujet 10 de l'étude présentée en section 3.2)

> *Soyons clair, quand tu es dans une bonne période, que tu joues tous les jours, que tu es en forme, tu jouerais sur n'importe quelle guitare [...] 80% du son vient des doigts, on ne va pas se la jouer, c'est clair. Mais bon, quand desfois, c'est comme des sportifs, quand tu sens que tu n'es pas dans une bonne période, que tu n'es pas au top de ta forme, c'est quand même moins pénible d'avoir les baskets adéquates pour faire un 100 mètres que d'avoir des sabots. J'ai envie de dire que la somme des petits détails comme ça, cela aide quand même à être un minimum à l'aise, confort quand tu es sur des jours pas exceptionnels.* (Sujet 6, de l'étude présentée en section 3.1)

On le voit, la question de l'interaction entre le musicien et son instrument est souvent posée et discutée. De futures études pourraient orienter l'analyse du corpus de verbalisations sur les formes verbales (c'est-à-dire relatives aux verbes), pour découvrir quelles sont les possibilités d'action du guitariste sur l'instrument et sur le son, et comment le musicien imprime son identité à l'instrument.

❑ Perspectives du point de vue du luthier

➢ Elements de lutherie

Nous avons proposé une quantification physique de l'influence des éléments de lutherie qui peut être vue comme la confirmation d'un savoir empirique des luthiers. Cette quantification peut aussi être vue comme la possibilité donnée aux luthiers d'anticiper le résultat de futures tentatives d'innovation en lutherie. Des mesures sur échantillons et de la synthèse sonore appuyée sur des modèles physiques pourraient aider le luthier à prévoir les effets de changements d'éléments de lutherie.

➢ Suivi de fabrication en atelier et en usine

Nous avons proposé des outils et méthodes pour suivre, surveiller et contrôler la production de guitares électriques tout au long du procédé de fabrication. Nous proposons notamment d'observer l'évolution des fréquences modales au fil des différentes étapes de construction. Ceci a plusieurs utilités pour le fabricant :

- ➢ Nous connaissons l'influence en termes mécaniques de chaque étape de construction. Le scientifique peut donc identifier les étapes cruciales de la fabrication de la guitare, où le luthier peut et doit intervenir pour garantir une fabrication de qualité.
- ➢ La connaissance de la variabilité des paramètres modaux à chaque étape de fabrication permet de situer chaque exemplaire dans l'ensemble de la production. Une mesure vibratoire dès le début de la production, par exemple sur les pièces de bois débitées et grossièrement mises aux dimensions, permet d'assurer ou non que la guitare qui résultera de ces pièces aura les caractéristiques escomptées.

La mesure en fin de chaîne de production industrielle ou artisanale permet non seulement de contrôler la qualité des instruments, mais aussi de donner la possibilité au fabricant de proposer une caractérisation quantitative de chaque exemplaire d'un même modèle, et ainsi de communiquer à la fois sur les caractéristiques communes à tous les exemplaires d'un même modèle, et sur les spécificités propres à chaque exemplaire.

❑ Perspectives du point de vue du musicien

Cette thèse donne les outils pour montrer que la qualité de la lutherie d'un instrument électroacoustique a aussi de l'importance, et que le son n'est pas dû qu'à l'électronique. Ceci confirme ce qu'affirmaient déjà certains guitaristes. Ce travail de thèse peut amener à sensibiliser d'autres musiciens à l'influence des éléments de lutherie sur le son, et peut amener certains guitaristes à franchir le seuil d'un atelier de lutherie et alimenter le dialogue entre luthiers et musiciens pour créer des instruments innovants et adaptés aux besoins des guitaristes.

➢ Les éléments de lutherie sont perceptibles

Ce travail de thèse a montré que la responsabilité du son n'incombait pas seulement à l'électronique, mais aussi aux éléments de lutherie, qui sont décrits par la mécanique. La constitution de « termes » dans le discours des guitaristes et l'identification de leur lien avec le ressenti a permis d'identifier des critères (trois pour le cas de l'influence du matériau de touche) pertinents pour faire la différence entre diverses variations d'un élément de lutherie. De plus, les études mécaniques menées dans ce travail apportent une justification physique à l'influence des éléments de lutherie sur le son et à l'attention que certains guitaristes y portent lors d'essais de matériel. Un possible apport de notre travail serait une évolution de l'écoute qu'ont certains guitaristes de leur instrument, et une attention plus grande portée aux éléments de lutherie lors du choix d'une guitare.

➢ Chaque guitare est différente

Prenant exemple sur le jugement des guitaristes, la guitare électrique *solid body* serait probablement à considérer comme un tout :

> *Si tu fais les petites annonces, il faut que tu puisses l'essayer [la guitare], tu ne vas pas acheter une guitare sur internet comme ça : « ah ouais, c'est ce modèle-là que je veux ». Elle arrive et ce n'est pas du tout ce que tu voulais.* (Sujet 9 de l'étude présentée en section 3.1)

Si elle pouvait se le permettre non sans un brin de provocation, cette thèse pourrait adresser le message suivant aux guitaristes : « oui, les éléments de lutherie ont une influence sur le son, mais préférez essayer vos instruments avant de les acheter ! »

❑ Vers le point de vue du vendeur ?

Au cours de ce travail, nous n'avons pas eu le temps de considérer le point de vue du vendeur de guitares électriques. Celui-ci s'avère néanmoins être un élément essentiel de l'environnement de l'instrument, situé à l'interface [3] entre le fabricant (industriel ou artisan) et le guitariste. En effet, c'est chez le vendeur que se rend le musicien souhaitant faire l'acquisition d'un instrument. Le guitariste peut ainsi bénéficier de l'expertise du commerçant, qui a pu se forger une opinion très précise et une écoute très fine de l'instrument, par la connaissance de toutes les guitares qui sont passées dans son magasin.

Par ce travail de thèse, nous espérons également faire naître un dialogue entre le vendeur et le scientifique [4]. Dans une telle discussion, nous pourrions proposer des pistes de réflexion pour permettre au vendeur d'offrir des conseils encore plus personnalisés [5] au musicien, en fonction de ses envies, attentes et goûts musicaux. Des points comme la part de la lutherie dans le son final de l'instrument, ou la possibilité de proposer à l'essai et à la vente différents exemplaires du même modèle de guitare, pourraient être abordés, en restant conscients des contraintes économiques, systémiques et managériales qui s'imposent au vendeur.

3. Parfois par l'intermédiaire d'un importateur.
4. A l'image des dialogues existant entre luthier et musicien, musicien et scientifique, luthier et scientifique, vendeur et musicien, luthier et vendeur.
5. Ceci existe évidemment déjà, nous suggérons d'ajouter des arguments supplémentaires à ces conseils.

Bibliographie

Antunes, J., & Inácio, O. 2007. A substructure method for the computation of complex string/body coupled modes from the unconstrained subsystems. *Pages 1–6 of : Proceedings of the 19th International Congress on Acoustics (ICA).*

Arcas Castillo, K. 2009. *Simulation numérique d'un réverbérateur à plaque.* Ph.D. thesis, Ecole nationale supérieure des techniques avancées.

Ashby, M. F., & Jones, D. R. H. 2005. *Engineering Materials I.* 3rd edn. Oxford, UK : Elsevier.

Atsushi, M., & Martens, W. L. 2001. Perceptual and semantic scaling for user-centered control over distortion-based guitar effects. *In : Proceedings of the 110th international convention of the Audio Engineering Society (AES).*

Atsushi, M., & Martens, W. L. 2005. Timbre of nonlinear distortion effects : perceptual attributes beyond sharpness ? *In : Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology (CIM).*

Ballester, Jordi, Abdi, Hervé, Langlois, Jennifer, Peyron, Dominique, & Valentin, Dominique. 2009. The Odor of Colors : Can Wine Experts and Novices Distinguish the Odors of White, Red, and Rosé Wines ? *Chemosensory Perception*, **2**(4), 203–213.

Barthélémy, J.-P., & Guénoche, A. 1991. *Trees and proximity representations.* Chichester (New York) : J. Wiley.

Barthélémy, J.-P., & Luong, N. X. 57–80. Sur la topologie d'un arbre phylogénétique : aspects théoriques, algorithmes et applications à l'analyse de données textuelles. *Mathématiques et sciences humaines*, **100**, 1987.

Bernhard, R., & Kompella, M. 1993. Measurement of the statistical variation of structural-acoustic characteristics of automotive vehicles. *SAE*, **12**, 65–81.

Bernhard, R. J. 1996. The limits of predictability due to manufacturing and environmentally induced uncertainty. *Pages 2867–2872 of : Proceedings of Inter-Noise 96.*

Bonnet, C. 1986. *Manuel pratique de psychophysique.* Collection U. Psychologie. Armand Colin.

Borello, G., Gagliardini, L., & Thenail, D. 2008. Virtual statistical energy analysis for vibroacoustic industrial prediction. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **123**(5), 3314–3314.

Boullosa, R. B. 2003. A note on the sound radiation from the classical guitar : influence of energy input via the string termination at the fret. *Acta acustica united with acustica*, **89**, 718–721.

Boullosa, R. R. 2002. Vibration measurements in the classical guitar. *Appl. Ac.*, **62**, 311–322.

Bourgeois, J.-P. 2009. *Théorie physique du micro électromagnétique pour guitare.* http ://www.jpbourgeois.org/guitar/micro.html.

Bruner, J. 1990. *Acts of meanings.* Cambridge, MA (USA) : Harvard university press.

Brunswik, E. 1943. Organismic achievement and environmental probability. *Psychological review*, **50**, 255–272.

Brunswik, E. 1952. *The conceptual framework of psychology.* Chicago, IL (USA) : University of Chicago press.

Brunswik, E. 1956. *Perception and the representative design of psychological experiments.* Berkeley, CA (USA) : University of California press.

Caclin, A., McAdams, S., Smith, B.K., & Winsberg, S. 2005. Acoustic correlates of timbre space dimensions : a confirmatory study using synthetic tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, **118 (1)**, 471–482.

Cance, C. 2009. Stimuli, dispositifs expérimentaux et mondes construits. *Pages 107–136 of :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Cance, Caroline. 2008. *Expériences de la couleur, ressources linguistiques et processus discursifs dans la construction d'un espace visuel : l'habitacle automobile.* Ph.D. thesis, Université Paris 3.

Carter, W. 2007. *The Gibson electric guitar book : seventy years of classic guitars.* Backbeat books.

Chadefaux, D., Le Carrou, J.-L., Fabre, B., & Daudet, L. 2012. Experimentally-based description of harp plucking. *J. Acoust. Soc. Am.*, **131**, 844–855.

Chaigne, A., & Kergomard, J. 2008. *Acoustique des instruments de musique.* Paris (France) : Belin.

Charle, F. 1998. De la guitare acoustique à la guitare électrique. *In :* de Monltluçon, Musées (ed), *Guitares, guitaristes et bassistes électriques.* Montluçon (France) : Musées de Monltluçon.

Cheminée, P. 2006. "Vous avez dit "clair" ?" Le lexique des pianistes, entre sens commun et terminologie. *Pages 49–66 of :* Dubois, D. (ed), *Cahiers du LCPE* ***7***. Paris (France) : LCPE/LAM.

Cheminée, P. 2009. Est-ce bien « clair » ? Stabilité, instabilité et polysémie d'une forme lexicale en contexte. *Pages 309–338 of :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Cheminée, P., & Dubois, D. 2009. « Bon » piano pour les musiciens : analyse linguistique de leur discours. *Pages 5–20 of :* Fumoleau, F., & Doutaut, V. (eds), *Musique et technique* ***4***. Le Mans (France) : Itemm.

Chen, J.-S., Ge, Y., & Zhang, H. 2012. Torsional vibrations of a cantilever with lateral friction in a resonance friction microscope. *Chin. Phys. Lett.*, **29 (1)**, 1–3.

CIRAD. 2014. *Database on wood "Tropix 7".* tropix.cirad.fr.

Cohen, I., & Hélie, T. 2010. Real-time simulation of a guitar power amplifier. *In : Proceedings of DAFx10.* paper 45.

CSFI. 2010 (12). *Le marché français des instruments de musique et accessoires.* Tech. rept. Chambre syndicale de la facture instrumentale (CSFI).

Cuesta, C. 1990. *Corde vibrante isolée mécaniquement, amortissements, non-linéarités ; application au clavecin et à la tampoura.* Ph.D. thesis, Université du Maine.

Cuesta, C., & Valette, C. 1988. Time-evolution of the vibration of the strings of a harpsichord. *Acustica*, **66**, 37–45.

Cuesta, C., & Valette, C. 1989. Harpsichord string transient vibration on attack. *Acustica*, **668**, 112–122.

de Saussure, F. 1955, 1916. *Cours de linguistique générale.* Payot.

Di Domenico, D., Morris, K., & Keilson, S. 1998a. Signal processing analyses of the effects of guitar geometry on musical timbre. *Pages 2221–2222 of : Proceedings of the International Congress on Acoustics (ICA).*

Di Domenico, D., Morris, K., & Keilson, S. 1998b. Signal processing analyses of the effects of guitar geometry on musical timbre. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 3006.

Dubois, D. 1991. *Sémantique et cognition.* Paris (France) : Editions du CNRS.

Dubois, D. 2000. Categories as acts of meaning : the case of categories in olfaction and audition. *Cognitive science quarterly*, **1**, 35–68.

Dubois, D. 2009a. Le sentir et le dire : définir l'objet et construire la démarche. *Pages 13–45 of :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Dubois, D. 2009b. *Le Sentir et le Dire : concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives.* Paris (France) : l'Harmattan.

Dubois, D., & Giboreau, A. 2006. Descriptors : Attributes ? Labels ? Terms ? Names ? *Food quality and preference*, **17**, 671–672.

Duchossoir, A. 1991. *The Fender Telecaster, the detailed story of America's senior solid body electric guitar.* Musical Instruments Series. Milwaukee, WI, USA : Hal Leonard Corporation.

Duchossoir, A. 1994. *The Fender Stratocaster, a complete guide to the history and evolution of the world's most famous guitar.* Musical Instruments Series. Milwaukee, WI, USA : Hal Leonard Corporation.

Dumoulin, R., & Simon, E. 2008. Quand l'innovation est un désavantage concurrentiel, le cas de la guitare électrique. *Gestion 2000*, **3**, 147–165.

Durand, J.-F., Soize, C., & Gagliardini, L. 2008. Structural-acoustic modeling of automotive vehicles in presence of uncertainties and experimental identification and validation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **124 (3)**, 1513–1525.

Elejabarietta, M. J., Ezcura, A., & Santamarìa, C. 2001. Vibrational behaviour of the guitar soundboard analysed by the finite element method. *Acta Acustica united with acustica*, **87**, 128–136.

Elejabarrieta, M. J., Ezcurra, A., & Santamarìa, C. 2000. Evolution of the vibrational behavior of a guitar soundboard along successive construction phases by means of the modal analysis technique. *J. Acoust. Soc. Am.*, **108 (1)**, 369–378.

Elie, B. 2012. *Caractérisation vibratoire et acoustique des instruments à cordes – Application à la facture instrumentale.* Ph.D. thesis, Université du Maine.

Elie, B., Gautier, F., & David, B. 2012. Macro parameters describing the mechanical behavior of classical guitars. *J. Acoust. Soc. Am.*, **132**, 4013–4024.

Elie, B., Gautier, F., & David, B. 2013. Estimation of mechanical properties of panels based on a modal density and mean mobility measurements. *Mech. syst. and sig. proc.*, **40**, 628–644.

Esposito, E. 2003. A comparative study of the vibro-acoustical behaviour of electric guitars produced in different decades. *Pages 125–128 of : Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03).*

Esposito, E., Santolini, C., & Scalise, L. 2002. Axe work ii : vibro-acoustical study of solid body electric guitars. *Pages 207–218 of : 5th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 4827.*

Evangelista, G. 2011. Physical model of the string-fret interaction. *Pages 345–351 of : Proceedings of DAFx11.*

Ewins, D. J. 1984. *Modal testing : theory and practice.* Research studies press Ltd., John Wiley & sons.

Fechner, G.T. 1860. *Elemente der Psychophysik.* Breitkopf und Härtel.

Fleischer, H. 2005. Vibration of an electric bass guitar. *Acta Acustica united with Acustica*, **91**, 247–260.

Fleischer, H., & Zwicker, T. 1998. Mechanical vibrations of electric guitars. *Acta Acustica united with Acustica*, **84**, 758–765.

Fleischer, H., & Zwicker, T. 1999. Investigating dead spots of electric guitars. *Acta Acustica united with Acustica*, **85**, 128–135.

Fletcher, H., Blackham, E.D., & Stratton, R. 1962. Quality of piano tones. *The Journal of the acoustical society of America*, **34 (5)**, 749–761.

Fletcher, N. H. 1976. Plucked strings – a review. *Catgut Acoust. Soc. Newsl.*, **26**, 13–17.

Fletcher, N. H. 1977. Analysis of the design and performance of harpsichords. *Acustica*, **37**, 139–147.

Fournier, V. 2012. La guitare électrique, femme fatale. *Guitar Part magazine*, **221**, 17.

French, M. 2007. Structural modification of stringed instruments. *Mech. syst. and sig. proc.*, **21**, 98–107.

French, R. M. 2009. *Engineering the guitar.* New York City : Springer.

Fricke, J. J. 1998. Jimi hendrix' use of distortion to extend the performance vocabulary of the electric guitar. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 2797.

Fritz, C., Blackwell, A. F., Cross, I., Woodhouse, J., & Moore, B. C. J. 2012. Exploring violin sound quality : investigating English timbre descriptors and correlating resynthesized acoustical modifications with perceptual properties. *J. Acoust. Soc. Am.*, **131 (1)**, 783–794.

Gagliardini, L., Durand, J.-F., & Soize, C. 2008. Stochastic modeling of the vibro-acoustic behavior of production cars. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **123**(5), 3533–3533.

Gaillard, P. 2000. *Etude de la perception des transitoires d'attaques des sons de steeldrums : particularités acoustiques, transformation par synthèse et catégorisation.* Ph.D. thesis, Université de Toulouse II - Le Mirail.

Gaillard, P. 2009. Laissez-nous trier ! TCL-LabX et les tâches de catégorisation libre de sons. *Pages 189–210 of :* Dubois, Danièle (ed), *Le Sentir et le dire : concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives.* Paris (France) : l'Harmattan.

Gaillard, P., & Poitevineau, J. 2014. *Website for TCL-LabX and ADDTREE.* http ://petra.univ-tlse2.fr/tcl-labx/.

Gallina, A., Lisowski, W., Pichler, L., Stachowski, A., & Uhl, T. 2012. Analysis of natural frequency variability of a brake component. *Mechanical Systems and Signal Processing*, **32**, 188–199.

García-Máyen, H., & Santillaán, A. 2011. The effect of the coupling between the top plate and the fingerboard on the acoustic power radiated by a classical guitar. *J. Acoust. Soc. Am.*, **129 (3)**, 1153–1156.

Gay, D., & Van Hoa, S. 2007. *Composite Materials : Design And Applications.* C R C Press LLC.

Giboreau, A., Dacremont, C., Egoroff, C., Guerrand, S., Urdapilleta, I., Candel, D., & Dubois, D. 2007. Defining sensory descriptors : towards writing guidelines based on terminology. *Food quality and preference*, **18**, 265–274.

Giboreau, A., Dacremont, C., Guerrand, S., & Dubois, D. 2009. Décrire : identifier ou catégoriser ? *Pages 211–232 of :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Gibson, J. 1986. *The ecological approach to visual perception.* Boston (Massachussetts) : Houghton Mifflin.

Godin, C. 1998. *Heavy metal : les techniques.* cassette VHS (Birdland production).

Gough, C. E. 1981. The theory of string resonances on musical instruments. *Acustica*, **49**, 124–141.

Gough, C. E. 1983. Acoustical studies of stringed instruments using string resonances. *Pages 19–45 of : Proceedings of SMAC 83.*

Griffith, D. T., Casias, M., & Smith, G. 2006. Experimental uncertainty quantification of a class of wind turbines blades. *Pages 1–16 of : Proceedings of IMAC-XXIV.*

Guastavino, C. 2003. *Etude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement urbain.* Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.

Guastavino, C. 2007. Categorisation of environmental sounds. *Canadian journal of experimental psychology*, **61 (1)**, 54–63.

Guastavino, C. 2009. Validité écologique des dispositifs expérimentaux. Pour qui ? Pour quoi ? Pour quoi faire ? *Pages 233–252 of :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Guastavino, C., Katz, B. F. G., Polack, J.-D., Levitin, D. J., & Dubois, D. 2005. Ecological validity of soundscape reproduction. *Acta Acustica United with Acustica*, **91**, 333–341.

Guénoche, A., & Garreta, H. 2000. Can we have confidence in a tree representation ? *Pages 45–56 of : Proceedings of JOBIM.*

Guillaume, P., Verboven, P., S.Vanlanduit, H. Van der Auweraer, & Peeters, B. 2003. A poly-reference implementation of the least-squares complex frequency-domain estimator. *In : Proceedings of IMAC-XXI.*

Guitard, D. 1987. *Mécanique du matériau bois et composites.* Collection Nabla. Cépaduès éditions.

Guyader, J.-L., & Parizet, E. 1997. Uncertainty of vibroacoustic behaviour of industrially identical structures. A new challenge for structural acoustic people. *In : Proceedings of the 5th international congress on sound and vibration (ICSV).*

Guyot, F. 1996. *Etude de la perception sonore en termes de reconnaissance et d'appréciation qualitative : une approche par la catégorisation.* Ph.D. thesis, Université du Maine.

Guyot, F., Castellengo, M., & Fabre, B. 1997. Etude de la catégorisation d'un corpus de bruits domestiques. *Pages 41–58 of :* Dubois, D. (ed), *Catégorisation et cognition : de la perception au discours.* Paris (France) : Kimé.

Halpin, J. C., & Kardos, J. L. 1976. The Halpin-Tsai equations : a review. *Polymer engineering and science*, **16 (5)**, 344–352.

Hanson, R. J. 1987. Optoelectronic detection of string vibration. *Phys. Teach.*, **25**, 165–166.

Hill, T. J. W., & Richardson, B. E. 2004. Acoustical parameters for the characterisation of the classical guitar. *Acta Acustica united with Acustica*, **90**, 335–348.

Hills, E., Mace, B. R., & Ferguson, N. S. 2008. Acoustic response variability in automotive vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, **321**, 286–304.

Holters, M., & Zölzer, U. 2011. Physical modeling of a wah-wah effect pedal as a case study for application of the nodal DK method to circuits with variable parts. *Pages 31–36 of : Proceedings of DAFx11.*

Holtzman, B., Candler, J., Turk, M., & Peter, D. 2013. Seismic sound lab : sights, sounds and perception of the earth as an acoustic space. *Pages 128–141 of : Proceedings of the 10th International Symposium on Computer Music Multidisciplinary Research (CMMR).*

Horton, N. G., & Moore, T. R. 2009. Modeling the magnetic pickup of an electric guitar. *Am. J. Phys.*, **77 (2)**, 144–150.

Hunter, D. 2008. *The guitar pickup handbook.* New York City : Backbeat books, Hal Leonard.

Hutchins, C. M. 1981. The acoustics of violin plates. *Scientific American*, **245 (4)**, 126–135.

Hutchins, C. M., Hopping, A. S., & Saunders, F. A. 1960. Subharmonics and plate tap tones in violin acoustics. *J. Acoust. Soc. Am.*, **32 (11)**, 1443–1449.

Inácio, O., Antunes, J., & Wright, M.C.M. 260–286. Computational modelling of string-body interaction for the violin family and simulation of wolf notes. *Journal of sound and vibration*, **310**, 2008.

Iwanade, Y., & McCarty, T. 1998. *Beauty of the Burst : Gibson Sunburst Les Pauls from '58 to '60.* Hal Leonard Corporation.

Jansson, E. 2002. Chapter 5 : Vibration properties of the wood and tuning of violin plates. *Pages 5.1–5.31 of :* Jansson, E. (ed), *Acoustics for violin and guitar makers.* Stockholm (Sweden) : KTH.

Jansson, E.V. 1983. *The function, construction and quality of the guitar.* Royal swedish academy.

Järveläinen, H., Välimäki, Vesa, & Karjalainen, Matti. 2001. Audibility of the timbral effects of inharmonicity in stringed instrument tones. *Acoustics Research Letters Online*, **2 (3)**, 79–84.

Jungmann, T. 1994. *Theoretical and practical studies on the behaviour of electric guitar pick-ups.* M.Phil. thesis, Fachhochschule Kempten (Germany) / Helsinki University of Technology (Finland).

Karjalainen, M., & Pakarinen, J. 2006. Wave digital simulation of a vacuum-tube amplifier. *Pages 59–62 of : Proceedings of the international conference on acoustics, speech, and signal processing (ICASSP).*

Karjalainen, M., Pettinen, H., & Välimäki, V. 1999. More acoustic sounding timbre from guitar pickups. *In : 2nd COST G-6 Workshop on Digital Audio Effects (DAFx99.*

Karjalainen, M., Mäki-Patola, T., A.Kanerva, Huovilainen, A., & Jänis, P. 2004. Virtual air guitar. *In : Proceedings of the 117th convention of the Audio Engineering Society (AES).* paper 6203.

Kröning, O., Dempwolf, K., & Zölzer, U. 2011. Analysis and simulation of an analog guitar compressor. *Pages 205–208 of : Proceedings of DAFx11.*

Lakoff, G. 1990. *Women, Fire, and Dangerous Things*. Cognitive science/linguistics/philosophy. University of Chicago Press.

Lambourg, C., & Chaigne, A. 1993. Measurements and Modeling of the Admittance Matrix at the Bridge in Guitars. *Pages 448–452 of : Proceedings of SMAC 93*.

Lane, J., & Kasparis, T. 2012. A frequency error model for fretted string instruments. *Acta acustica united with acustica*, **98**, 936–944.

Lavoie, M. 2013. *Conceptualisation et communication des nuances de timbre à la guitare classique*. Ph.D. thesis, Université de Montréal.

Le Carrou, J.-L., Gautier, F., Dauchez, N., & Gilbert, J. 2005. Modelling of sympathetic string vibrations. *Acta Acustica united with Acustica*, **91**, 277–288.

Le Carrou, J.-L., Gautier, F., & Badeau, R. 2009. Sympathetic string modes in the concert harp. *Acta Acustica united with Acustica*, **95**, 744–752.

Le Carrou, J.-L., Frelat, J., Mancel, A., & Navarret, B. 2010. Guitare électrique : quel rôle pour les éléments de lutherie ? *In : Proceedings of 10e congrès français d'acoustique*.

Le Carrou, J.-L., Chomette, B., & Paté, A. 2014a. Influence of the instrumentalist on the electric guitar vibratory behaviour. *In : Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*.

Le Carrou, J.-L., Chadefaux, D., Seydoux, L., & Fabre, B. 2014b. A low-cost high-precision measurement method of string motion. *Journal of Sound and Vibration*, **333**(17), 3881–3888.

Leach Jr., W.M. 1995. SPICE models for vacuum-tube amplifiers. *Journal of the Audio Engineering Society (AES)*, **43 (3)**, 117–126.

Lemarquand, G., & Lemarquand, V. 2007. Calculation method of permanent-magnet pickup for electric guitars. *IEEE trans. on magnetics*, **43 (9)**, 3573–3578.

Ley, G., & Giraud, F. 2013. Changez de micros. *Pages 43–51 of :* Fillette, B. (ed), *Guitar Part 234*. Montreuil (France) : EDV.

Lihoreau, B., Lotton, P., & Brasseur, E. 2014. Experimental study of a guitar pickup. *Pages 355–360 of : Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (ISMA)*.

Lindroos, N., Pettinen, H., & Välimäki, V. 2011. Parametric electric guitar synthesis. *Computer music journal*, **35 (3)**, 18–37.

Lotton, P. 2008a. Guitare électrique microphones : historique et évolutions. *Pages 27–36 of :* Niqueux, V., & Doutaut, V. (eds), *Musique et technique 3*. Le Mans (France) : Itemm.

Lotton, P. 2008b. Sonorité des microphones de guitare. *Pages 43–59 of :* Niqueux, V., & Doutaut, V. (eds), *Musique et technique 3*. Le Mans (France) : Itemm.

Lähdeoja, O., Navarret, B., Quintans, S., & Sedes, A. 2010. The electric guitar : an augmented instrument and a tool for musical composition. *Journal of interdisciplinary music studies*, **4 (2)**, 37–54.

Macak, J., & Schimmel, J. 2010. Real-time guitar tube amplifier simulation using an approximation of differential equations. *In : Proceedings of DAFx10*. paper 12.

Macak, J., & Schimmel, J. 2011. Simulation of a vacuum-tube push-pull guitar power amplifier. *Pages 59–62 of : Proceedings of DAFx11*.

Mamou-Mani, A., & Sharp, D. B. 2010. Evaluating the suitability of acoustical measurement techniques and psychophysical testing for studiying the consistency of musical wind instrument manufacturing. *Applied Acoustics*, **71**, 668–674.

Mamou-Mani, A., Sharp, D. B., Meurisse, T., & Ring, W. 2012. Investigating the consistency of woodwind instrument manufacturing by comparing five nominally identical oboes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **131 (1)**, 728–736.

Marmaras, N., & Zarboutis, N. 1997. Ergonomic redesign of the electric guitar. *Applied ergonomics*, **28 (1)**, 59–67.

Martens, W. L., & Atsushi, M. 2006. Categories of perception for vibrato, flange, and stereo chorus : mapping out the musically useful ranges of modulation rate and depth for delay-based effects. *Pages 149–152 of : Proceedings of the 9th international conference on digital audio effects (DAFx).*

McIntyre, M. E., & Woodhouse, J. 1978. The acoustics of stringed musical instruments. *Interdisciplinary science reviews*, **3 (2)**, 157–173.

Meyer, J. 1983a. The function of the guitar body and its dependence upon constructional details. *Pages 76–94 of :* Jansson, E.V. (ed), *Function, constuction and quality of the guitar.* Stockholm (Sweden) : KTH.

Meyer, J. 1983b. Quality aspects of the guitar tone. *Pages 51–76 of :* Jansson, E. V. (ed), *Function, constuction and quality of the guitar.* Stockholm (Sweden) : KTH.

Mignon, P. 1998. La guitare électrique dans le rock. *In :* de Monltluçon, Musées (ed), *Guitares, guitaristes et bassistes électriques.* Montlluçon (France) : Musées de Monltluçon.

Morel, J., Marquis-Favre, C., Dubois, D., & Pierrette, M. 2012. Road traffic in urban areas : a perceptual and cognitive typology of pass-by noise. *Acta acustica united with acustica*, **98**, 166–178.

Morel, Julien. 2005. *Caractérisation physique et perceptive du bruit routier urbain pour la définition d'indicateurs de gêne sonore en situation de mono-exposition et de multi-exposition en présence de bruit industriel.* Ph.D. thesis, Ecole centrale de Lyon.

Morse, P.M.C., & Ingard, K.U. 1986. *Theoretical Acoustics.* International series in pure and applied physics. New York : Princeton University Press.

Mottola, R.M. 2007. Sustain and electric guitar neck joint type. *American Lutherie*, **91**, 52–55.

Navarret, B. 2006. *Etude de l'influence des éléments de lutherie de la guitare électrique « solid body » sur le son perçu.* M.Phil. thesis, Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris.

Navarret, B. 2009. Etude de la qualité sonore de la guitare électrique *solid body* : influence du matériau du corps sur le son amplifié perçu. *Pages 43–59 of :* Fumoleau, F., & Doutaut, V. (eds), *Musique et technique 4.* Le Mans (France) : Itemm.

Navarret, B. 2013a. *Caractériser la guitare électrique : définitions, organologie et analyse de données verbales.* Ph.D. thesis, Université Paris 8 Vincennes - Saint-Denis.

Navarret, B. 2013b. Les Paul – 60 ans de légende. *Pages 34–43 of :* Fillette, B. (ed), *Guitar Part 232.* Montreuil (France) : EDV.

Navarret, B., & Séguret, C. 2011. 60 ans de Telecaster. *Pages 38–54 of :* Fillette, B. (ed), *Guitar Part 207.* Montreuil (France) : EDV.

Orio, N. 1999. The timbre space of the classical guitar and its relationships with the plucking techniques. *Pages 391–394 of : Proceedings of the International Computer Music Conference (ICMC).*

Pakarinen, J., & Karjalainen, M. 2010. Enhanced wave digital triode model for real-time tube amplifier emulation. *IEEE transactions on audio, speech, and language processing*, **18 (4)**, 738–746.

Parizet, E., & Koehl, V. 2011. Application of free sorting tasks to sound quality experiments. *Applied Acoustics*, **73**, 61–65.

Parizet, E., Hamzaoui, N., & Sabatié, G. 2005. Comparison of some listening test methods : a case study. *Acta Acustica United with Acustica*, **91**, 356–364.

Paté, A. 2011. *Etude vibroacoustique et perceptive de guitares électriques.* M.Phil. thesis, Université Pierre et Marie Curie.

Paté, A., Navarret, B., Dumoulin, R., J.-L. Le Carrou, Fabre, B., & Doutaut, V. 2012a. About the electric guitar : a cross-disciplinary context for an acoustical study. *Pages 1–6 of : Proceedings of Acoustics 2012.*

Paté, A., J.-L. Le Carrou, Navarret, B., Dubois, D., & Fabre, B. 2012b. A vibro-acoustical and perceptive study of the neck-to-body junction of a solid-body electric guitar. *Pages 1–6 of : Proceedings of Acoustics 2012.*

Paté, A., Le Carrou, J.-L., & Fabre, B. 2013. Ebony vs rosewood : experimental investigation about the influence of the fingerboard on the sound of a solid body electric guitar. *Pages 182–187 of : Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference (SMAC).*

Paté, A., J.-L. Le Carrou, & Fabre, B. 2014a. Modal parameter variability in industrial electric guitar manufacturing. *In : Proceedings of the international conference on uncertainty in structural dynamics (USD).*

Paté, A., J.-L. Le Carrou, Teissier, F., & Fabre, B. 2014b. Monitoring of the making process of a handcrafted electric guitar. *In : Proceedings of the International Symposium on Musical Acoustics (ISMA).*

Paté, A., J.-L. Le Carrou, & Fabre, B. 2014c. Predicting the decay time of solid body electric guitar tones. *J. Acoust. Soc. Am.*, **135 (5)**, 3045–3055.

Pereira, R. M., Junior, A. L., & de Freitas, T. C. 2010. Sobre o acoplamento corda-corpo em guitarras elétricas e sua relaçao com o timbre do instrumento. *Physicæ*, **9**, 24–29.

Piranda, J. 2001. Analyse modale expérimentale. *In : Techniques de l'ingénieur **R 6 180**.*

Poitevineau, J. 2009. Prendre ses distances ! De l'usage raisonné (raisonnable) de quelques statistiques pour les arbres additifs. *In :* Dubois, D. (ed), *Le Sentir et le Dire.* Paris (France) : l'Harmattan.

Queen, D. 1966. From boom boxes to Beatles, Baez and Boccherini, the electric guitar at the crossroads. *In : Proceedings of the 31st Convention of the AES.* paper 450.

Rébillard, J.-J. 1999. *Complete electric guitar.* Vol. 1–4. JJ Rébillard.

Richardson, B. E. 1994. The acoustical development of the guitar. *Journal of the catgut acoustical society*, **2 (5)**, 1–10.

Richardson, B. E., & Roberts, G. W. 1983. The adjustment of mode frequencies in guitars : a study by means of holographic interferometry and finite element analysis. *Pages 285–302 of : Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference (SMAC).*

Rigaud, F., David, B., & Daudet, L. 2013. A parametric model and estimation techniques for the inharmonicity and tuning of the piano. *J. Acoust. Soc. Am.*, **133**, 3107–3118.

Rosch, E., & Lloyd, B. B. 1978. *Cognition and categorization.* Hillsdale, NJ (USA) : Lawrence Erlbaum Associates.

Rossing, T. D., Popp, J., & Polstein, D. 1983. Acoustical response of guitars. *Pages 311–332 of : Proceedings of the Stockholm Musical Acoustics Conference (SMAC).*

Roy, R., Paulraj, A., & Kailath, T. 1986. Esprit : A subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, **34**, 1340–1342.

Russell, D., Haveman, W. S., Broden, W., & Weibull, N. P. 2003. Effect of body shape on vibration of electric guitars. *J. Acoust. Soc. Am.*, **113**, 2316.

Saitis, C., Giordano, B.L., Fritz, C., & Scavone, G.P. 2012. Perceptual evaluation of violins quality : a quantitative analysis of preference judgments by experienced players. *The journal of the acoustical society of America*, **132 (6)**, 4002–4012.

Sattath, S., & Tversky, A. 1977. Additive similarity trees. *Psychometrika*, **42 (3)**, 317–345.

Schroeder, M. R. 1965. New methods of measuring reverberation time. *J. Acoust. Soc. Am.*, **37**, 409–412.

Séguret, C. 2002. *L'univers des guitares.* Paris (France) : Solar.

Skrodzka, E., Łapa, A., Linde, B.B.J., & Rosenfeld, E. 2011. Modal parameters of two incomplete and complete guitars differing in the bracing pattern of the soundboard. *J. Acoust. Soc. Am.*, **130 (4)**, 2186–2194.

Skudrzyk, E. 1980. The mean-value method of predicting the dynamic response of complex vibrators. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **67**(4), 1105–1135.

Smith, J.O. 2007 (12). *Making virtual electric guitars and associated effects using Faust.* Tech. rept. CCRMA, Stanford university, USA.

Smith, J.O. 2008. Virtual Electric Guitars and Effects Using Faust and Octave. *In : Proceedings of the Linux Audio Conference (LAC).*

software website, Cast3M. 2014. *http ://www-cast3m.cea.fr/.*

Speeth, S.D. 1961. Seismometer sounds. *The journal of the acoustical society of America*, **33 (7)**, 909–916.

Torres, J. A., & Boullosa, R. R. 2009. Influence of the bridge on the vibrations of the top plate of a classical guitar. *Appl. Ac.*, **70**, 1371–1377.

Traube, C. 2004. *An interdisciplinary study of the timbre of the classical guitar.* Ph.D. thesis, McGill University.

Tversky, A. 327–352. Features of similarity. *Psychological Review*, **84 (4)**, 1977.

(U.S.), Forest Products Laboratory. 2010. *Wood Handbook : Wood as an Engineering Material.* General technical report FPL. Forest Products Laboratory.

Valette, C. 1995. The mechanics of vibrating strings. *Pages 115–183 of :* Hirschberg, A., Kergomard, J., & Weinreich, G. (eds), *Mechanics of musical instruments.* Wien – New York City : Springer Verlag.

Varieschi, G. U., & Gower, C. M. 2010. Intonation and compensation of fretted instruments. *Am. J. Phys.*, **78 (1)**, 47–55.

Vinceman, Ley, G., & Fillette, B. 2012. Marshall – 50 ans de gros son. *Pages 38–68 of :* Fillette, B. (ed), *Guitar Part 225.* Montreuil (France) : EDV.

von Bismarck, G. 1974. Timbre of steady sounds : a factorial investigation of its verbal attributes. *Acustica*, **30**, 146–149.

von dem Knesebeck, A., & Zölzer, U. 2010. Comparison of pitch trackers for real-time guitar effects. *In : Proceedings of DAFx10.* paper 102.

Weinreich, G. 1977. Coupled piano strings. *J. Acoust. Soc. Am.*, **62 (6)**, 1474–1484.

Wittgenstein, L. 2010 (1953). *Philosophische Untersuchungen (Philosophical investigations).* Wiley-Blackwell.

Wollman, I. 2013. *Perception bimodale des violonistes en situation de jeu : influence des retours auditif et vibrotactile sur l'évaluation du violon.* Ph.D. thesis, Université Pierre et Marie Curie.

Woodhouse, J. 2003. The transient behaviour of guitar strings. *Pages 137–140 of : Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC).*

Woodhouse, J. 2004a. On the synthesis of guitar plucks. *Acta Acustica united with Acustica*, **90**, 928–944.

Woodhouse, J. 2004b. Plucked guitar transients : comparison of measurements and synthesis. *Acta Acustica united with Acustica*, **90**, 945–965.

Woodhouse, J., Manuel, E. K. Y., Smith, L. A., Wheble, A. J. C., & Fritz, C. 2012. Perceptual thresholds for acoustical guitar models. *Acta Acustica united with Acustica*, **98**, 475–486.

Wright, H. 1996. *The acoustics and psychoacoustics of the guitar.* Ph.D. thesis, University of Wales.

Yeh, D., & Smith, J.O. 2006. Discretization of the '59 Fender Bassman tone stack. *In : Proceedings of DAFx06.*

Young, W. C., & Budynas, R. G. 2002. *Roark's formulas for stress and strain.* 7th edition. McGraw–Hill.

Zollner, M. 2014. *Physik der Elektrogitarre.* Hochschule Regensburg : pré-édition en ligne.

Zölzer, U. 2002. *DAFX – Digital audio effects.* Chichester (UK) : Wiley.

Zwicker, T., & Buus, S. 1998. When bad amplification is good : Distortion as an artistic tool for guitar players. *J. Acoust. Soc. Am.*, **103**, 2797.

Annexes

Annexe A

Caractéristiques des *Les Paul Junior* construites à l'Itemm

Cette annexe donne les principales caractéristiques des copies de *Les Paul Junior* construites à l'Itemm et étudiées dans cette thèse. Le tableau A.1 donne les principales caractéristiques organologiques de ces guitares. La *Les Paul Junior* ayant été conçue comme une version bon marché de la *Les Paul* dont les spécifications sont données dans le tableau 1.2, quelques caractéristiques diffèrent entre les deux modèles, notamment les éléments nécessitant plus de travail de la part du luthier tels le renversement du manche et la table rapportée au corps. Les figures A.1 à A.3 présentent les plans élaborés et gracieusement fournis par l'équipe pédagogique de la section guitare à l'Itemm : Pierre Terrien, Yann-David Esmans et Fred Pons.

FIGURE A.1 – Plan des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm.

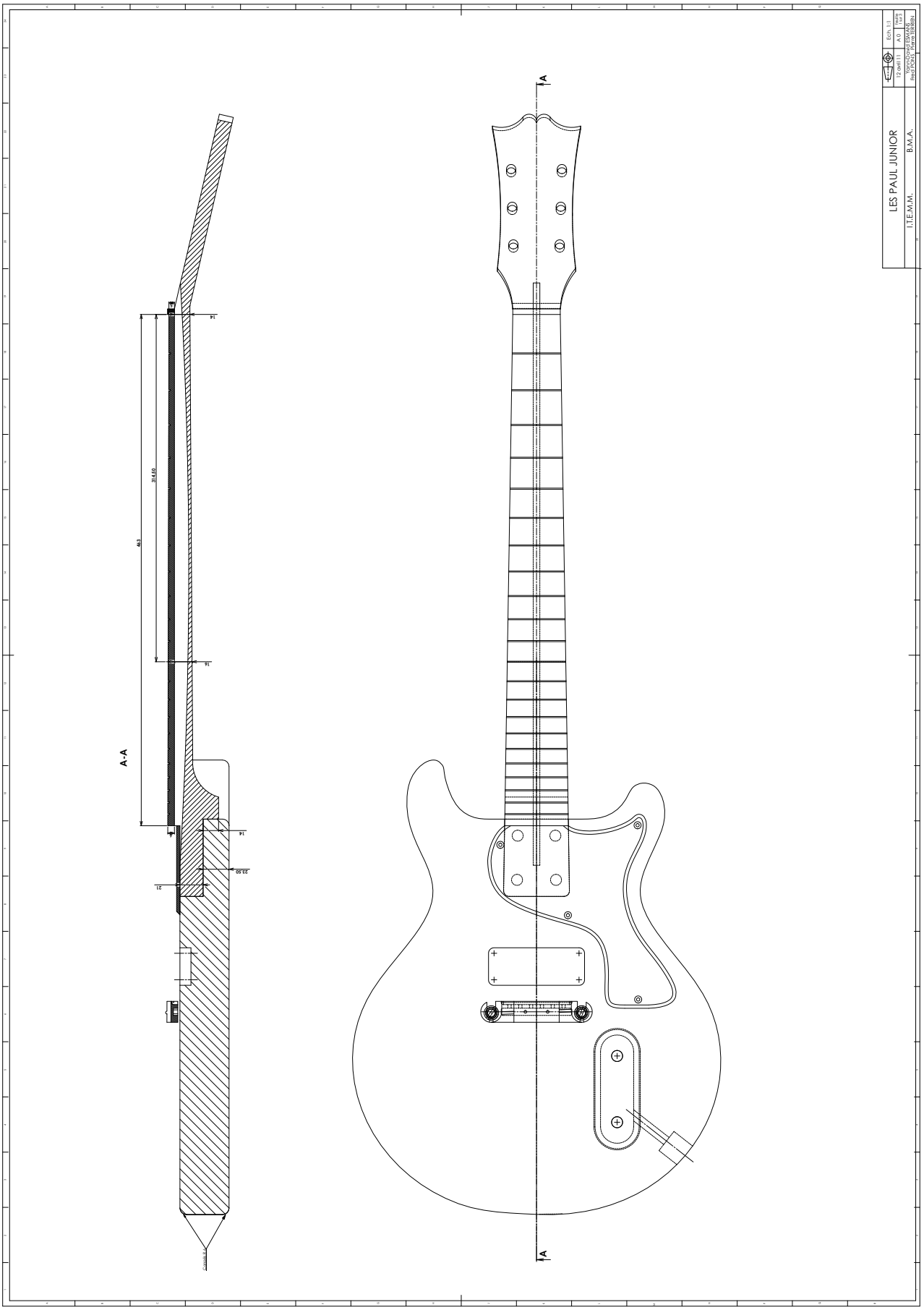


FIGURE A.2 – Plan des corps des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm.

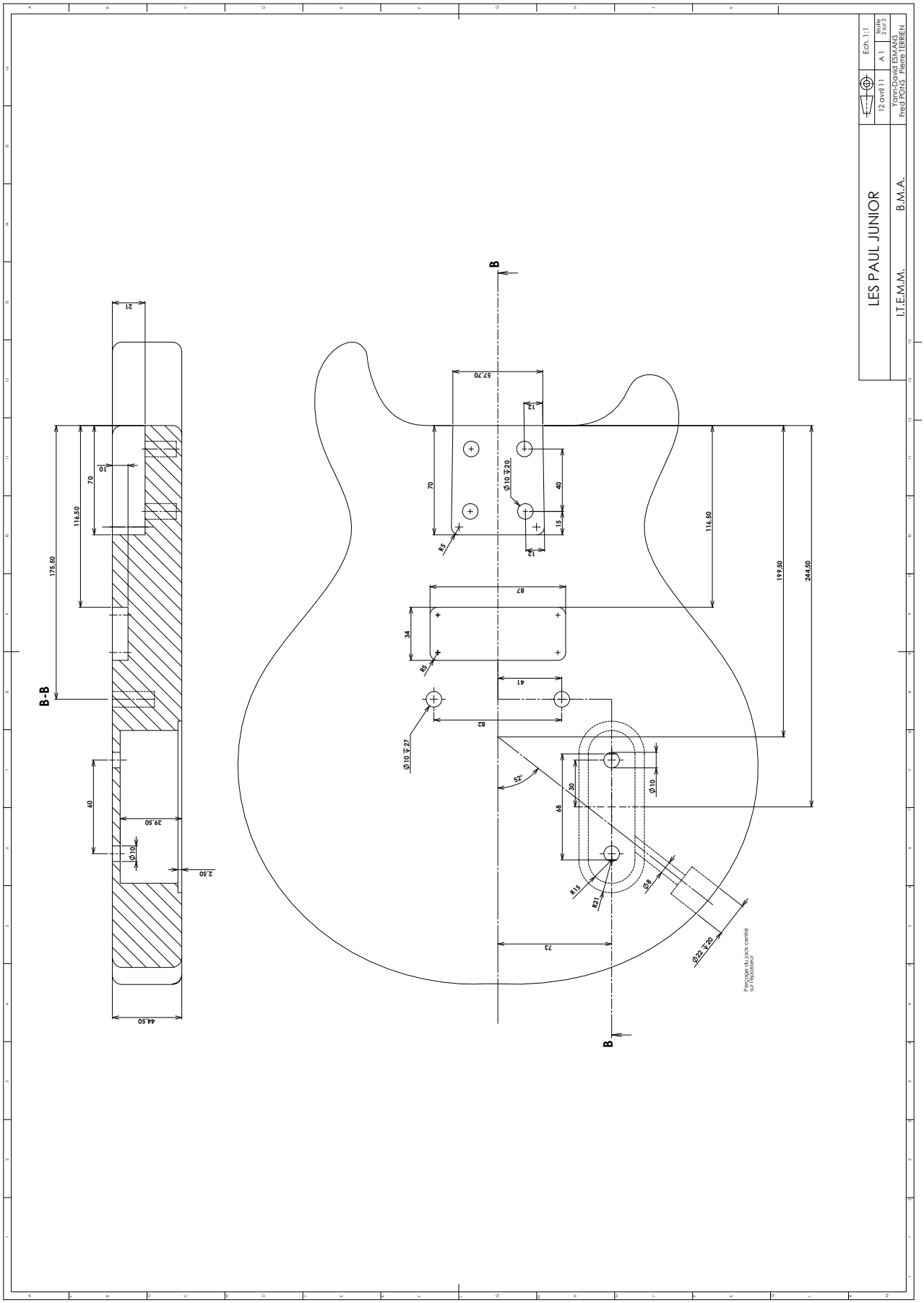


FIGURE A.3 – Plan des manches des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm.

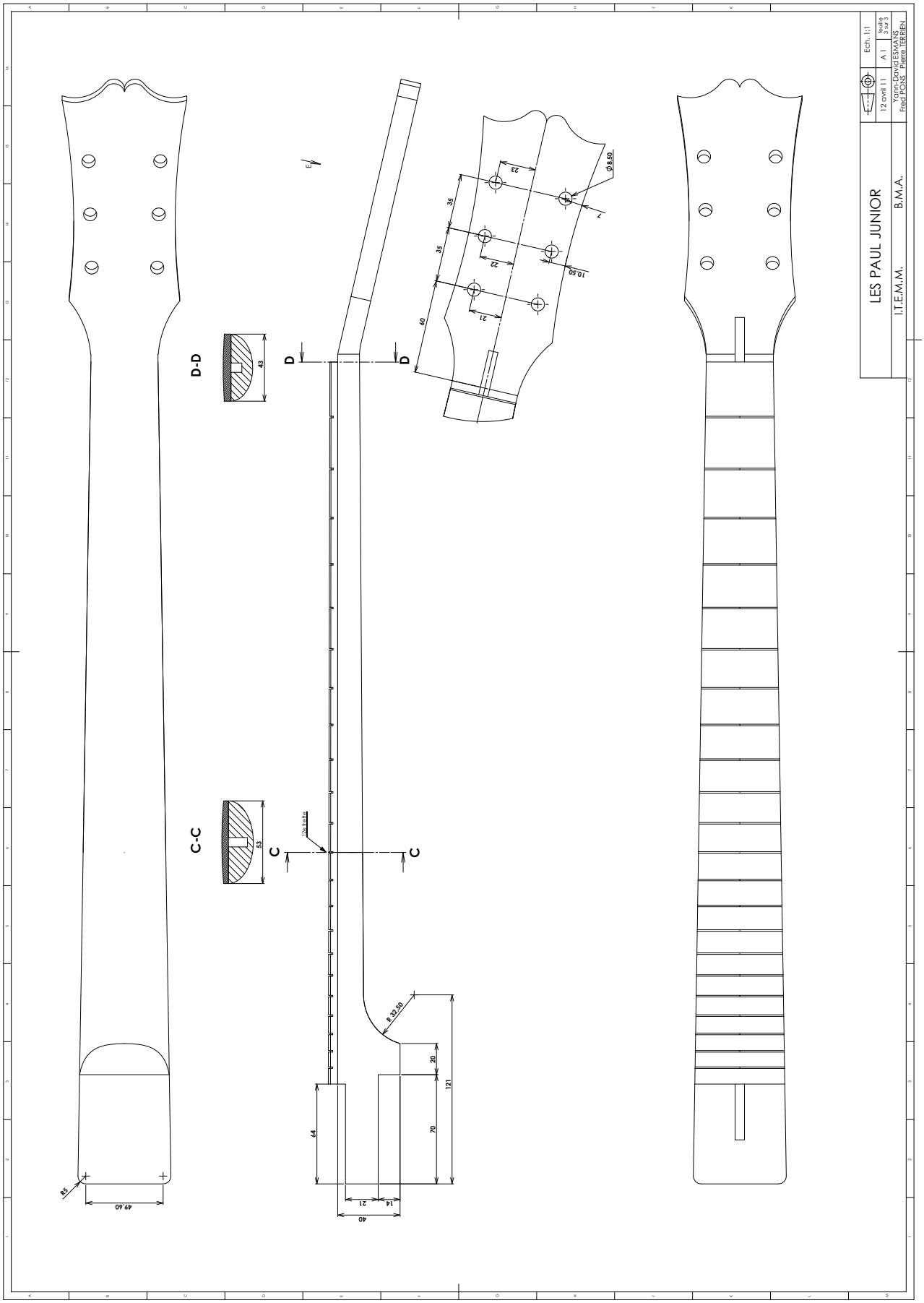


Table A.1 – Principales caractéristiques organologiques des guitares copies de *Les Paul Junior* construites à l'Itemm. Les caractéristiques entre parenthèses indiquent l'alternative choisie dans le cas où l'élément de lutherie est variant pour les besoins de l'étude.

Cordes	« diapason » (longueur vibrante)	62, 9 cm
Manche	matériau jonction au corps renversement nombre de pièces sens de coupe du bois	acajou collé (vissé, traversant) non 1 quartier
Touche	matériau jonction au manche sens de coupe du bois nombre de frettes	palissandre (ébène) collée dosse 22
Corps	matériau forme échancrures nombre de pièces table rapportée	acajou symétrique 2 1 (2) non
Pickups	nombre type	1 simple-bobinage *P-90*
Contrôles électroniques	boutons de volume boutons de tonalité sélecteur	1 1 désactivé lors des tests perceptifs non
Tête	matériau forme nombre de pièces jonction au manche renversement	acajou symétrique 1 même pièce de bois non
Chevalet	type	fixe type *wrap-around*

Annexe B

Informations complémentaires sur les études perceptives

Cette annexe produit des informations complémentaires sur le protocole et les résultats des deux études perceptives dont il est question dans ce manuscrit : l'étude de la jonction du corps au manche et l'étude du matériau de la touche.

B.1 Etude préliminaire : la jonction corps/manche

Dans cette section, on reproduit les fiches d'évaluation fournies aux guitaristes à l'issue de l'entretien durant le test des guitares (la guitare à manche vissé est codée avec la couleur jaune, la guitare à manche collé est codée avec la couleur verte et la guitare à manche traversant est codée avec la couleur orange).

Dans la première fiche, dite d' « évaluation globale » (figure B.1), il est demandé à chaque guitariste d'utiliser librement pour chacune des guitares l'échelle correspondante : l'utilisation et la dénomination des bornes de l'échelle sont libres, ainsi que la manière d'inscrire son jugement sur cette échelle. Le jugement peut être argumenté dans la case « pourquoi ? ».

Il est ensuite demandé à chaque guitariste de choisir un certain nombre de critères qui l'ont aidé à évaluer les guitares durant la phase de jeu. Pour chacun des critères choisis, le guitariste se voit remettre trois fiches. Dans la première fiche (figure B.2), le guitariste doit juger les trois guitares suivant le critère, en utilisant les échelles libres. Dans la deuxième fiche (figure B.3), le guitariste doit indiquer à quel point il apprécie la guitare suivant ce critère, sur une échelle graduée de 1 à 10. Dans la troisième fiche (figure B.4), le guitariste doit indiquer, pour chaque guitare, à quel point l'évaluation de ce critère a contribué à l'élaboration de son jugement global de la guitare.

B.2 Etude de la perception du matériau de la touche

Dans cette section, on donne des informations complémentaires sur les musiciens ayant participé à l'étude (section B.2.1), sur les consignes et résultats verbaux du test d'écoute (section B.2.2) ainsi que sur les consignes du test de jeu (section B.2.3).

B.2.1 Guitaristes

Dans le tableau B.1 est reporté pour chaque style de musique représenté dans notre population de guitaristes professionnels le nombre de sujets dont ce style musical est le style musical principal. Notons que cette représentation est très schématique, dans la mesure où il est très difficile de délimiter les styles musicaux entre eux, et de définir un style principal pour chaque guitariste (ce dernier étant par nécessité artistique et professionnelle polyvalent).

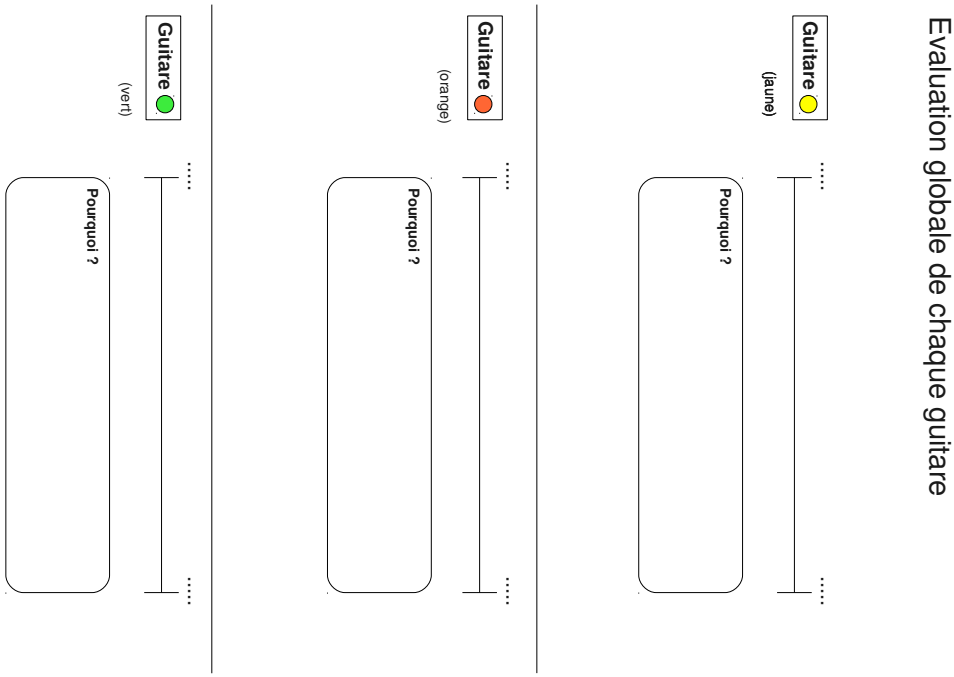


FIGURE B.1 – Fiche d'évaluation globale de chaque guitare pour l'étude de la jonction du manche au corps : échelles libres.

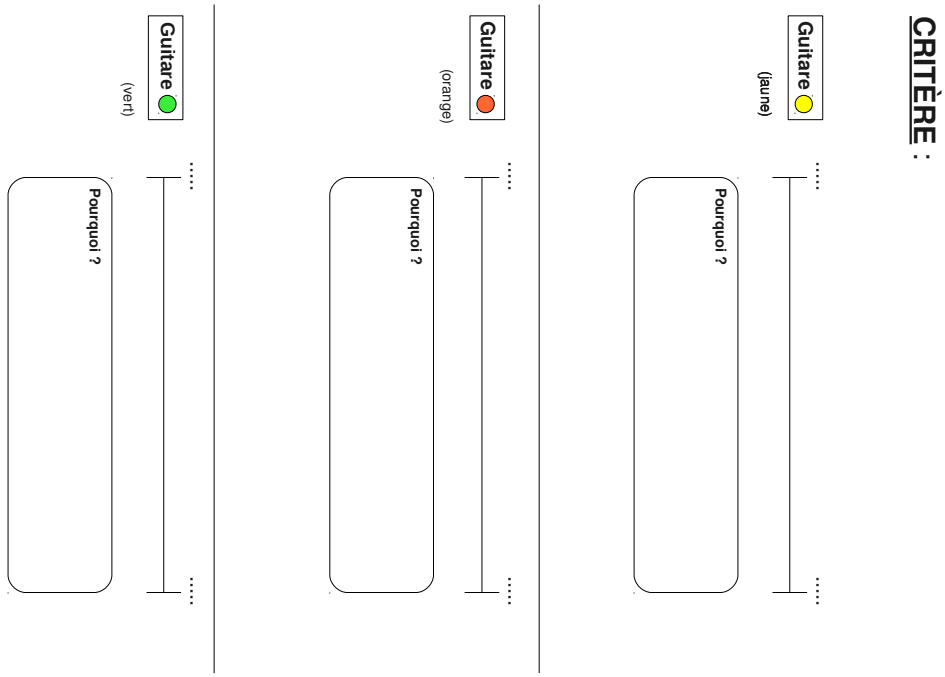


FIGURE B.2 – Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares selon une échelle libre.

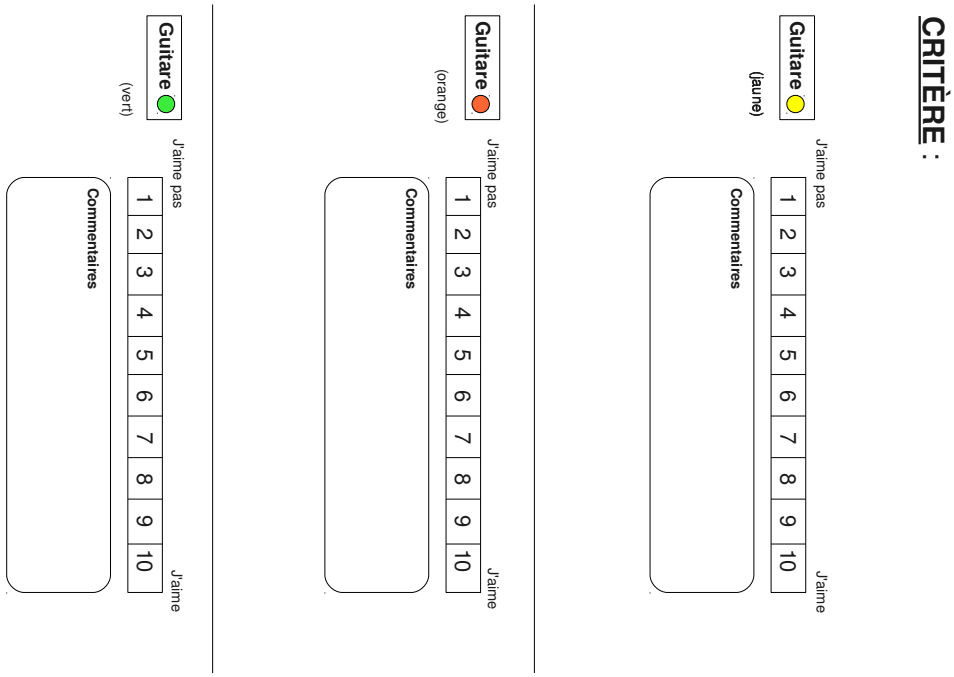


FIGURE B.3 – Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares : sur une échelle de 1 à 10, le guitariste doit indiquer à quel point il aime ce critère sur chacune des guitares.

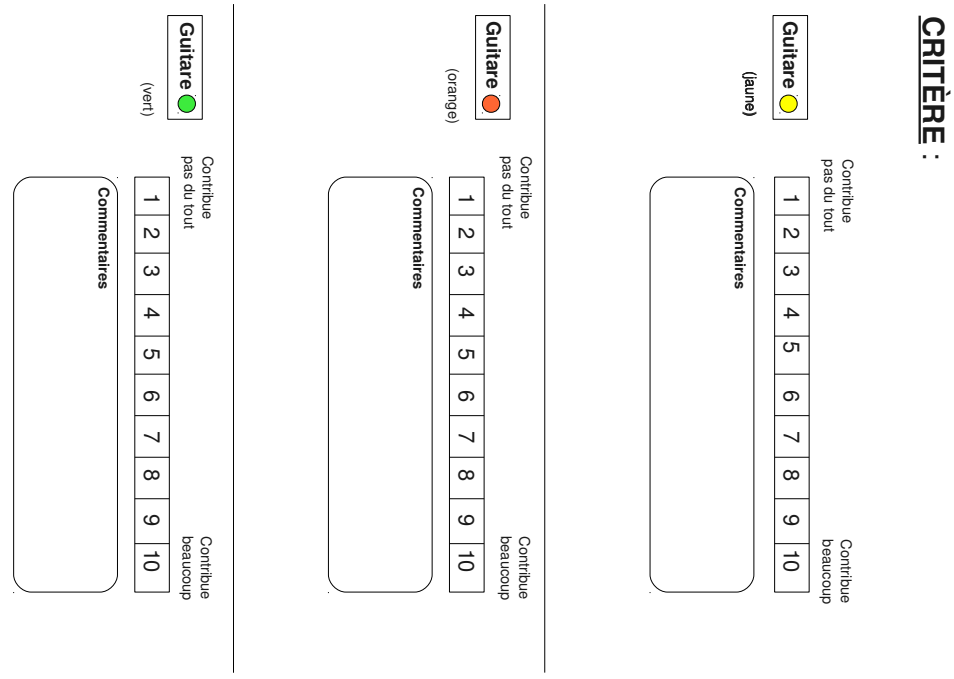


FIGURE B.4 – Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares : sur une échelle de 1 à 10, le guitariste doit indiquer à quel point l'évaluation de ce critère a contribué à l'élaboration de son jugement global sur chacune des guitares.

Table B.1 – Pour chaque style musical, nombre de sujets l'ayant pour style musical principal.

Style musical principal	nombre de guitaristes
rock	3
jazz	2
blues	2
pop	1
hard rock	2

B.2.2 Test d'écoute

Le test d'écoute était sous forme de tâche de tri libre (ou de catégorisation libre). Les consignes sont d'abord retranscrites. Chaque tâche de tri libre s'est déroulée en deux phases. Dans la première les icônes représentant les extraits sonores étaient groupées et réparties dans le plan délimité par l'interface graphique du logiciel. Dans la deuxième phase, les guitaristes pouvaient écrire au clavier un commentaire sur chacun des groupes formés : des exemples de commentaires sont donnés.

B.2.2.1 Consignes

Voici les consignes données à chaque guitariste pour chacune des tâches de catégorisation libre :

- ➢ Nous vous demandons de procéder à un tri de huit extraits. Pourriez-vous regrouper ceux qui se ressemblent et distinguer dans des groupes différents ceux qui vous semblent différents.
- ➢ Plus les extraits se ressemblent, plus ils seront proches. Plus ils diffèrent, plus ils seront éloignés.
- ➢ Vous faites autant de groupes que vous le souhaitez.
- ➢ Vous aurez ensuite la possibilité de décrire les groupes que vous avez réalisés.

B.2.2.2 Commentaires

Pour illustrer la phase de commentaire des catégories du test d'écoute, on donne les commentaires produits par le sujet 6 sur chacun des groupes définis pour chacune des trois phrases musicales.

Phrase musicale numéro 1 (son clair) :

G3/G3/G4/G1 présence du spectre global / manque de chaleur dans les basses

G6/G6 son creusé hors phase strat

G2 le plus présent des groupes / le plus gros son plus plein

G5 creusé mais moins que le groupe [G6]

Phrase musicale numéro 2 (son saturé) :

G6/G3 présent plus épais

G5/G6/G3/G2 un peu plus fin que [G6/G3]

G4 plus fin que groupe [G5/G6/G3/G2]

G1 creusé et moins de sustain

Phrase musicale numéro 3 (son *crunch*) :

G3/G6/G5/G3 plus présent plus d'aigu

G6/G4 très voisin du groupe [G3/G6/G5/G3] / peut-être à assimiler au groupe [G3/G6/G5/G3]

G1/G2 manque de présence / son plus creusé / manque d'aigu

B.2.3 Test de jeu

Voici la consigne donnée à chaque guitariste au début du test d'écoute :

Nous allons vous demander de tester ces guitares comme si vous étiez dans un magasin en vue d'un achat ou d'un concert par exemple. Vous pouvez jouer librement chacune des guitares, ainsi que modifier les réglages de la pédale et de l'amplificateur. Nous allons simplement vous demander d'exprimer librement vos ressentis et impressions durant le jeu de ces guitares. Le test précédent a fait émerger certains critères comme importants pour les guitaristes, il s'agit de la brillance, du sustain, du confort de jeu, de l'attaque et de l'équilibre. Si ces critères se rapportent à quelque chose qui vous parle, vous pourrez les utiliser.

Annexe C

Transcription d'un entretien

Cette annexe reproduit la transcription de l'entretien du sujet 5 lors de l'étude perceptive concernant l'influence du matériau de la touche (présentée en chapitres 3 et 4). Le dialogue est fidèlement retranscrit. Un code typographique et colorisé est proposé. Celui-ci est schématiquement rappelé en ouverture de la transcription, séparée de celle-ci par une ligne horizontale. Les questions et relances des expérimentateurs sont en caractères italiques soulignés. Les verbalisations du musicien sont en caractères normaux. Ces caractères normaux peuvent être surlignés de :

bleu quand le guitariste parle de la guitare 3 (G3, touche en ébène),

jaune quand le guitariste parle de la guitare 4 (G4, touche en palissandre),

vert quand le guitariste parle de la guitare 5 (G5, touche en ébène),

rose quand le guitariste parle de la guitare 6 (G6, touche en palissandre),

aucun surlignage soit quand le guitariste parle des quatre guitares, soit quand il tient un propos général.

Certains passages sont entre crochets ('[' et ']'), ceci pour signifier une explication de la part de l'expérimentateur au moment de la transcription. Souvent ces mises au point sont une tentative de transcription des gestes du musicien : quand le musicien montrait une guitare sans la nommer, quand il jouait une guitare sans toutefois en parler (ce qui explique pourquoi certains passages entre crochets sont surlignés des couleurs correspondant aux guitares). La mention « à vide » signifie le jeu d'une guitare sans solliciter d'amplification. Les lignes sont numérotées pour permettre les références à cette transcription dans le corps de ce manuscrit.

On remarque qu'aux lignes 182–185, le guitariste parle de lui-même de son expérience des touches en ébène et en palissandre (qui constituent l'objet d'étude), sans indication des expérimentateurs. Le fait qu'il l'ait mentionné justifie la relance à la ligne 364 de la part des expérimentateurs.

Guitare 3
Guitare 4
Guitare 5
Guitare 6

Questions et phrases des interrogateurs (Benoît Navarret et Arthur Paté)
Réponses (sujet)
[Commentaires d'Arthur Paté lors de la transcription]

---

ah oui, d'accord c'est qu'il est en chromatique ? [Accordeur]

Nan, nan, il est en mode guitare

Elles sont toutes équipées pareil ? enfin je veux dire en terme de cordes...

C'est le genre de choses auxquelles on ne peut pas te répondre, on te dit ni oui ni non

d'accord
euh ? [demande s'il peut régler pédale et ampli]

Oui oui, tu peux tout régler, tu peux tout toucher

[joue et s'accorde]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]
C'est les mêmes cordes partout ?
Les manches ne sont pas les mêmes non plus.
conforts de jeu ne sont pas les mêmes, en tout cas.

[joue] je préfère celle-là en terme de confort

j'aime bien la 5 aussi

[joue]

La 5 est plus claire que la 6.
La 6 est plus douce. Mais alors du coup elle résonne un peu moins.

La 4, j'ai l'impression que c'est celle qui résonne le mieux. Celle qui a le plus gros manche aussi.
Comme si c'était celle qui avait le plus de bas, j'ai l'impression.
Mais euh, le manche est un peu rude, enfin rude, il est gros, j'ai un peu de mal avec.
Il faut brancher.

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

[joue]

J'ai l'impression que c'est celle-là que je préfère, la 3.
Pas forcément la plus résonante à vide.
La plus résonante, il me semble que c'est la 4. C'est celle qui a le plus gros manche, pas super confortable, enfin, pour moi. La plus lourde aussi, on dirait.
Ceci dit, j'suis pas, j'suis pas confort, quoi. Et ça, c'est...
Le manche est plus épais et fait une espèce de V.
Et c'est marrant parce que à vide, j'aime bien le timbre, mais branché j'aime pas trop.
Le timbre est un peu trop agressif branchée.

J'ai l'impression que la 6, c'est celle qui serait la plus douce.
[A vide]
Et c'est celle qui est la plus maigre en terme de timbre une fois branchée. Ce qu'est pas...désagréable mais ce n'est pas forcément ce que je préfère.
Pas assez de corps dans le...
Et on dirait que c'est la plus souple comme si elle avait des cordes plus souples par rapport aux autres. Et c'est celle qui a le manche le plus fin, on dirait, aussi.

La plus douce, qu'est-ce que tu veux dire par là ?

Peut-être celle qui a l'attaque la moins franche aussi.
Moins nerveuse.

J'ai parlé de la 5 ou pas ?

Nan

J'aime bien la 5. Je la trouve assez précise en terme d'intonation, de distinction des notes.
L'attaque assez franche tout en étant assez douce, en tout cas à vide.

[joue] Les frettes sont plus hautes, non ?

[joue]

Mes deux préférées, c'est celles-là, la 3 et 5
j'ai l'impression que la 3 est un petit peu plus douce. Surtout branchée.

Et j'aime bien la nervosité de la 5.

la nervosité, ça se traduit ?

c'est-à-dire qu'elle répond plus vite, il y a plus de niveau, j'ai l'impression. L'ampli sature plus vite.
Un peu plus d'aigus aussi.
Un peu plus brillante.
Je pense qu'elle est plus précise, aussi.

Toutes ces comparaisons que tu viens de faire, là, c'est par rapport à la 3 ou par rapport aux autres ?

C'est un peu les unes par rapport aux autres.
Enfin, la 3 [4] elle résonne bien à vide, mais enfin j'aime pas forcément le timbre ni le grain, et puis enfin elle est pas, elle est pas confort, donc je suis pas bien dessus.

Tu parles de la 4 ?

C'est la 4.
Celle-ci est assez agréable, la 6, mais pas assez résonnante, pas assez de niveau. Une fois branchée, trop chargée en aigus, 'fin j'aime bien, j'aime bien mais pas...c'est pas ce que je préfère.
Et en fait, ouais, c'est vraiment entre la 3 et la 5, je les trouve assez proches.

Une fois branchée, je crois que je préfère la 5. Même si elle est plus lourde.
Ouais, elle résonne mieux à vide.
Ca réagit plus, quoi [son clair]. J'ai moins à la forcer. Disons que c'est une des plus puissantes du lot. En terme de niveau de sortie aussi. J'ai l'impression.
Elle est assez brillante aussi
Si je compare 3 et 5, c'est un peu comme si la 5 avait vraiment des cordes neuves et la 3 un peu des cordes usagées, cette espèce de petit sentiment en plus.
Il n'y a pas de tonalité ?

On l'a désactivée.

Sur celle-là uniquement ?

Euh, sur les quatre.

Ouaip c'est bien ce qui me semblait. Par contre si j'enclenche la disto sans changer les réglages, je vais préférer la 3 parce que du coup il y a moins les abeilles en haut, c'est-à-dire que cette espèce de scintillement qu'elle a en plus, en son clair, ça peut être gênant en saturation.

Alors tu as parlé de « répond un peu plus », de comment ça « réagit », est-ce que tu peux nous parler plus précisément de l'attaque et de la réponse à l'attaque comparativement

sur les 4 ?

Oui

Alors si je prends celle-là [6], qui est en quelques sortes la plus molle du lot, en fait là le son est vachement doux, mais un peu moins la sensation d'en avoir sous le capot.
Alors du coup le son sera peut-être un peu plus chaud, c'est-à-dire qu'il y a moins de, c'est moins nerveux, il y a le côté moins médium, moins aigu. En même temps je dis moins aigu, mais...en même temps il est... c'est peut-être le moins agressif du lot
je pense que les cordes sont plus souples
Ou le manche est plus souple et donne l'impression d'avoir des cordes plus souples
Mais c'est plus...c'est...l'impression que c'est plus mou.
Alors ce qui ne veut pas dire que je n'aime pas le timbre qu'elle a non plus. C'est assez agréable, mais pas ce que, c'est moins ce que je préfère.

Si je prends celle-ci, la numéro 4, c'est le son le plus plein j'allais dire dans le bas médium. C'est une des plus résonnantes, mais elle n'a pas forcément beaucoup d'attaque, en tout cas c'est pas super précis comme attaque.
C'est marrant parce que... il y a une espèce de bosse dans le médium qui fait aussi pas mal saturer l'ampli, mais pas bien où j'aime
Et puis je ne suis pas à l'aise avec le manche du tout en plus.

Et tu as dit que c'était, ouais, pas super précis dans l'attaque, c'est quoi que tu recherches dans... enfin cette précision dans l'attaque, ça se traduirait comment dans ton ressenti ?

C'est le côté avoir un peu tout de suite la note et puis, euh...comment dirais-je...que les notes soient plus claires. Pour faire des voicings un peu compliqués où les notes se détachent un peu les unes des autres, au lieu de se mélanger, ce qui peut parfois être pas mal. Un peu comme le cliché, de...quand on prend une Les Paul Standard par rapport à une Les Paul Custom, la Custom qui a une touche en ébène, tout est, enfin c'est tout de suite un peu plus précis quand on fait des accords plus riches, par rapport à une Standard, quoi, un truc on va dire plus chaud, mais euh, mais moins net. Moins de précision. Presque une attaque un peu moins franche.
Là, sur la 3, je trouve que c'est tout de suite plus précis. Alors qu'elle a l'air d'avoir moins de corps que la 4.
Et la 3 par rapport à la 5, elle a l'air d'être moins puissante, même à vide.
Je préfère la 5, moi. Mais j'aime bien la 3.
La 5 est pas loin d'avoir la même résonance que la 4. Avec un côté quand même un peu plus précis.
Le défaut de la 5, c'est le jack.
Elle est peut-être un tout petit peu trop brillante une fois branchée

Tu as parlé de « brillante », c'est ?

Espèce de voile dans l'aigu, qui est assez accentué quand j'ai enclenché l'overdrive.

Voile, ça veut dire qu'il y a quelque chose en moins ou quelque chose en plus ?

Nan, nan, il y a une espèce de petite nébuleuse, enfin les abeilles qui euh , les abeilles qui arrivent dès qu'on met la disto, c'est un petit peu trop scintillant dans l'aigu.
Qu'il n'y a pas dans la 3.
il manque un truc dans 3 par rapport à 5. Le fait qu'elle soit un peu plus puissante, la 5.

Et tout à l'heure, quand je t'avais posé la question sur la clarté, je t'avais dit par rapport à un son clair, un son brillant, est-ce que c'est deux choses que tu rapproches ou pas ? C'est ce qu'on a cru pouvoir faire avec l'étude précédente, mais est-ce que c'est quelque chose qui te parle? Est -ce que ces deux termes sont rapprochés ?

Oui parce que, enfin, dans la clarté, voilà on va penser tout de suite aux fréquences aigues qui vont transparaître. Mais euh, le fait d'être brillant, c'est que vraiment il y a une surcharge dans l'aigu, alors que la clarté, c'est, il y a un côté netteté dans le son, mais ça va du coup avec la précision pour moi la clarté. C'est-à-dire qu'il faut qu'il y ait de l'aigu, mais pas trop. Brillante, c'est euh, il va manquer un petit peu quelque chose dans le bas ou dans le médium, alors que la clarté c'est qu'il va y avoir des aigus, mais le reste ne manque pas.

Cette clarté, tu relierais ça aussi un peu à l'attaque ? Ou est-ce que c'est encore quelque chose de différent ? Parce que quand on parlait d'attaque tu as beaucoup parlé de « plus précis », la précision, la netteté aussi ?

Oui, enfin pour moi, c'est plus la réaction, euh, un peu directe à la main droite. Où je sens qu'il y a soit de la tension à l'accord, soit du euh la note qui part tout de suite. La clarté non c'est vraiment c'est vraiment dans le timbre.
Et la précision c'est plus dans le mélange des notes où je fais entendre plus ou moins distinctement les notes séparément au lieu de les entendre dans une espèce de halo commun.

Et tu as beaucoup parlé de résonance, surtout pour la guitare 4, enfin c'était celle qui te paraissait la plus résonante, est-ce que tu peux nous parler de cette résonance, et comment tu l'écoutes, et qu'est-ce que tu...

Alors ce serait peut-être lié au sustain, ouais.
Je colle mon ventre à la caisse de résonance. C'est le contraire d'une acoustique où il faut se décoller.
Ouais, résonant voilà c'est qu'elle a du son à vide, et qui est assez plein, c'est-à-dire qu'on entend pas mal, enfin on entend un peu tout. Il y a de la puissance.

Bin là il y a plus d'aigus, si je prends la 3 tout de suite après la 4.

Et c'est rigolo parce que la 5, non branché il n'y a pas ce suraigu qu'il y a une fois branché.
Je crois qu'à vide c'est vraiment la 5 que je préfère
Oh en même temps la 3 aussi. Il y a moins de médium/aigu [par rapport à 5], ou moins de médium, j'sais pas.
Ouais, la 5 est clairement plus puissante à vide.

Quand tu as dit moins de médium/aigu dans la 3, c'était par rapport à la 5 ? Je crois que c'était entre ces deux-là que tu...

Oui, c'est ça, oui.
Je pense que c'est peut-être pour ça qu'on se retrouve avec plus de brillance une fois branché.
Mais par contre ouais, la tonalité aurait été active sur la 5, j'aurais baissé un peu la tonalité. Chose que en général je ne fais jamais. Je n'aime pas les potards de tonalité.

Tu le mets toujours à fond ? Et du coup, si tu devais corriger à l'ampli, tu ferais le même genre de truc?Est-ce que tu corrigerais ?

Je ne sais pas si je corrigerais à l'ampli, ça n'a pas la même incidence.
Parce que après, en son clair, ça me, c'est assez euh c'est assez présent, mais...
A la limite, je corrigerais sur une disto. Ouais je corrige plus sur une disto, mais en son clair je ne corrige pas trop, c'est pas ce que je préfère, c'est je ne sais pas, j'utiliserais un autre micro. Je ne sais pas, je salirais les cordes... Juste pour enlever ce petit surplus d'aigus.

Après si j'ai la 3 je suis content.
C'est ces deux-là que j'aime bien. [3 et 5]

Et si je te demande maintenant de nous parler du sustain, qu'est-ce que tu...?

Alors la 4 a l'air d'en avoir pas mal.

Pas mal de sustain, c'est, qu'est-ce que tu... ?

Ca va un peu avec la résonance dont je parlais tout à l'heure. C'est vrai que je ne pense pas forcément au sustain, d'ailleurs j'utilise assez peu ce...

Ouais, c'est pas un truc qui te parle, ou que tu recherches ? Ou que tu écoutes ?

Ouais, c'est pas... Je ne suis pas dans le trip Spinal Tap où le mec fait « listen to the sustain » avec la note qui tient des heures... C'est-à-dire que ça va avec la résonance, hein, moi si la guitare résonne, enfin ça va avec, la note va quand même tenir.
Voilà, peut-être la 6, c'est celle qui en a le moins,

Et les trois autres, tu en dis ?

C'est sensiblement équivalent... après, les timbres étant différents... Il y a peut-être un léger plus, sur le gros manche de la 4. Mais bon...

Euh oui, il y a aussi, on devait parler de l'équilibre grave/aigu, alors tu as pas mal parlé des aigus et des médiums, mais pour ce qui est de la restitution des graves, est-ce qu'il y a des choses qui t'ont...

Ouais, c'est sur ces trois-là qu'il y en a le plus, 3, 4, 5.
Mais comme 4 et 5 ont plus de, comme si c'était plus large spectre. Et ça va un peu avec la précision dont je parlais tout à l'heure, quoi. Espèce de...

Du coup, la largeur du spectre est liée à la précision ?

Oui, ça me permet de... enfin, j'entends plus tout.

D'accord.

Mais de façon nette.

Donc il faut un spectre large pour la précision.

Oui, la précision va avec un peu le spectre large et puis la restitution est bien nette. J'allais utiliser le terme de clair, mais comme tout à l'heure je parlais de clarté, les termes s'utilisent.

Juste comme ça, tu rapproches vraiment 3 et 5 ?

Ouais

Et 4 et 6 tu les rapproches aussi ou elles sont...

alors dans une moindre mesure, c'est-à-dire qu'en gros, 'fin ce serait presque j'allais dire un peu la

même chose, mais 6 serait dans une euh, une version plus euh une version bridée. C'est-à-dire qu'il y a plus de tension dans les cordes sur la 4 par rapport à la 6, et le manche est plus fin sur la 6. En gros il y a moins de matière, il y a moins de puissance, donc tout est un peu en retrait. Donc du coup elle est très aiguë, une fois branchée, la 6 elle fait très... un son assez maigre, enfin qui a son charme aussi, mais elle est quand même assez douce

Ca rejoint ce que tu disais de la 6, tu disais « elle est plus douce », et il y avait un autre truc, « elle est plus molle » je crois

Oui. Elle est plus molle, ouaip, au sens propre comme au sens figuré.

On cherche aussi à savoir si tu as ressenti des différences de toucher entre les guitares, mais tu en as déjà parlé. Tu as parlé du manche de la 4. Je crois qu'il y a un des manches que tu as trouvé plus fin, c'était la 6, non ?

Ouaip, la 6 doit être légèrement plus fine

Et sinon, quand on te parle de toucher, qu'est-ce que ça englobe pour toi, est-ce que c'est un terme pour toi qui, enfin quand on te dit de parler du toucher de l'instrument, est-ce que, quels sont les aspects que tu mettrais dans ce terme-là, est-ce que toi tu privilégierais peut-être un autre terme, plutôt que de parler de toucher ?

Nan, après ça dépend ce qu'on met derrière le toucher, après c'est vraiment la sensation physique au niveau des doigts, et euh il y a plein de choses qui rentrent là-dedans, voilà le type de cordes utilisées, l'action, les frettes, dans une moindre mesure le bois de la touche, mais ça je ne suis pas très sensible à ça. Enfin sinon c'est entre une touche vernie et une touche non vernie. La sensation est différente.

Tu dis que tu n'es pas sensible à ça, pourquoi tu précises ça ?

Parce qu'il y a souvent des gens qui disent par exemple une touche palissandre une touche ébène, une différence de toucher, mais moi... même pire, euh... comme j'ai une Parker qui a une touche en synthétique, ça me... c'est plus les frettes qui sont dessus qui sont spéciales, mais euh la touche en elle-même, j'ai pas de...

Comment on peut être amené à être sensible à un toucher de touche alors qu'a priori on ne la touche pas, cette touche ?

Bin c'est pour ça que moi je... si, la seule, vraiment, là où je sens une différence, c'est quand la touche est vernie. Parce que là pour le coup, on...

Tu as quand même du gras du doigt qui frotte le...

'fin sinon, par rapport aux fibres qu'il y a en-dessous, enfin moi ça ne m'a pas... je pense qu'il y a encore le côté, même avant, touche érable vernie, et touche palissandre ou ébène, je ne faisais pas trop la différence. Et là c'est parce que depuis peu j'ai une Rickenbacker qui a une touche en palissandre verni, et effectivement c'est pas pareil. Mais c'est aussi parce que les frettes sont toutes petites dessus, c'est-à-dire que... quand les frettes sont petites on se met à toucher le bois. Et à partir du moment où les frettes sont un peu hautes, ce qui est effectivement ce que je préfère, d'ailleurs des frettes de ce type-là, des frettes Gibson, pas la grosse Jumbo, mais... on touche quasiment pas le...

Donc le toucher tu ne l'as pas trop, par contre tu nous as précisé qu'entre une touche ébène et une

touche palissandre, au niveau de la réponse...
Tu as dit touche ébène plus précis, touche palissandre plus chaud....

Ouais, c'est plus chaud, c'est...

Et par rapport à ces deux bois, si tu devais caractériser, tu vois si tu dis plus chaud plus précis, est-ce que tu pourrais être un peu plus précis sur ces deux aspects ?

ouais, c'est un peu comme si, enfin le côté précis de la touche ébène, c'est un peu, je caricature, mais euh, j'ai eu des contre-exemples...
le côté ébène plus précis, on va entendre tout distinctement, il y a les harmoniques qui sortent, et les notes se détachent plus les unes des autres.
Alors qu'a priori une touche palissandre, voilà c'est plus chaud parce que justement ça se mélange mieux, donc il y a un côté ça arrondit un peu les angles, mais du coup ça se mélange et il y a moins de précision...
Avec un son ultra-saturé, en général, la touche ébène...

Et l'ébène, par rapport à une touche en érable, est-ce que tu as eu des manches avec peut-être touche ébène, palissandre et érable ? Ou peut-être...

attends, tu parles de l'érable de la touche ou de l'érable du manche ?

Oui, euh oui, par ce que je suis allé un peu plus vite dans mon raisonnement. La comparaison entre l'ébène et l'érable, euh est-ce que tu as ?

En terme de touche ?

Ouais, en terme de touche ou de sonorité...

j'ai eu assez peu l'occasion, parce que déjà dans toutes mes guitares, je n'en ai qu'une avec touche érable. Euh... en plus c'est une Telecaster, donc c'est quand même particulier. Ah si, j'ai une Les Paul avec une touche érable, sauf que... c'est très spécial, parce qu'entre le fait que ça soit... c'est un instrument qui est ancien, c'est du milieu des seventies, donc c'est un certain type de micro, enfin elle est complètement d'origine, et c'est bizarre parce que voilà, c'est une Les Paul avec une touche érable et un manche érable, et le micro grave, j'ai l'impression de jouer sur une guitare à caisse, donc c'est... je ne comprends pas.
J'ai assez peu d'expérience de la touche érable. Je connais plus les différences entre touche palissandre et touche ébène... sachant que ce n'est pas aussi net comme différence... Déjà ça doit dépendre du bout de bois, de la façon dont est faite la guitare, et puis aussi la plupart de mes touches ébène c'est plutôt mes guitares de luthier, des guitares faites par Arnaud, donc ils sont très modernes, forcément plus précises que les Les Paul qui sont plus vieilles, 'fin c'est un peu moins...
Et puis sur les guitares type Jazz à caisse, j'ai les deux et euh... je pense que c'est lié au reste de la guitare, je préfère celles qui ont des touches en palissandre, et elles ne sont pas moins précises, mais en même temps, enfin c'est un type de guitare qui est pas... en même temps, c'est peut-être parce que ça et la caisse, 'fin genre grosse guitare de jazz à caisse, si c'est trop précis c'est moins sympa. Ca... Peut-être que là justement le côté... Celles que j'aime le moins c'est celles qui ont la touche en ébène et euh.. c'est peut-être justement parce que ça devient un peu trop précis par rapport au reste de la guitare qui s'y prête [inintelligible]...

Et si... Comment je voulais dire... Et justement, si tu ne fais pas les notes, si tu en joues qu'une, est-ce qu'il y a une différence de timbre entre les différentes touches ? Enfin est-ce que tu as déjà entendu...

Oui, enfin, oui, c'est-à-dire qu'il y a plus d'harmoniques dans la, avec la touche ébène...

D'accord, donc c'est le même phénomène que pour la précision.

Et euh ça va être un peu contradictoire, parce qu'avec plus d'harmoniques, avec un son saturé voire très saturé, euh... ouais c'est contradictoire avec le fait que je dise qu'il y a plus d'harmoniques, mais c'est plus précis avec une touche ébène. Ca pour le coup je l'ai constaté.

J'avais eu une remarque à peu près de cet ordre-là entre une L5 et une L7, si je ne me trompe pas, de quelqu'un qui avait eu une L5 touche ébène je crois, et L7 qui a une touche palissandre, et même s'il y avait un écart de prix entre les deux, peut-être dans le catalogue au départ, il préférait celle qui peut-être était moins noble, avec la touche palissandre, mais...

Après voilà, enfin... moi j'ai une Guild, qui est à peu près construite comme une L5, c'est une très très belle guitare, il y a de très beaux bois, tout ce qu'on veut, mais voilà, il y a une espèce de truc un peu... enfin je trouve qui ne marche pas par rapport... voilà j'ai une ES-350, c'est presque ce que je préfère, et je préfère encore, même plus, c'est les ES-125, enfin c'est le modèle encore plus cheap, c'est tout du contreplaqué, mais euh, Metheny disait pareil, bizarrement, les guitares de jazz électriques, c'est presque mieux de les avoir en contreplaqué et pas avec des bois massifs euh... et voire même une touche palissandre. Moi celle que j'ai touche palissandre en contreplaqué sonne mieux qu'avec une bois massive et euh... donc ça ne marche pas. Par contre une vraie acoustique, je préfère avec des bois massifs. Et encore il y a des contre-exemples. Mais c'est ouais, moi ça fait plusieurs fois que je constate ça sur... le côté luxueux de l'ébène, le machin, finalement c'est pas... pour certains... les guitares à caisse en tout cas je ne suis pas super convaincu. Sur une solid-body, autant à certains égards je préfère, mais euh...

Annexe D

Compléments sur le couplage corde-structure

Cette annexe justifie l'hypothèse de faible couplage qui a permis de développer le modèle de couplage du chapitre 6 par perturbation des nombres d'onde de la corde fixe à ses deux extrémités.

D.1 Contexte

Au chapitre 6, un modèle permettant de prédire la décroissance d'une corde couplée à une structure de guitare électrique *solid body* a été développé. A partir des équations classiques régissant les oscillations d'une corde souple tendue entre deux extrémités fixes, on introduit le couplage avec la structure, ou de manière équivalente la mobilité d'une extrémité de la corde par perturbation des nombres d'ondes de la corde avec deux extrémités fixes (équation 6.15 et suivantes). L'équation 6.19 montre que le couplage avec la structure peut décaler les fréquences de la corde selon un terme qui dépend du rapport entre la partie imaginaire de la mobilité de la structure et l'admittance de la corde. L'équation 6.20 montre que le couplage avec la structure peut décaler les amortissements de la corde selon un terme qui dépend de la partie réelle de la mobilité de la structure et de l'admittance de la corde. Au chapitre 6, il a été vérifié que le couplage ne modifiait pas les fréquences de la corde par rapport au cas où la corde est isolée.

Un modèle plus complet permet de confirmer que, dans le cas de la guitare électrique *solid body*, le couplage avec la structure ne modifie que les amortissements de la corde. Ce modèle se propose d'étudier la « force » de couplage, et est décrit dans [Gough 1981; Woodhouse 2004a]. Nous suivons le raisonnement de [Woodhouse 2004a] repris dans le chapitre 6 de [Chaigne & Kergomard 2008] : structure et corde sont décrites isolément (paragraphes D.2 et D.3). Ensuite la corde et la structure sont couplées et les paramètres modaux du système couplé sont calculés (paragraphes D.4 et D.5). Le paragraphe D.6 discute finalement du type de couplage entre corde et structure qui peut être :

« fort » : Dans ce cas les fréquences de corde et de structure isolées sont perturbées, cela créé au mieux (du point de vue musical) de l'inharmonicité, au pire des conditions favorables à l'apparition de la « note du loup ». Les amortissements de corde et de structure séparées ne sont pas altérés par le couplage.

« faible » : Dans ce cas les amortissements de corde et de structure isolées sont perturbés, cela créé le phénomène de *dead spot*, c'est-à-dire que l'amortissement de la corde est anormalement amplifié par couplage. Les fréquences de corde et de structure séparées ne sont pas altérées par le couplage.

On va montrer que dans le cas d'une guitare électrique *solid body*, les couplages sont très majoritairement faibles, conséquemment se concentrer sur les changements d'amortissement de la corde provoqués par le couplage paraît raisonnable.

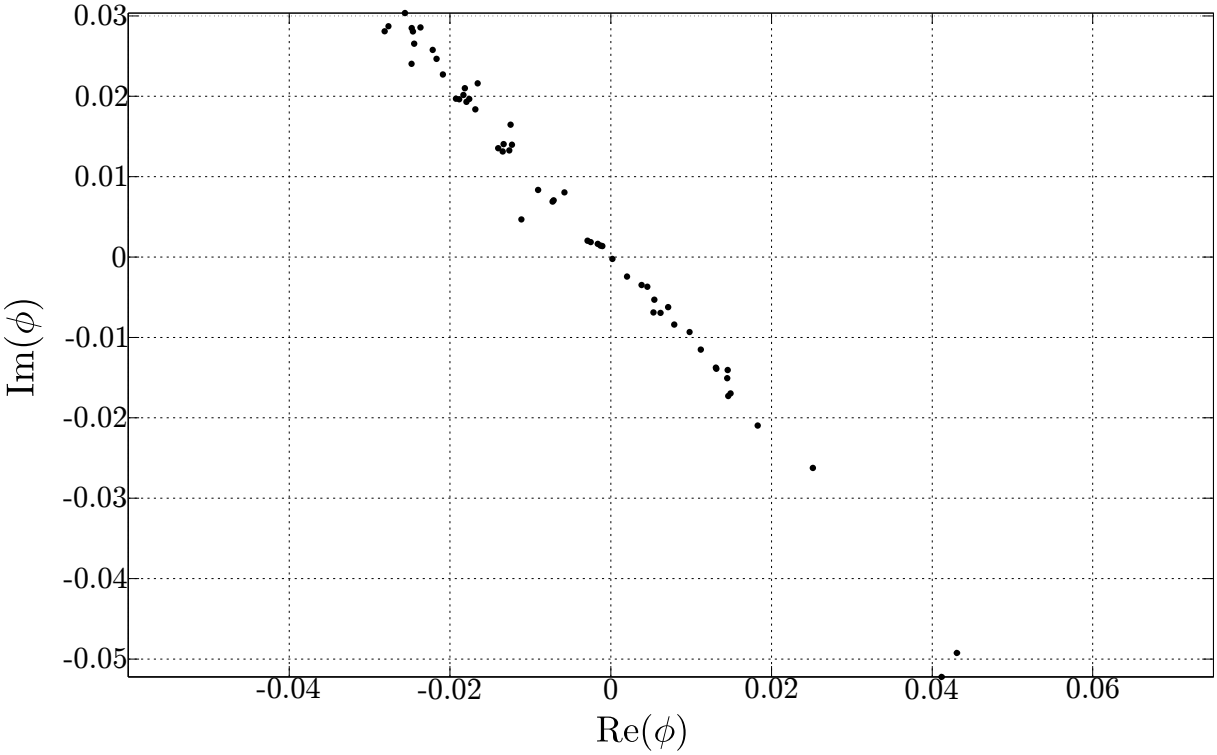


FIGURE D.1 – Partie imaginaire en fonction de la partie réelle d'une déformée modale (identifiée sur une guitare électrique construite à l'Itemm).

D.2 Description modale de la structure

L'analyse modale effectuée avec le logiciel MODAN [Piranda 2001] dont il est question au chapitre 8 permet de vérifier que l'hypothèse de Basile peut être considérée comme valide. L'hypothèse de Basile [Piranda 2001] consiste à supposer que la base des modes réels diagonalise la matrice d'amortissement. Dans ce cas, [Piranda 2001] nous assure que les parties réelle et imaginaire des déformées modales ϕ sont d'amplitudes égales et de signes opposés. La figure D.1 montre un exemple de mode identifié par MODAN : la partie imaginaire de chacune des composantes de ϕ (c'est-à-dire la valeur de ϕ en chacun des points du maillage) est représentée en fonction de la partie réelle. L'hypothèse de Basile est vérifiée de manière satisfaisante.

L'hypothèse de Basile étant considérée comme valide, on peut alors écrire la mobilité colocalisée de la structure au point de couplage avec la corde (donc à chaque frette le long du manche) vue comme un système à N_b degrés de liberté comme :

$$Y(\omega) = \sum_{k=1}^{N_b} \frac{j\omega}{m_k(\omega_k^2 + 2j\omega\omega_k\xi_k - \omega^2)} \tag{4.1}$$

où ω_k et ξ_k sont identifiés par une analyse modale classique. Il reste à identifier le terme m_k dans l'équation 4.1, décrit par [Woodhouse 2004ab] comme la masse modale. [Woodhouse 2004b] réalise un lissage des mesures de mobilité colocalisée. Dans notre cas, le recouvrement modal est faible, il suffit donc de se placer en $\omega = \omega_k$ pour connaître m_k. En effet, si $\omega = \omega_k$ (à cette condition la phase de $Y(\omega_k)$ est nulle, si bien que nous introduisons le module $|Y(\omega)|$), alors l'équation 4.1 devient :

$$m_k = \frac{1}{2|Y(\omega_k)|\omega_k\xi_k} \tag{4.2}$$

On définit également la raideur modale comme :

$$k_k = m_k \omega_k^2 \tag{4.3}$$

D.3 Description modale de la corde

On considère N_s modes d'une corde ayant les caractéristiques décrites au chapitre 6 : longueur L, module de Young E, moment quadratique I, tension T. Cette corde est de plus fixe en $x = 0$ et mobile (attachée à la structure) en $x = L$. Le mouvement de la corde est décrit comme une somme modale correspondant à une corde fixe à ses deux extrémités, à laquelle on ajoute un mode « contraint » sous la forme d'un mode de rotation de corps rigide autour du point de couplage $x = L$, qui permet de prendre en compte la condition cinématique d'attachement entre la corde et la structure. Le mouvement de la corde s'écrit dès lors, en notant $q_n(t)$ les déplacements modaux de la corde fixe à ses deux extrémités et en considérant N_s modes de corde :

$$y(x,t) = q_0(t)\frac{x}{L} + \sum_{n=1}^{N_s} q_n(t) sin(\frac{n\pi x}{L}) \tag{4.4}$$

Si on écrit $r_k(t)$ les déplacements modaux de la structure, alors la condition d'identité cinématique entre corde et structure en $x = L$ s'écrit :

$$q_0(t) = \sum_{k=1}^{N_b} r_k(t) \tag{4.5}$$

D.4 Couplage de la corde et de la structure

On appelle à présent « système couplé » le système composé de la corde et de la structure précédemment décrites. On peut alors écrire l'énergie potentielle élastique de ce système couplé comme la somme de l'énergie potentielle élastique de la corde et de l'énergie potentielle élastique de la structure :

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2}\left(T\left(\frac{\partial y}{\partial x}\right)^2 dx + EI\left(\frac{\partial^2 y}{\partial x^2}\right)^2 + \sum_{k=1}^{N_b} k_k r_k^2\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(\frac{T}{L}\left(\sum_{k=1}^{N_b} r_k\right)^2 + \frac{T\pi^2}{2L}\sum_{n=1}^{N_s} n^2 q_n^2 + \frac{EI\pi^4}{2L^3}\sum_{n=1}^{N_s} n^4 q_n^2 + \sum_{k=1}^{N_b} k_k r_k^2\right) \end{aligned} \tag{4.6}$$

On peut également écrire l'énergie cinématique du système couplé comme la somme de l'énergie cinématique de la corde et de l'énergie cinématique de la structure :

$$\begin{aligned} E_c &= \frac{1}{2}\left(\rho S\int_0^L \left(\frac{\partial y}{\partial t}\right)^2 dx + \sum_{n=1}^{N_s} m_n \dot{r}_k^2\right) \\ &= \frac{1}{2}\left(\frac{\rho L}{3}\left(\sum_{k=1}^{N_b} r_k\right)^2 + \frac{\rho L}{2}\sum_{n=1}^{N_s} q_n^2(t) - \frac{2\rho L}{\pi}\left(\sum_{k=1}^{N_b} r_k\right)\left(\sum_{n=1}^{N_s}\frac{(-1)^n q_n(t)}{n}\right) + \sum_{n=1}^{N_s} m_n \dot{r}_k^2\right) \end{aligned} \tag{4.7}$$

Si à présent on définit les coordonnées généralisées du système couplé comme :

$$\underline{X} = \begin{pmatrix} q_1 \\ \vdots \\ q_{N_s} \\ r_1 \\ \vdots \\ r_{N_b} \end{pmatrix} \tag{4.8}$$

il est possible d'obtenir les matrices de masse $\underline{\underline{\mathbb{M}}}$ et de raideur $\underline{\underline{\mathbb{K}}}$ du système couplé à partir des expressions :

$$E_c = \frac{1}{2} {}^t\underline{\dot{X}}.\underline{\underline{\mathbb{M}}}.\underline{\dot{X}} \tag{4.9}$$

$$E_p = \frac{1}{2} {}^t\underline{X}.\underline{\underline{\mathbb{K}}}.\underline{X} \tag{4.10}$$

Après calcul, il vient donc, pour la matrice de masse :

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbb{M}}}_{11} & \underline{\underline{\mathbb{M}}}_{12} \\ {}^t\underline{\underline{\mathbb{M}}}_{12} & \underline{\underline{\mathbb{M}}}_{22} \end{pmatrix} \tag{4.11}$$

avec

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}}_{11} = \begin{pmatrix} \frac{\rho SL}{2} & 0 & \cdots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{\rho SL}{2} \end{pmatrix} \tag{4.12}$$

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}}_{12} = \frac{\rho SL}{\pi} \begin{pmatrix} 1 & \cdots & 1 \\ -\frac{1}{2} & \cdots & -\frac{1}{2} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{(-1)^{N_s+1}}{N_s} & & \frac{(-1)^{N_s+1}}{N_s} \end{pmatrix} \tag{4.13}$$

et

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}}_{22} = \begin{pmatrix} m_1 + \frac{\rho SL}{3} & \cdots & \frac{\rho SL}{3} \\ & m_2 + \frac{\rho SL}{3} & \\ & & \ddots \\ \frac{\rho SL}{3} & \cdots & m_{N_b} + \frac{\rho SL}{3} \end{pmatrix} \tag{4.14}$$

La matrice de raideur s'écrit, quant à elle :

$$\underline{\underline{\mathbb{K}}} = \begin{pmatrix} \underline{\underline{\mathbb{K}}}_{11} & \underline{\underline{\mathbb{0}}} \\ \underline{\underline{\mathbb{0}}} & \underline{\underline{\mathbb{K}}}_{22} \end{pmatrix} \tag{4.15}$$

$$\underline{\underline{\mathbb{K}}}_{11} = \begin{pmatrix} \frac{T\pi^2}{2L} + \frac{EI\pi^4}{2L^3} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{4T\pi^2}{2L} + \frac{16EI\pi^4}{2L^3} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & \frac{N_s^2 T\pi^2}{2L} + \frac{N_b^4 EI\pi^4}{2L^3} \end{pmatrix} \tag{4.16}$$

et

$$\underline{\underline{\mathbb{K}}}_{22} = \begin{pmatrix} k_1 + \frac{T}{L} & \frac{T}{L} & \cdots & \frac{T}{L} \\ \frac{T}{L} & k_2 + \frac{T}{L} & \cdots & \frac{T}{L} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \frac{T}{L} & \cdots & & k_{N_b} + \frac{T}{L} \end{pmatrix} \tag{4.17}$$

D.5 Réduction à un mode de corde et un mode de structure

On s'intéresse au couplage entre le n^e mode de corde et le k^e mode de structure. Dans une plage de fréquences où le recouvrement modal est faible, on peut réduire les matrices de manière à ne prendre en considération que les termes correspondant aux modes n de corde et k de structure. Les matrices réduites s'écrivent :

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}}' = \begin{pmatrix} m'_{11} & m'_{12} \\ m'_{21} & m'_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\rho SL}{2} & \frac{\rho SL(-1)^{n+1}}{n\pi} \\ \frac{\rho SL(-1)^{n+1}}{n\pi} & m_k + \frac{\rho SL}{3} \end{pmatrix} \tag{4.18}$$

et

$$\underline{\underline{\mathbb{K}}}' = \begin{pmatrix} k'_{11} & k'_{12} \\ k'_{21} & k'_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{n^2T\pi^2}{2L} + \frac{n^4EI\pi^4}{2L^3} & 0 \\ 0 & k_k + \frac{T}{L} \end{pmatrix} \tag{4.19}$$

L'hypothèse de Basile permet postuler une matrice d'amortissement de la forme :

$$\underline{\underline{\mathbb{C}}}' = \begin{pmatrix} 2\xi_n\omega_n m'_{11} & 0 \\ 0 & 2\xi_k\omega_k m'_{22} \end{pmatrix} \tag{4.20}$$

en ayant posé $\omega_n = \sqrt{\frac{k'_{11}}{m'_{11}}}$ et $\omega_k = \sqrt{\frac{k'_{22}}{m'_{22}}}$ les pulsations propres respectives de la corde et de la structure. Est à résoudre le système couplé suivant :

$$\underline{\underline{\mathbb{M}}}'\underline{\ddot{X}} + \underline{\underline{\mathbb{C}}}'\underline{\dot{X}} + \underline{\underline{\mathbb{K}}}'\underline{X} = \underline{0} \tag{4.21}$$

On cherche $\underline{X}$ de la forme $\underline{X} = \underline{Q}e^{j\omega t}$, il vient donc :

$$(-\omega^2\underline{\underline{\mathbb{M}}}' + j\omega\underline{\underline{\mathbb{C}}}' + \underline{\underline{\mathbb{K}}}')\underline{X} = \underline{0} \tag{4.22}$$

Et pour que l'équation 4.22 soit vérifiée pour tout $\underline{X}$, il faut que :

$$det(-\omega^2\underline{\underline{\mathbb{M}}}' + j\omega\underline{\underline{\mathbb{C}}}' + \underline{\underline{\mathbb{K}}}') = 0 \tag{4.23}$$

L'explicitation de l'équation 4.22 donne :

$$(\omega_n^2 + 2j\omega\xi_n\omega_n - \omega^2)(\omega_k^2 + 2j\omega\xi_k\omega_k - \omega^2) = \omega^4\lambda^2 \tag{4.24}$$

avec λ^2 le coefficient de couplage :

$$\lambda^2 = \frac{m'_{12}m'_{21}}{m'_{11}m'_{22}} = \frac{2\rho SL}{n^2\pi^2(m_k + \frac{\rho SL}{3})} \tag{4.25}$$

Maintenant nous nous intéressons au couplage seulement en cas de coïncidence entre la fréquence de la corde et celle de la structure, soit quand $\omega \approx \omega_n \approx \omega_k$. Dans ce cas on peut écrire $\omega\omega_n \approx \omega_n^2$ et $\omega\omega_p \approx \omega_p^2$. Il vient donc, en ayant posé $\Omega = \omega^2$:

$$(\omega_n^2 + 2j\xi_n\omega_n^2 - \Omega)(\omega_p^2 + 2j\xi_k\omega_k^2 - \Omega) = \Omega^2\lambda^2 \tag{4.26}$$

En développant on obtient, en ayant posé $\gamma = \frac{\omega_k^2}{\omega_n^2}$:

$$\Omega^2(1-\lambda^2) - \Omega(1 + \gamma + 2j(\xi_n + \gamma\xi_k))\omega_n^2 + \omega_n^2\omega_k^2(1 + 2j\xi_n - 4\xi_k\xi_n) = 0 \tag{4.27}$$

On calcule Δ le discriminant de l'équation 4.27 en ayant remplacé ω_k^2 par $\gamma\omega_n^2$:

$$\Delta = \omega_n^4\left[(1 + \gamma + 2j(\xi_n + \gamma\xi_k))^2 - 4(1-\lambda^2)\gamma(1 - 4\xi_n\xi_k + 2j(\xi_n + \xi_k))\right] \tag{4.28}$$

Pour déterminer le signe de Δ, on peut le réécrire en considérant les modes de corde et de structure peu amortis ($\xi_n \ll 1$ et $\xi_k \ll 1$), et, du fait de la proximité de ω_n et de ω_k, en considérant aussi $\gamma \approx 1$:

$$\Delta' = 4\omega_n^4 \lambda^2 \gamma > 0 \tag{4.29}$$

Etant assuré de la positivité de Δ, on trouve alors les solutions à l'équation 4.27 :

$$\frac{\Omega_\pm}{\omega_n^2} = \frac{1+\gamma+2j(\xi_n+\gamma\xi_k) \pm \sqrt{(1+\gamma+2j(\xi_n+\gamma\xi_k))^2 - 4\gamma(1-\lambda^2)(1-4\xi_n\xi_k+2j(\xi_n+\xi_k))}}{2(1-\lambda^2)} \tag{4.30}$$

d'où en repassant à $\omega = +\sqrt{\Omega}$ (physiquement, il faut une partie réelle positive pour ω) :

$$\frac{\omega_\pm^2}{\omega_n^2} = \frac{1+\gamma+2j(\xi_n+\gamma\xi_k) \pm \sqrt{(1+\gamma+2j(\xi_n+\gamma\xi_k))^2 - 4\gamma(1-\lambda^2)(1-4\xi_n\xi_k+2j(\xi_n+\xi_k))}}{2(1-\lambda^2)} \tag{4.31}$$

Plaçons-nous à présent dans le cas d'une coïncidence stricte entre fréquences de corde et de structure : $\omega_n = \omega_k$. Il suffit de reprendre l'équation 4.31 avec $\gamma = 1$ et en posant $\sqrt{\Omega} = \omega_\pm$:

$$\frac{\omega_\pm^2}{\omega_n^2} = \frac{1+j(\xi_n+\xi_k) \pm \sqrt{\lambda^2(1+2j\xi_n)(1+2j\xi_k) - (\xi_n-\xi_k)^2}}{1-\lambda^2} \tag{4.32}$$

Avec l'hypothèse d'amortissement faible $\xi_n \ll 1$ et $\xi_k \ll 1$, on a, à l'ordre 1 :

$$\frac{\omega_\pm^2}{\omega_n^2} = \frac{1+j(\xi_n+\xi_k) \pm \sqrt{\lambda^2 - (\xi_n-\xi_k)^2}}{1-\lambda^2} \tag{4.33}$$

D.6 Discussion

Nous discutons ici de l'équation 4.33, et surtout du terme $\alpha = \lambda^2 - (\xi_n - \xi_k)^2$. Deux cas se présentent :

$\alpha > 0$: dans ce cas le terme $\sqrt{\alpha}$ est réel et nous avons :

$$\mathrm{Re}(\omega_\pm^2) = \frac{\omega_n^2}{1-\lambda^2}\left(1 \pm \sqrt{\alpha}\right) \tag{4.34}$$

$$\mathrm{Im}(\omega_\pm^2) = \frac{\omega_n^2}{1-\lambda^2}\left(\xi_n + \xi_k\right) \tag{4.35}$$

Les deux fréquences ont même partie imaginaire, mais des parties réelles différentes. Par rapport au cas découplé, les modes de corde et de structure verront leurs fréquences décalées, et leurs amortissements seront laissés non-perturbés. Les figures D.2 et D.3 montrent l'évolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées, dans le cas d'un couplage fort.

$\alpha < 0$: dans ce cas le terme $\sqrt{\alpha}$ est imaginaire pur et nous avons :

$$\mathrm{Re}(\omega_\pm^2) = \frac{\omega_n^2}{1-\lambda^2} \tag{4.36}$$

$$\mathrm{Im}(\omega_\pm^2) = \frac{\omega_n^2}{1-\lambda^2}\left(\xi_n + \xi_k \pm \frac{\sqrt{\alpha}}{j}\right) \tag{4.37}$$

Les deux fréquences ont cette fois même partie réelle, mais des parties imaginaires différentes. Par rapport au cas découplé, les modes de corde et de structure verront leurs fréquences maintenues égales (rappelons-nous que nous sommes dans le cas où corde et structure sont accordées), et leurs amortissements seront déviés. Les figures D.4 et D.5 montrent l'évolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées, dans le cas d'un couplage faible.

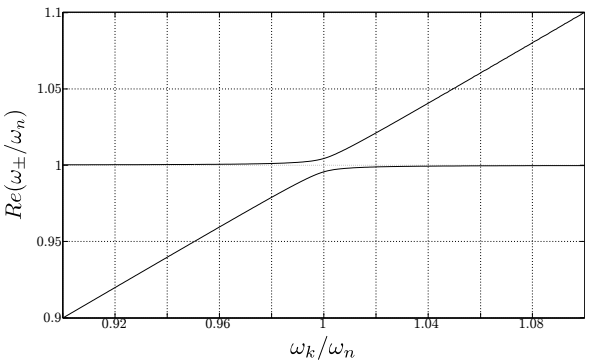


FIGURE D.2 – Cas d'un couplage fort. Evolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées.

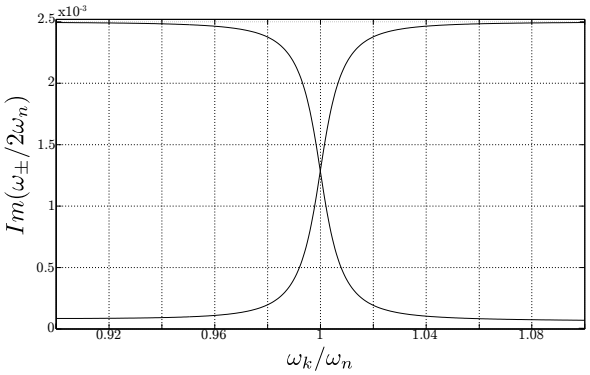


FIGURE D.3 – Cas d'un couplage fort. Evolution des amortissements du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées.

Si à présent on écrit le terme α avec les données du problème, il vient :

$$\alpha = \lambda^2 - (\xi_n - \xi_k)^2 = \frac{2\rho SL}{n^2\pi^2\left(m_k + \frac{\rho SL}{3}\right)} - (\xi_n - \xi_k)^2 \tag{4.38}$$

Alors, il est possible de calculer α dans le cas d'une guitare électrique *solid body*. On utilise ici les données du chapitre 6 :

- les mesures de mobilité colocalisée mesurées le long de la troisième corde fournissent les termes m_k ;
- l'analyse modale fournit les termes ξ_k ;
- les mesures d'amortissement de la troisième corde fournissent les termes ξ_n.

Pour chaque point de couplage, c'est-à-dire pour chaque mesure de mobilité colocalisée, les pulsations de corde ω_n correspondant à la note produite en ce point de couplage sont comparées aux pulsations des modes de structure ω_k données par l'analyse modale. Si les deux fréquences correspondantes sont espacées de moins de 10 Hz (ce seuil est arbitraire), alors on considère qu'il y a coïncidence fréquentielle et le terme de couplage α est calculé. La plage de fréquence étudiée est [20 Hz – 1000 Hz], comme décrit en annexe E.

La figure D.6 montre le calcul du terme α pour tous les cas de coïncidence fréquentielle entre corde et structure pour la guitare étudiée au chapitre 6. Les valeurs négatives d'α indiquent un couplage faible et les valeurs positives d'α un couplage fort [1]. La remarque formulée par [Woodhouse 2004a] pour la guitare classique peut également être faite pour la guitare électrique *solid body* : à part de rares accidents en basses fréquences, le terme de couplage α indique systématiquement des couplages faibles entre corde et structure. C'est donc les amortissements de la corde qui vont être perturbés par le couplage avec la structure, et non ses fréquences. Le choix fait au chapitre 6 de se focaliser sur les anomalies d'amortissement de corde instiguées par le couplage avec la structure est donc validé.

1. Remarquons que cette figure et la figure 2 de [Woodhouse 2004a], si elles sont analogues, sont à lire à l'envers l'une de l'autre : en effet, [Woodhouse 2004a] calcule et trace $-\alpha$. Les conclusions sont identiques.

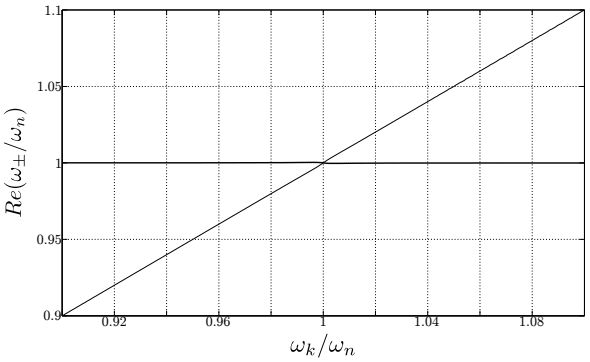


FIGURE D.4 – Cas d'un couplage faible. Evolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées.

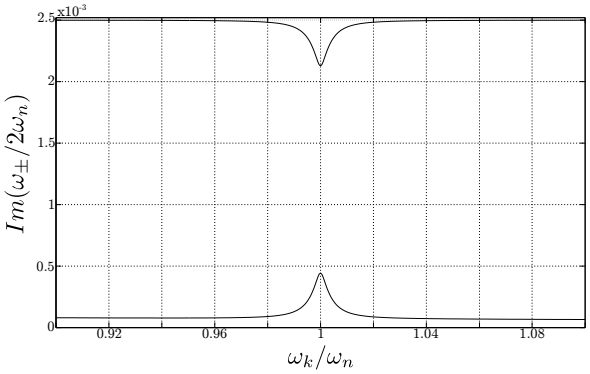


FIGURE D.5 – Cas d'un couplage faible. Evolution des amortissements du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées.

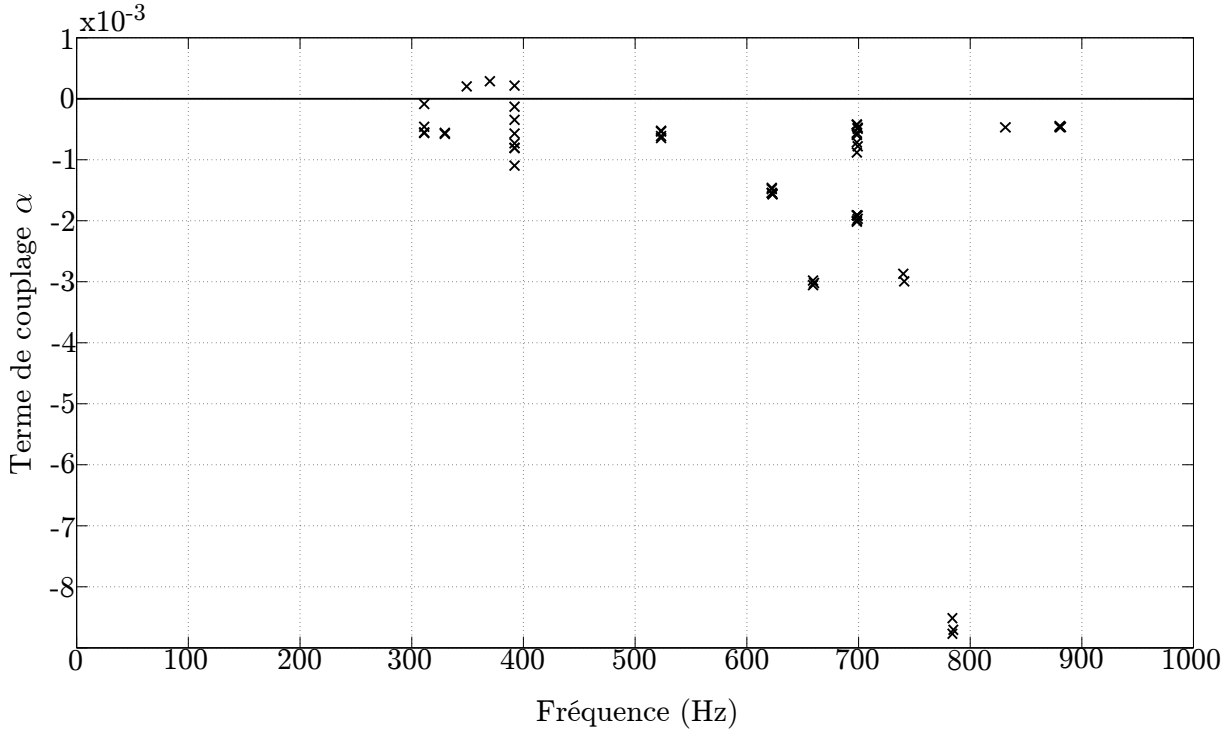


FIGURE D.6 – Calcul du terme de couplage α témoignant de la force de couplage entre corde et structure en cas de coïncidence fréquentielle. Les valeurs négatives d'α indiquent un couplage faible et les valeurs positives d'α un couplage fort. La ligne pleine en l'abscisse nulle souligne simplement la limite $\alpha = 0$ entre les deux types de couplage.

Annexe E

Sur la validité des mesures vibratoires

Cette annexe s'attache à détailler la méthode expérimentale de mesure des conductances colocalisées sur les guitares fabriquées à l'Itemm (chapitres 6 à 9). On justifie le choix de la bande de fréquence utilisable et la validité des mesures de colocalisation.

L'hypothèse de réciprocité d'une structure linéaire est supposée ici, si bien que l'emplacement respectif des points d'impact et de mesure (« devant » et « derrière » la frette, ou inversement) ne modifie pas la mesure. On prend les précautions d'usage pour assurer une mesure véritablement colocalisée, c'est-à-dire que le point de mesure (accéléromètre) et le point d'impact (marteau d'impact) doivent être le plus proche possible. En pratique, point de mesure et point d'impact sont situés de part et d'autre de la frette, accolés à celle-ci.

Afin de vérifier la colocalisation de nos mesures, nous utilisons une propriété intéressante de la mesure colocalisée donnée par [Ewins 1984] : une telle mesure contraint la phase de la fonction de transfert (qu'elle soit en déplacement, vitesse, ou accélération, divisée par la force d'excitation) à ne prendre des valeurs que dans une certaine plage. Pour une mesure de mobilité (fonction de transfert en vitesse), la phase doit varier entre $\pi/2$ et $\pi/2$. Comme on voit en figure E.1, la colocalisation de la mesure de mobilité est assurée jusqu'aux alentours de 1800 Hz par le fait que la phase y est restreinte à l'intervalle $[-\pi/2–\pi/2]$.

Les phénomènes limitant davantage la bande fréquentielle d'étude sont la bande passante de l'excitation au marteau et le recouvrement modal. Un spectre typique d'excitation au marteau est représenté en figure E.2. On voit qu'au-dessus de 1700 Hz, peu d'énergie est fournie à la structure.

La figure E.3 montre le module d'une mobilité typique dans la plage de fréquence [0 Hz–5000 Hz]. On constate qu'à partir de 1000 Hz, le recouvrement modal ne permet plus, lors de l'analyse modale, d'approximer la réponse en fréquence à un système à un degré de liberté au voisinage d'un mode. La figure E.4 représente la même mesure de mobilité, cette fois-ci dans la plage de fréquence [0 Hz–100 Hz]. On reconnaît le mode global (impliquant corps et manche) vers 50 Hz. Un mode à 0 Hz est aperçu : il s'agit d'un mode de corps rigide, dû aux conditions expérimentales libres. Quelques modes existent en-dessous de 20 Hz : il s'agit de modes de la structure portant la guitare (portique et élastiques). En pratique, on limite en basses fréquences la plage d'étude à 20 Hz.

En conclusion, la bande de fréquences étudiée lors de nos mesures de mobilité ou conductance sur les guitares construites à l'Itemm est [20 Hz–1000 Hz]. Nous sommes par ailleurs assurés de la colocalisation des mesures dans cette bande de fréquences.

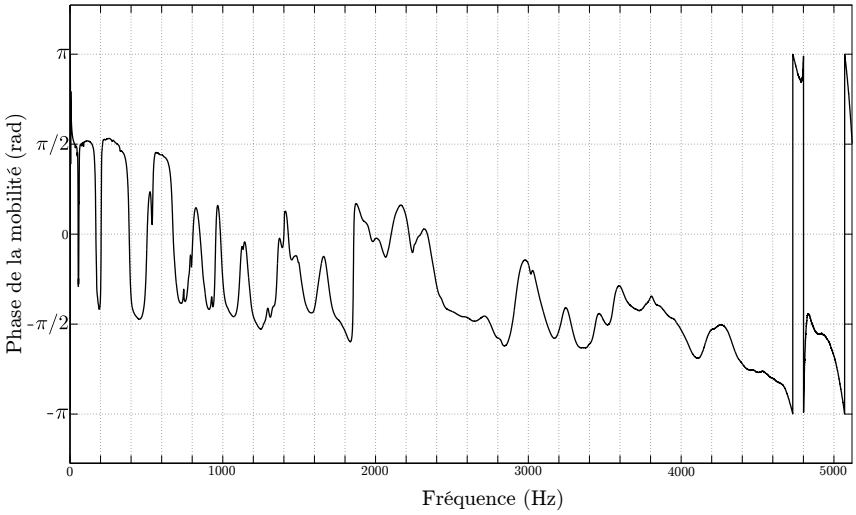


FIGURE E.1 – Phase typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm.

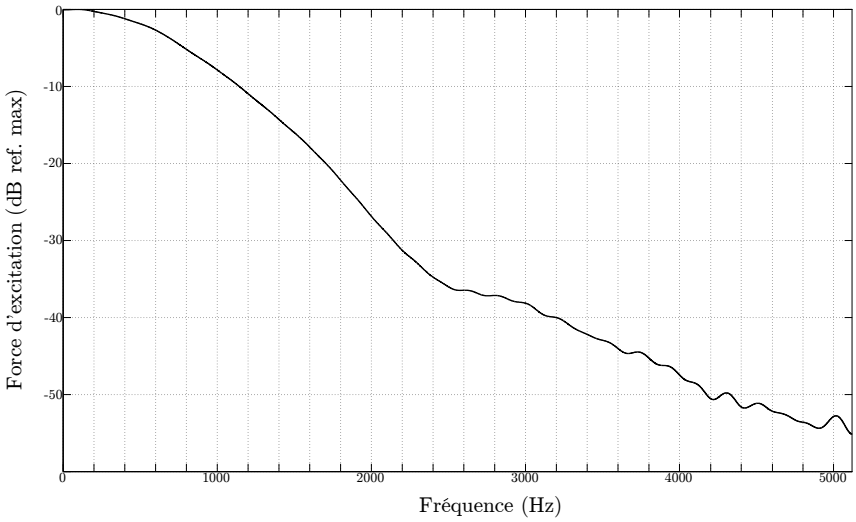


FIGURE E.2 – Spectre typique de la force d'excitation au marteau d'impact dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm.

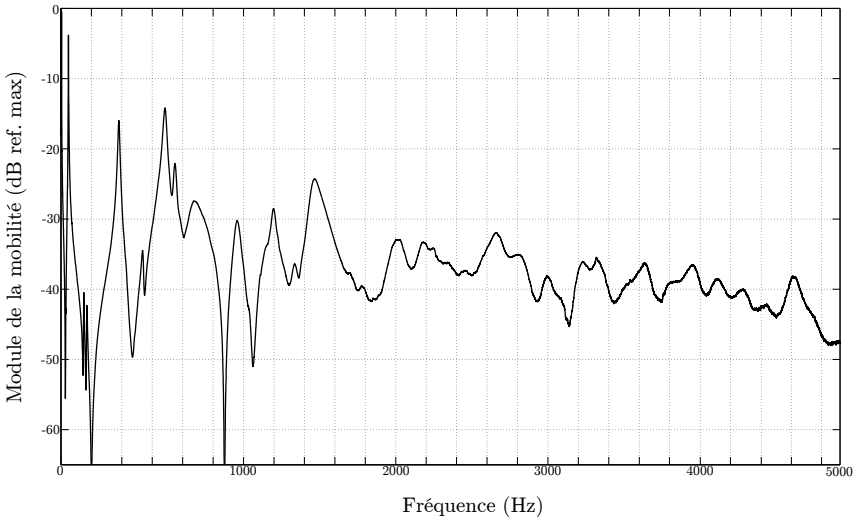


FIGURE E.3 – Module typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. Plage de fréquence [0 Hz–5000 Hz].

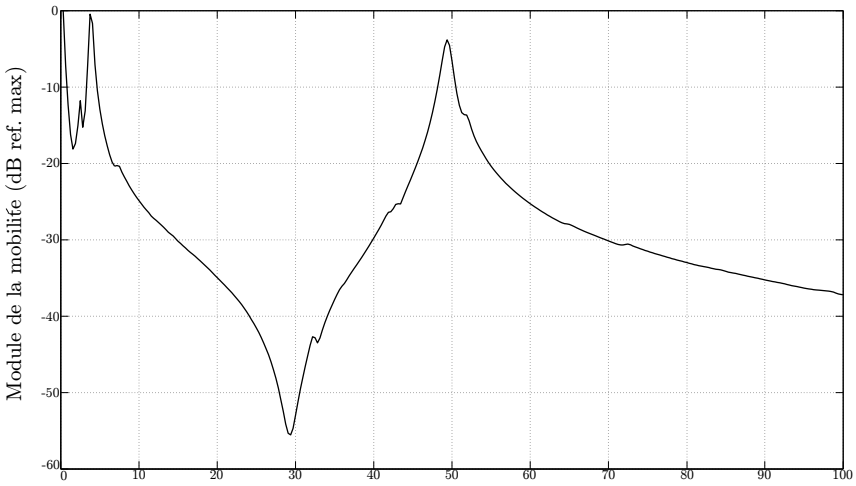


FIGURE E.4 – Module typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. Plage de fréquence [0 Hz–100 Hz].

Annexe F

Influence de la forme de la tête et de la forme du corps

Cette annexe reproduit une étude qui a été présentée sous forme de poster aux journées des jeunes chercheurs en audition, acoustique musicale et signal audio (JJCAAS) en 2012 à Marseille.

Le comportement vibratoire de la structure influe sur le comportement vibratoire de la corde, et donc sur le son de la guitare électrique *solid body*, par un couplage mécanique décrit par exemple aux chapitres 6 et 7. Ainsi, toute modification de la structure est susceptible d'avoir une conséquence sur le son par changement de la mobilité donc des conditions aux limites vues par les cordes. En termes de lutherie, une modification de la structure ou de sa mobilité se traduit par le changement d'un élément de lutherie.

Fleischer et Zwicker avaient déjà noté ce lien entre le son et le comportement dynamique de la structure. Dans [Fleischer & Zwicker 1998 1999], ils comparent une *Stratocaster* et une *Les Paul*. Des différences de comportement vibratoire sont trouvées, et certaines sont imputées à la différence de forme de tête entre les deux guitares : tête asymétrique pour la *Stratocaster* et tête symétrique pour la *Les Paul*. Plus précisément, ils constatent que l'apparition des modes de torsion de manche et le dédoublement de certains pics de mobilité dépendent de la symétrie de la tête. Or, comme il a été vu au chapitre 1, la forme de la tête n'est sûrement pas le seul élément de lutherie changeant entre ces deux modèles de guitare.

L'idée est donc venue d'étudier cette notion de symétrie de la tête, mais aussi du corps (différence assez notable entre les deux modèles de référence de guitare électrique *solid body*). Il est difficile d'avoir accès à des guitares dont la seule différence intentionnelle est la symétrie (ou non) de la tête ou du corps. Ainsi il a été décidé de procéder à une étude numérique. Quatre types de guitare volontairement simplistes ont été modélisés et leur base modale extraite d'une simulation par éléments finis. Cette simplicité assumée permet d'exagérer les tendances liées aux éléments de lutherie étudiés et de tirer des conséquences qualitatives.

Les conclusions de cette étude prospective sont :

la symétrie / l'asymétrie du corps

- ne produit pas de changement dans l'ordre d'apparition des modes,
- décale légèrement les fréquences de résonance de la structure,
- ne modifie pas le comportement du manche en torsion. En particulier, l'axe de symétrie du manche reste une ligne nodale pour les modes de torsion du manche,
- n'a probablement qu'un effet secondaire sur la vibration de la corde, donc sur le son de l'instrument.

la symétrie / l'asymétrie de la tête

- change l'ordre d'apparition des modes,
- décale plus fortement les fréquences de résonance de la structure,
- modifie le comportement du manche en torsion. En particulier, l'axe de symétrie du manche n'est plus une ligne nodale pour les modes de torsion du manche,
- devrait avoir une plus grande influence que la symétrie du corps sur la vibration des cordes, donc sur le son.

Symmetrical vs. asymmetrical electric guitar: what change for sound?

Arthur Paté pate@lam.jussieu.fr

Supervisors :
Jean-Loïc Le Carrou
Benoît Fabre

Context

How is the sound affected by a change of a single lutherie parameter?

- Common electric guitars differ in too many lutherie parameter (woods, shapes, wood sawing, junction between parts, type of bridge, nut, fret...) [1]

Les Paul, by Gibson
mahogany body and neck, ebony or rosewood fingerboard, neck and body glued together, symmetrical headstock, almost symmetrical body, two-part bridge...

Stratocaster, by Fender
alder or ash body, maple neck, maple or rosewood fingerboard, neck and body screwed together, asymmetrical headstock, asymmetrical body, one-part bridge...

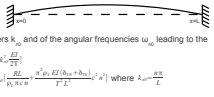
- Need to have strictly identical guitars, only differing in a single lutherie parameter
  - collaboration with luthiers [2,3] and experimental study
  - numerical simulation

- Example of lutherie parameter : the symmetry/asymmetry of headstock and body
  - [4] draws conclusions about vibrational behaviour changes due to the symmetry of the head, but the investigated guitars were otherwise too different
  - can numerical simulation be helpful to predict the vibrational behaviour of electric guitars?
  - study of very simplified guitars...

Theoretical framework

What is the link between guitars' vibrations and sound? (based on [5])

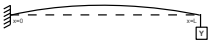
Uncoupled lossy string :



Calculation of the wave numbers $k_{n\omega}$ and of the angular frequencies $\omega_{n\omega}$ leading to the frequencies $f_{n\omega}=\Re(\omega_{n\omega})=\frac{nc}{2L}\left(1+k_{n\omega}^2\frac{EI}{2T}\right)$

and dampings $\xi_{n\omega}=-\Im(\omega_{n\omega})=ck_{n\omega}\left[\frac{BL}{\rho_L\pi c\,n}+\frac{\pi^2\rho_L EI(b_{1\omega}+b_{3\omega})}{T^2L}c^2n^2\right]$ where $k_{n\omega}=\frac{n\pi}{L}$

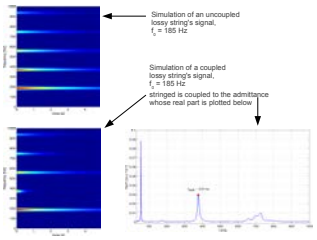
Coupled lossy string :



Considering $Y(L,\omega)=\frac{\tan(kL)}{Z_c}$ with $Z_c=\frac{1}{Y}$ the characteristic impedance of the string and $k_n=k_{n0}+\delta k$

frequencies become $f_n=\Re(\omega_n)=\frac{nc}{2L}\left(1+\frac{\pi^2\rho_L^2}{L^2}\frac{EI}{2T}+\frac{Z_c}{n\pi}\Im[Y(L,\omega_n)]\right)$

and dampings become : $\xi_n=-\Im(\omega_n)=\frac{n\pi c}{L}\left(\frac{BL}{\rho_L\pi c\,n}+\frac{\pi^2\rho_L EI(b_{1\omega}+b_{3\omega})}{T^2L^2}c^2n^2+\frac{Z_c}{n\pi}\Re[Y(L,\omega_n)]\right)$



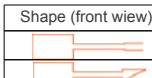
- Imaginary part of the admittance (susceptance) : shift in the frequencies of the string's partials
- Real part of the admittance (conductance) : additionnal damping to the partials of the string

In practice, the shift in frequency is small, but additionnal damping could be very high: some partials are strongly damped → the timbre changes!

Finite-element model

Guitar specifications :

- mahogany (material constants from [6])
- neck and fingerboard identical
- kinematic relationship at junction between parts (body, fingerboard, neck, head)
- 4 different shapes
- volume and mass identical
- neck and body thickness identical and typical of real guitars

Shape (front wiew)	Name*	# of elements	# of nodes
	SHSB	10,830	52,027
	AHSB	10,846	52,097
	SHAB	11,134	53,305
	AHAB	11,150	53,375

* S refers to "symmetrical", A to "asymmetrical", H to "headstock" and B to "body"

Finite element model :

- Cast3m [7]
- 20-node hexaedrons
- cubic interpolation

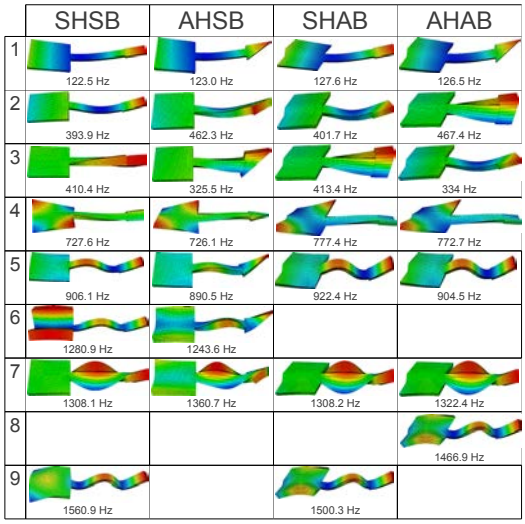
Modal analysis of the 4 guitars:

Modal identification :
- mode shapes
- eigenfrequencies

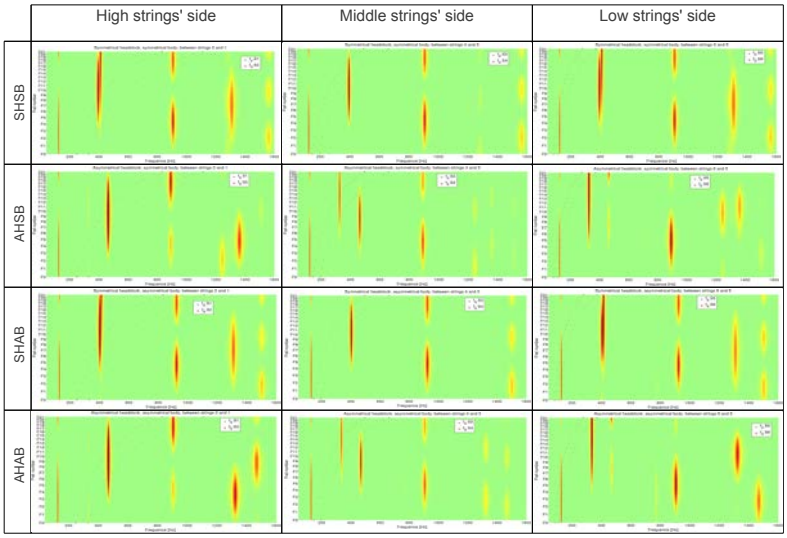
Frequency response function :
- range 40 Hz – 1600 Hz
- at each string/fret crossing on the neck
- coupling at the bridge neglected [3,4,8]
- arbitrary 1%-damping for each mode

Results

Modal identification :



Conductance on the neck :



Discussion

The symmetry of the headstock is responsible for :

- modes appearing in a different order
- strong frequency shifts for the modes of the guitar
- active torsional modes along the middle line of the fingerboard
- torsional modes acting differently on each side of this middle line

The strings "see" a very different conductance (peak shifts, new peaks...)
The string damping due to the coupling to the structure may strongly differ between the symmetrical-headstock case and the asymmetrical-headstock case
→ timbre may change!

The symmetry of the body is responsible for :

- modes appearing in the same order
- small frequency shifts for the modes of the guitar, though shifts increase with increasing frequency
- no active torsional modes along the middle line of the fingerboard

The strings only "see" a slightly different conductance (small peak shifts)
The string damping due to the coupling to the structure may only slightly differ between the symmetrical-body case and the asymmetrical-body case
→ timbre may not change a lot!

References

- [1] About the electric guitar: a cross-disciplinary context for an acoustical study, A. Paté, B. Navarret, R. Dumoulin, J.-L. Le Carrou, B. Fabre and V. Doutaut, *Proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, 2012
- [2] Guitare électrique : quel rôle pour les éléments de lutherie ?, J.-L. Le Carrou, J. Frelat, A. Mancel, B. Navarret, *Proceedings of CFA 2012*, Lyon, 2010
- [3] A vibro-acoustical and perceptive study of the neck-to-body junction of a solid-body electric guitar, A.Paté, J.-L. Le Carrou, B. Navarret, D. Dubois and B. Fabre, *Proceedings of Acoustics 2012*, Nantes, 2012
- [4] Investigating dead spots of electric guitars, H. Fleischer and T. Zwicker, *Acta Acustica* **85** (pp. 128-135), 1999
- [5] Mechanics of musical instruments, A. Hirschberg, J. Kergomard and G. Weinreich, *Springer Verlag*, 1995 (Ch.4 "The mechanics of vibrating strings", C. Valette)
- [7] *Cast3m* http://www-cast3m.cea.fr/
- [6] Acoustics of wood, V. Bucur, *CRC Press*, 1995
- [8] Mechanical vibrations of electric guitars, H. Fleischer and T. Zwicker, *Acta Acustica* **84** (pp. 758-765), 1998

JJCAAS 2012
Journées des Jeunes Chercheurs en Audition, Acoustique musicale et Signal audio
December 5-7 2012 – LMA Marseille

Annexe G

Généralisation des résultats mécaniques sur le matériau de la touche

Cette annexe présente une généralisation de la caractérisation mécanique du matériau de touche présentée au chapitre 7. Les deux guitares dénommées E et R au chapitre 7 ont été extraites d'un un peu plus large corpus de six guitares. Ces guitares ont été produites à l'Itemm et sont décrites au chapitre 3. Elles suivent les plans et cahier des charges du modèle *Les Paul Junior DC*[1] de la marque *Gibson*. Les six luthiers ont fabriqué chacun leur exemplaire de ce modèle en utilisant des bois issus des mêmes lots strictement[2], les mêmes plans, outils et machines, tout cela dans des conditions environnementales (température, hygrométrie) identiques, car la production a eu lieu pendant les heures de formation des luthiers à l'Itemm. Ces six guitares se divisent en deux groupes :

- trois guitares à touche en ébène (G1, G3 et G5 = E, touche en ébène),
- trois à touche en palissandre (G2, G4 et G6 = R, touche en palissandre).

où la guitare E (respectivement R) du chapitre 7 se trouve être la guitare G5 (respectivement G6) de la numérotation proposée ici et au chapitre 3.

On a observé au chapitre 7 qu'en comparaison de la guitare G5, la conductance moyenne[3] de la guitare G6 révèle toujours quasi-systématiquement de plus grandes valeurs à tous les endroits où corde et structure se couplent sur le manche. Cette tendance se trouve pouvoir être généralisée aux six guitares. Ces guitares ont toutes fait l'objet de l'étude décrite au chapitre 7 : mesure de conductance aux endroit potentiels de couplage entre corde et structure. Pour des raisons expérimentales, les mesures ont été faites le long de trois axes parallèles au manche. Si on numérote classiquement les cordes de la plus aiguë à la plus grave de 1 à 6, le premier axe se situe entre les première et deuxième cordes (appelé « intercorde 21 »), le deuxième axe se situe entre les troisième et quatrième cordes (« intercorde 43 ») et le troisième axe se situe entre les cinquième et sixième cordes (« intercorde 65 »). L'accélérance colocalisée est mesurée le long de chacun de ces axes à chaque frette ainsi qu'au sillet en plaçant l'accéléromètre d'un côté de la frette, et en excitant la structure de l'autre côté de la frette, ainsi que décrit en figure 7.1 et en annexe E. L'accélérance est intégrée pour donner la mobilité. La partie réelle de la mobilité est la conductance.

On montre en figures G.1 à G.3 les conductances colocalisées moyennes le long des manches des six guitares. Ainsi qu'au chapitre 7, la moyenne est calculée sur les domaines basses et moyennes fréquences (voir annexe E). Les courbes noires (respectivement grises) représentent les guitares à touche en ébène (respectivement en palissandre). Les courbes en traits pleins représentent les guitares G5 (E) et G6 (R) dont il était question au chapitre 7.

1. « DC » est le sigle de « double cutaway », désignant la double échancrure à l'endroit qu'on désigne par le terme « épaules » en lutherie d'instruments à cordes, c'est-à-dire en haut du corps, près sa jonction au manche.
2. sipo pour le corps et le manche
3. Pour une mesure de conductance, il s'agit de calculer sa moyenne dans la bande de fréquence [20 Hz – 2000 Hz].

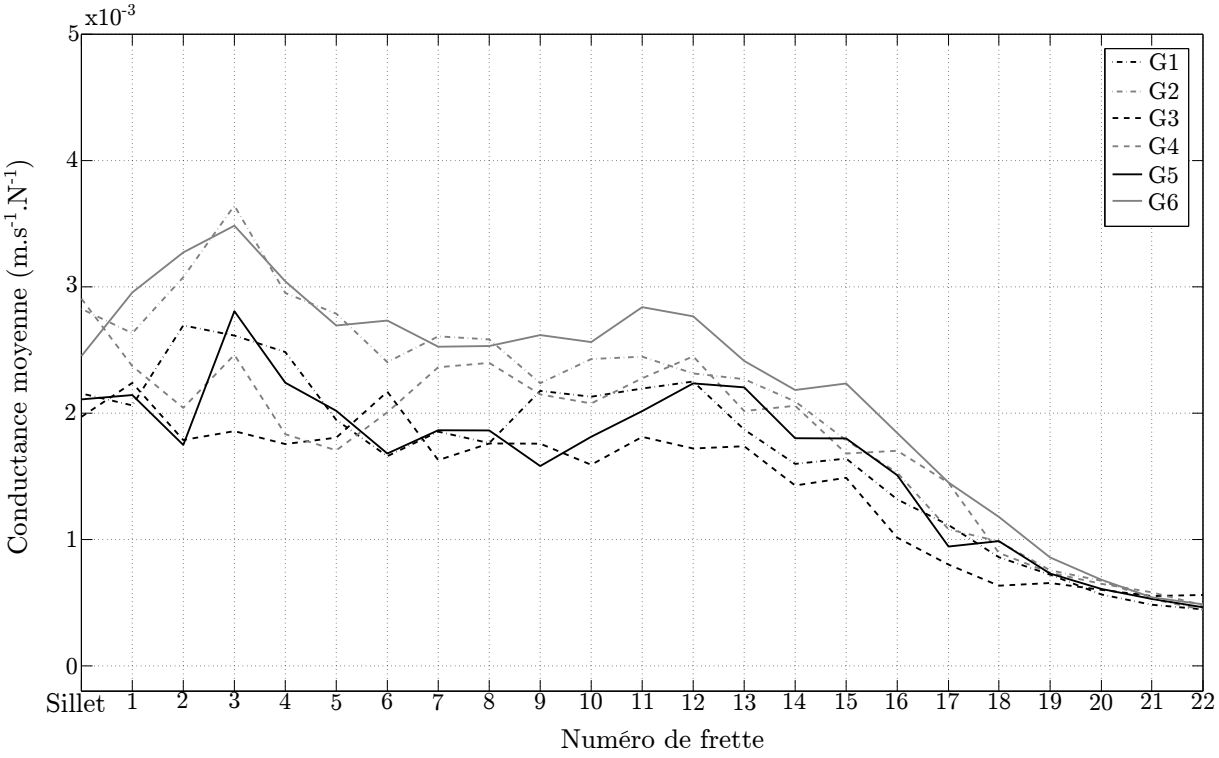


FIGURE G.1 – Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 21 »

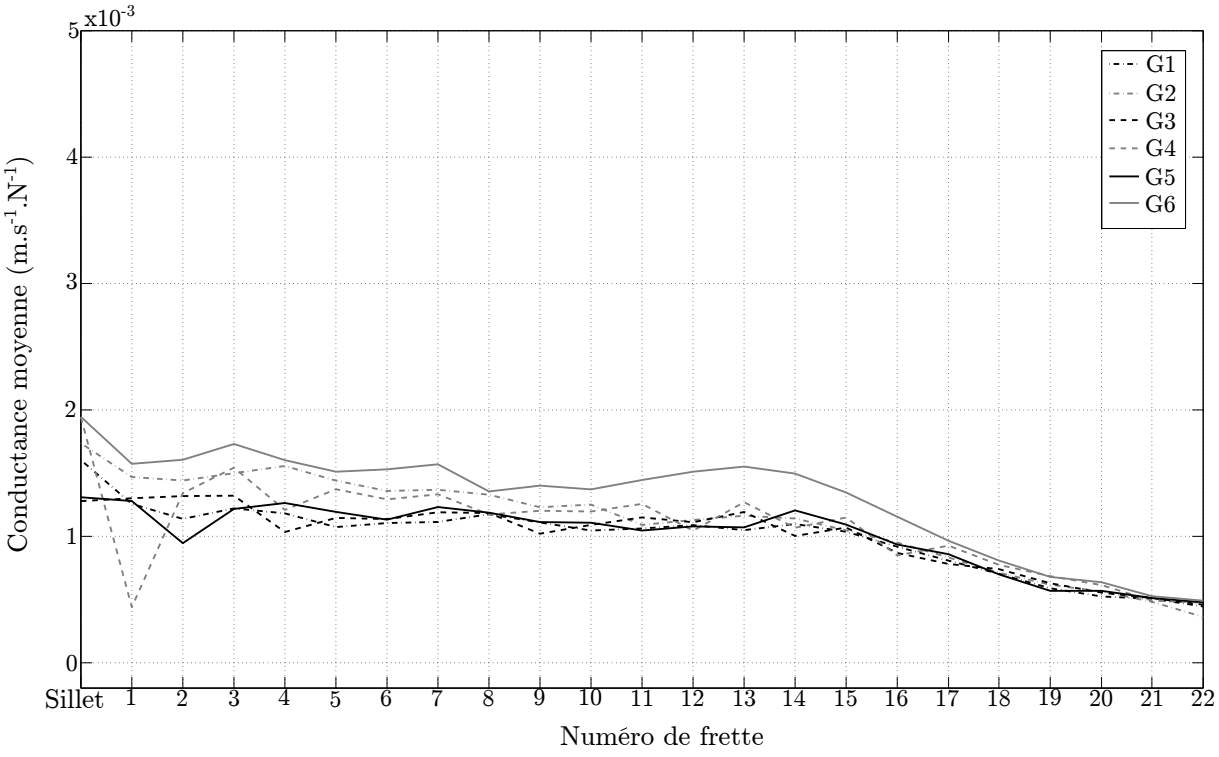


FIGURE G.2 – Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 43 »

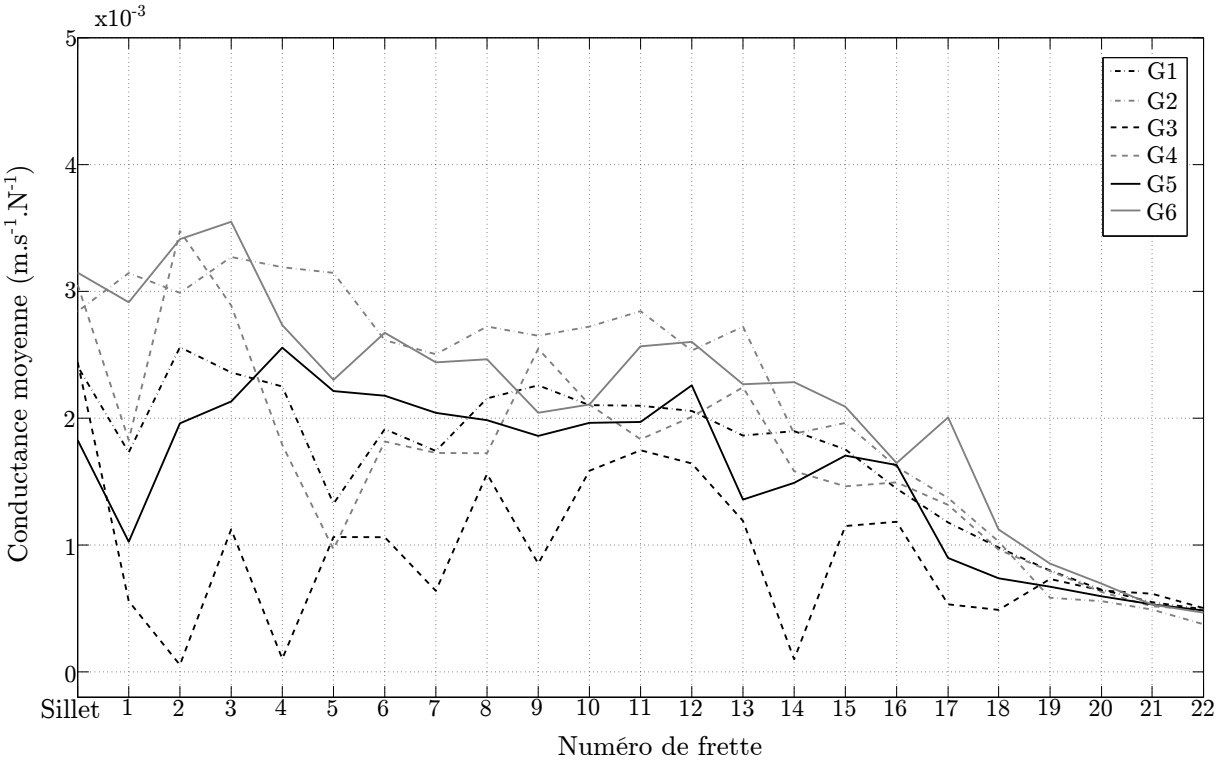


FIGURE G.3 – Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 65 »

Comme il est visible en figures G.1 à G.3, la tendance évoquée au chapitre 7 semble se confirmer : la touche en palissandre paraît procurer une plus grande conductance moyenne à l'instrument. Du point de vue des cordes, il en résulterait un terme d'amortissement supplémentaire dû au couplage avec la structure plus grand. Les cordes des guitares à touche en palissandre seraient donc plus susceptibles de voir leur vibration perturbée par la structure. On s'attend à ce que la touche en palissandre créé plus d'inhomogénéité dans le spectre de la corde, donc dans celui du son.

Annexe H

Paramètres modaux identifiés sur les guitares des études de la touche et de la jonction manche–corps.

Cette annexe présente les résultats des analyses modales dont il a été question au chapitre 8. Le tableau H.1 présente les paramètres modaux identifiés sur chacune des six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les tableaux H.2 et H.3 présentent les paramètres modaux identifiés sur chacune des neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps, respectivement dans les deux cas suivant : guitares achevées équipées d'accastillage et électronique, et guitares assemblées mais non équipées. Dans ces tableaux, fréquence et amortissement modaux sont donnés pour chaque guitare sur laquelle est identifié le mode correspondant à la déformée modale représentée dans la deuxième colonne du tableau. Les modes sont ordonnés par fréquence croissante et déformée identique. Les guitares sont regroupées par type de construction (touche en ébène ou touche en palissandre ; manche vissé, collé ou traversant). Une colonne grisée donne les paramètres modaux moyens calculés pour chacune des constructions sur les trois guitares du groupe correspondant.

Table H.1: Modes identifiés sur chacune des six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les guitares G1, G3 et G5 sont à touche en ébène (E), les guitares G2, G4 et G6 sont à touche en palissandre (P). Le lecteur notera que la guitare nommée « E » (respectivement « R ») au chapitre 7 correspond à G5 (respectivement G6) ici. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque matériau de touche. Dans le cas de deux modes à déformées identiques ou proches (modes 11 et 11 bis, 12 et 12 bis), les moyennes sont calculées sur les deux modes.

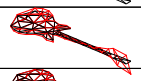
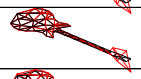
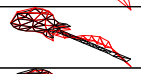
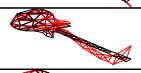
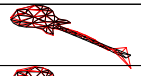
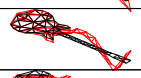
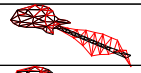
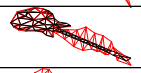
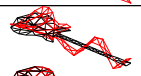
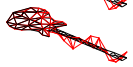
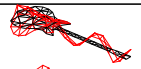
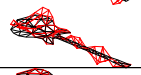
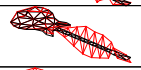
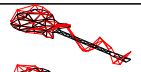
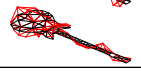
Mode	Déformée	G1 (E)	G3 (E)	G5 (E)	moy. E	G2 (P)	G4 (P)	G6 (P)	moy. P
1		54,76 Hz 1,3%	53,07 Hz 1,9%	50,65 Hz 1,6%	52,83 Hz 1,6%	49,73 Hz 1,3%	53,26 Hz 1,1%	46,48 Hz 1,3%	49,82 Hz 1,2%
2		- -	- -	91,32 Hz 1,5%	91,32 Hz 1,5%	- -	87,75 Hz 1,6%	149,28 Hz 1,7%	118,51 Hz 1,7%
3		- -	- -	- -	- -	- -	154,47 Hz 1,9%	- -	154,47 Hz 1,9%
4		169,48 Hz 1,9%	- -	162,89 Hz 2,1%	166,19 Hz 2,0%	- -	174,71 Hz 1,9%	156,47 Hz 1,4%	165,59 Hz 1,7%
5		173,94 Hz 1,3%	169,01 Hz 1,7%	- -	171,5 Hz 1,5%	171,43 Hz 2,0%	176,91 Hz 2,3%	- -	174,17 Hz 2,2%
6		304,61 Hz 1,3%	326,33 Hz 1,4%	327,51 Hz 1,3%	319,48 Hz 1,3%	- -	320,47 Hz 1,4%	312,40 Hz 1,4%	316,44 Hz 1,4%
7		376,47 Hz 1,5%	389,80 Hz 1,5%	381,20 Hz 2,3%	382,49 Hz 1,8%	389,34 Hz 1,6%	387,47 Hz 1,6%	348,52 Hz 1,6%	375,32 Hz 1,6%
8		534,77 Hz 1,5%	536,28 Hz 1,4%	529,46 Hz 1,3%	533,50 Hz 1,4%	533,46 Hz 1,4%	530,02 Hz 1,2%	531,05 Hz 1,3%	531,51 Hz 1,3%
9		- -	631,57 Hz 2,0%	- -	631,57 Hz 2,0%	- -	695,24 Hz 1,6%	- -	695,24 Hz 1,6%
10		663,08 Hz 2,8%	717,01 Hz 1,8%	- -	690,05 Hz 2.3%	- -	- -	- -	- -
11		686,69 Hz 2,7%	693,56 Hz 2,3%	671,94 Hz 1,9%	684,06 Hz 2,3%	696,71 Hz 1,3%	- -	641,85 Hz 2%	682,16 Hz 1,5%
11 bis		- -	- -	- -	- -	- -	707,91 Hz 1,3%	- -	- -
12		727,11 Hz 1,9%	788,91 Hz 4,7%	720,96 Hz 1,9%	745,66 Hz 2,8%	751,46 Hz 1,4%	- -	- -	776,12 Hz 1,6%
12 bis		- -	- -	- -	- -	- -	800,77 Hz 1,8%	- -	- -
13		848,24 Hz 1,3%	872,87 Hz 1,1%	878,40 Hz 1,1%	866,50 Hz 1,2%	919,09 Hz 1,1%	854,62 Hz 1,4%	841,30 Hz 1,1%	871,61 Hz 1,2%
14		991,94 Hz 2,7%	985,97 Hz 1,3%	962,60 Hz 1,9%	980,17 Hz 2,0%	1138,57 Hz 1,7%	1002,75 Hz 1,5%	936,62 Hz 2%	1026 Hz 1,7%
14 bis		- -	933,75 Hz 0,7%	- -	- -	- -	- -	- -	- -

Table H.2: Guitares cordées et équipées. Modes identifiés sur chacune des neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les guitares G1, G2 et G3 sont à manche vissé, les guitares G4, G5 et G6 sont à manche collé, et les guitares G7, G8 et G9 sont à manche traversant. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque type de jonction manche–corps : V pour manche vissé, C pour manche collé, T pour manche traversant. Dans le cas de deux modes à déformées identiques (modes 4 et 4 bis, 8 et 8 bis, 9 et 9 bis), les moyennes sont calculées sur les deux modes.

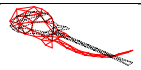
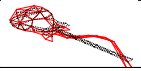
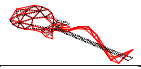
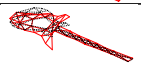
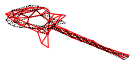
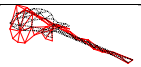
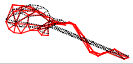
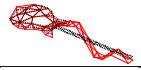
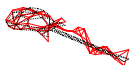
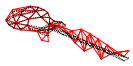
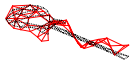
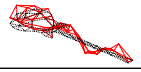
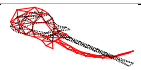
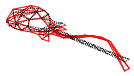
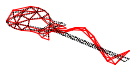
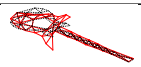
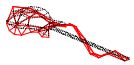
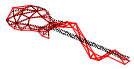
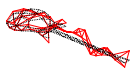
Mode	Déformée	G1	G2	G3	moy. V	G4	G5	G6	moy. C	G7	G8	G9	moy. T
1		49,70 Hz 1,1%	42,55 Hz 1,5%	49,58 Hz 1,0%	47,28 Hz 1,2%	53,46 Hz 0,8%	48,59 Hz 0,9%	50,09 Hz 1,0%	50,71 Hz 0.9%	50,90 Hz 1,2%	45,55 Hz 1,3%	50,08 Hz 1,3%	48,84 Hz 1,3%
2		155,22 Hz 1,0%	140,49 Hz 1,3%	160,49 Hz 1,3%	152,07 Hz 1,2%	175,52 Hz 1,1%	158,80 Hz 1,3%	165,21 Hz 1,2%	166,51 Hz 1,2%	161,95 Hz 1,8%	151,47 Hz 1,2%	166,30 Hz 1,7%	159,91 Hz 1,6%
3		354,58 Hz 1,1%	319,19 Hz 1,3%	367,74 Hz 1,8%	347,17 Hz 1,4%	395,39 Hz 1,0%	368,06 Hz 1,0%	386,16 Hz 1,1%	383,20 Hz 1,0%	372,16 Hz 1,2%	358,05 Hz 0,9%	377,89 Hz 1,0%	369,37 Hz 1,0%
4		526,62 1,1%	539,39 Hz 1,4%	529,24 Hz 1,5%	531,75 Hz 1,33%	499,18 Hz 1,6%	524,01 Hz 1,3%	507,36 Hz 1,3%	518,73 Hz 1,3%	541,68 Hz 1,8%	561,24 Hz 1,2%	503,73 Hz 1,6%	535,55 Hz 1,5%
4 bis		- -	- -	- -	- -	- -	544,37 Hz 1,1%	- -	- -	- -	- -	- -	- -
5		- -	- -	- -	- -	567,68 Hz 1,7%	-	574,32 Hz 1,2%	571,00 Hz 1,5%	- -	- -	572,49 Hz 2,4%	572,49 Hz 2,4%
6		638,94 Hz 1,2%	- -	651,46 Hz 1,3%	645,20 Hz 1,3%	- -	644,94 Hz 1,2%	- -	644,94 Hz 1,2%	662,17 Hz 1,6%	648,55 Hz 0,9%	668,57 Hz 1,2%	659,76 Hz 1,2%
7		686,74 Hz 1,4%	739,80 Hz 0,7%	699,50 Hz 1,1%	708,68 Hz 1,1%	722,4 Hz 0,8%	696,63 Hz 0,9%	712,18 Hz 0,9%	710,40 Hz 0,9%	- -	735,23 Hz 1,3%	- -	698,70 Hz 1,5%
8		843,84 Hz 1,2%	845,91 Hz 0,5%	- -	861,39 Hz 0,9%	- -	- -	- -	- -	- -	- -	876,62 Hz 0,7%	876,62 Hz 0,7%
8 bis		- -	- -	894,42 Hz 1,0%	-	- -	824,00 Hz 0,7%	865,12 Hz 0,5%	844,56 Hz 0,6%	- -	- -	- -	- -
9		- -	- -	- -	- -	- -	905,1 Hz 0,7%	915,99 Hz 0,7%	910,55 Hz 0,68%	918,51 Hz 1,0%	- -	- -	920,91 Hz 1,0%
9 bis		- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	- -	923,31 Hz 1,0%	- -

Table H.3: Guitares non-cordées et non-équipées. Modes identifiés sur chacune des neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les guitares G1, G2 et G3 sont à manche vissé, les guitares G4, G5 et G6 sont à manche collé, et les guitares G7, G8 et G9 sont à manche traversant. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque type de jonction manche/corps : V pour manche vissé, C pour manche collé, T pour manche traversant. On fait remarquer que certains modes (par exemple le mode 5 du tableau H.2) ne sont pas identifiés.

Mode	Déformée	G1	G2	G3	moy. V	G4	G5	G6	moy. C	G7	G8	G9	moy. T
1		58,8 Hz 0,9%	50,3 Hz 0,9%	58,4 Hz 1,0%	55,8 Hz 0,9%	64,8 Hz 0,8%	57,7 Hz 0,9%	59,6 Hz 0,9%	60,7 Hz 0,9%	60,4 Hz 1,1%	53,8 Hz 1,0%	59,8 Hz 1,0%	58,0 Hz 1,0%
2		174,1 Hz 0,8%	157,1 Hz 0,8%	175,8 Hz 0,8%	196,0 Hz 0,8%	194,0 Hz 0,8%	176,7 Hz 1,1%	179,7 Hz 1,3%	185,4 Hz 0,9%	179,5 Hz 1,2%	168,9 Hz 1,1%	183,8 Hz 1,2%	174,2 Hz 1,2%
3		395,2 Hz 0,8%	- -	396,3 Hz 0,8%	395,8 Hz 0,8%	433,6 Hz 0,7%	409,4 Hz 0,7%	423,7 Hz 0,8%	422,2 Hz 0,8%	409,2 Hz 0,8%	398,2 Hz 0,6%	420,5 Hz 0,7%	403,7 Hz 0,7%
4		541,9 Hz 1,0%	547,6 Hz 1,1%	545,5 Hz 1,1%	545,0 Hz 1,1%	520,1 Hz 1,1%	553,5 Hz 1,1%	522,8 Hz 1,1%	532,1 Hz 1,1%	562,6 Hz 1,2%	584,7 Hz 1,0%	523,8 Hz 1,1%	557 Hz 1,1%
6		655,5 Hz 1,1%	656,5 Hz 1,1%	662,4 Hz 1,3%	658,1 Hz 1,2%	575,8 Hz 1,3%	640,2 Hz 0,9%	573,6 Hz 1,3%	596,5 Hz 1,2%	667,3 Hz 1,2%	691,7 Hz 0,8%	579,7 Hz 1,4%	646,2 Hz 1,1%
7		730,6 Hz 0,8%	743,0 Hz 1,0%	742,6 Hz 0,5%	738,7 Hz 0,7%	800,8 Hz 0,8%	755,8 Hz 0,9%	758,5 Hz 0,3%	771,7 Hz 0,7%	769,8 Hz 1,0%	758,7 Hz 0,8%	756,0 Hz 0,8%	761,5 Hz 0,9%
8		- -	834,0 Hz 1,0%	922,3 Hz 0,9%	878,2 Hz 1,0%	937,5 Hz 0,8%	881,6 Hz 0,8%	933,5 Hz 0,9%	917,5 Hz 0,8%	919,5 Hz 0,9%	902,5 Hz 0,9%	961,5 Hz 0,8%	927,8 Hz 0,9%

Liste des tableaux

1.1 Nombre de conservatoires français proposant l'enseignement de la guitare électrique au cours de l'année scolaire 2013–2014. D'après la base de données du « guide pratique de la musique » de la Cité de la musique, disponible à l'adresse http ://mediatheque.cite-musique.fr/masc/ 5

1.2 *Fender Stratocaster* et *Gibson Les Paul* : les deux modèles de référence de guitare électrique *solid body* comparés selon leurs principaux éléments de lutherie. Ce tableau considère les modèles les plus courants. 13

3.1 Vocabulaire utilisé dans les fiches d'évaluation remplies à l'issue de la première expérience portant sur la jonction du manche au corps. Ces mots sont utilisés comme amorces pour recueillir les mots dans le corpus de retranscriptions des entretiens portant sur le matériau de la touche. Etant utilisés comme amorces, ces mots sont présentés en ordre arbitraire sans mention de leur nombre d'occurrences. Remarquons l'omniprésence des formes nominales au sein de cette liste de mots. Cela est très probablement dû au fait qu'il est demandé aux guitaristes de fournir des « critères », le mot « critère » étant lui-même une forme nominale. 46

3.2 Vocabulaire utilisé dans les commentaires écrits associés aux catégories effectuées lors du test de catégorisation libre sur le matériau de touche. Ces mots sont utilisés comme amorces pour recueillir les mots dans le corpus de retranscriptions des entretiens portant sur le matériau de la touche. Etant utilisés comme amorces, ces mots sont présentés en ordre arbitraire sans mention de leur nombre d'occurrences. 49

3.3 Ensemble des extraits du corpus contenant les mots *précis(e)* ou *précision*. Les couleurs des cases indiquent la guitare dont il est question : bleu turquoise pour G3 (E), jaune pour G4 (P), vert pour G5 (E), rose pour G6 (P), et aucune couleur lorsque le sujet s'exprime sur toutes les guitares de l'étude, ou tient un propos plus général. Un code typographique est utilisé pour les indices linguistiques : majuscules pour le méta-discours, couleur grise pour les reformulations, caractères gras pour des appositions, soulignement pour les oppositions. La colonne « objet décrit » indique l'objet dont le guitariste parle : la présence d'un point d'interrogation signifie que l'objet décrit est déduit du contexte duquel est extraite la citation. 54

3.4 Phrases exprimant un jugement sur une ou plusieurs des guitares du test à l'aide d'un mot de la catégorie sémantique PRÉCISION. Les croix indiquent si la phrase est affirmative ou négative, si le mot est positif ou négatif, et si l'évaluation est finalement positive ou négative. Les phrases sont classées selon les guitares auxquelles elles se rapportent. Le total des évaluations positives et négatives pour chaque guitare est indiqué. 57

4.1 Stress S and rate of well designed quadruples R_q for the three tree representations. 68

4.2 English translation. Identified semantic proximities and corresponding labels/meta-criteria (capital letters). Within a category, positive words (normal font) are opposed to negative words (bold font). For each category, the depicted object is given. 71

4.3 French words. Identified semantic proximities and corresponding labels/meta-criteria (capital letters). Within a category, positive words (normal font) are opposed to negative words (bold font). For each category, the depicted object is given. 72

4.4 For each semantic category and each guitar, absolute number of positive and negative evaluations (percentages indicate the same quantities relatively to the total amount of evaluation of each guitar). Black corresponds to ebony-fingerboard guitars (G3 and G5) and gray corresponds to rosewood-fingerboard guitars (G4 and G6). 76

5.1 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie AGRESSIF, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 83

5.2 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie ATTAQUE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 83

5.3 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie BAS, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 84

5.4 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie BRILLANCE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 85

5.5 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie ÉQUILIBRE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 86

5.6 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie MÉDIUM, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 86

5.7 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie PRÉCISION, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 87

5.8 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie SUSTAIN, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 90

5.9 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie AGRÉABLE, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 90

5.10 Nombre d'occurrences des mots classés dans la catégorie AUTRES, pour chaque sujet, et pour le total des sujets. Les mots sont classés par nombre d'occurrences décroissant, puis par ordre alphabétique. 92

6.1 Measured and theoretical data for the G3 string. Measured data: d, diameter; L, open string length; ρ_L, mass per unit length. Computed data: $I = \pi d^4/64$, second moment of area; $c = \sqrt{T/\rho_L}$ velocity of transverse waves; T, tension. Theoretical data: E, Young's modulus of steel; G, shear modulus of steel. 108

6.2 Data computed from the G3 string characteristics. f_0, f_0^{tors} and f_0^{comp} are the fundamental frequencies for respectively transverse, torsional and longitudinal vibration. 109

9.1 Description and pictures of the production stages being monitored. 146

9.2 Stages 1 to 3 (necks) and 4 (bodies): comparison of the modal frequency ratios obtained by finite-element simulation and experiment. For each mode, a modal frequency ratio is defined as the ratio of the modal frequency and the lowest modal frequency. The relative error between the experimental $\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$ and the numerical $f_{num}/f_{num,1}$ frequency ratios is also given. 153

9.3 Stages 5 and 6 (whole guitars): comparison of the modal frequency ratios obtained by finite-element simulation and experiment. For each mode, a modal frequency ratio is defined as the ratio of the modal frequency and the lowest modal frequency. The relative error between the experimental $\bar{f}_{exp}/\bar{f}_{exp,1}$ and the theoretical $f_{num}/f_{num,1}$ frequency ratios is also given. 154

9.4 For stage transitions S1 to S2, S2 to S3, and S5 to S6, comparison of experimentally-identified ratios of mean modal frequencies $\bar{f}_{exp}$ and theoretical f_{theo} modal frequency ratios for all identified modes. Experimentally-identified ratio is computed from the mean value among the measured objects at each stage. The relative error between the experimental and theoretical ratios is indicated. 155

9.5 Material properties of mahogany (used for the body and the neck) and ebony (used for the fingerboard). Superscript *ma* (resp. *eb*) refers to mahogany (resp. ebony). Densities are measured on sample woods, all other properties are taken from the literature [Guitard 1987] for all mechanical constants except E_L for ebony that is taken from [CIRAD 2014]. 163

9.6 Data and computed values, used for the models of section 9.3. Widths w and heights h are estimated from the drawings of the guitars. Mean masses $\bar{m}$ are the mean of measured masses. Cross-sectional areas S, second moment of area I, polar moment of area I_{tors}, and torsional constants are computed from the dimensions w and h. Equivalent mechanical parameters for S3 are computed with the values of table 9.5. Bending (resp. torsional) frequency proportionality factors are the quantities to which the bending (resp. torsional) beam frequencies are proportional (see equations 9.4 and 9.5). 165

9.7 Identified modal frequencies f and damping ratios ξ for 3 modes of 1 guitar in 2 cases : with strings attached at playing tension ("strung guitar") and without strings ("unstrung guitar"). The uncertainty is given with a 95% confidence interval. 166

10.1 Results of the preliminary modal analysis carried out on one *Type-1* guitar: mode shape and associated modal frequency and damping. 175

10.2 Results of the preliminary modal analysis carried out on one *Type-2* guitar: mode shape and associated modal frequency and damping. 176

10.3 Variation ranges of modal frequencies Δ_f and damping ratios Δ_ξ, for each mode and each guitar set/subset. Δ_f and Δ_ξ are given as percentages of the mean values μ_f and μ_ξ of the corresponding guitar set. 183

A.1 Principales caractéristiques organologiques des guitares copies de *Les Paul Junior* construites à l'Itemm. Les caractéristiques entre parenthèses indiquent l'alternative choisie dans le cas où l'élément de lutherie est variant pour les besoins de l'étude. 215

B.1 Pour chaque style musical, nombre de sujets l'ayant pour style musical principal. 220

H.1 Modes identifiés sur chacune des six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les guitares G1, G3 et G5 sont à touche en ébène (E), les guitares G2, G4 et G6 sont à touche en palissandre (P). Le lecteur notera que la guitare nommée « E » (respectivement « R ») au chapitre 7 correspond à G5 (respectivement G6) ici. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque matériau de touche. Dans le cas de deux modes à déformées identiques ou proches (modes 11 et 11 bis, 12 et 12 bis), les moyennes sont calculées sur les deux modes. 252

H.2 Guitares cordées et équipées. Modes identifiés sur chacune des neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les guitares G1, G2 et G3 sont à manche vissé, les guitares G4, G5 et G6 sont à manche collé, et les guitares G7, G8 et G9 sont à manche traversant. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque type de jonction manche–corps : V pour manche vissé, C pour manche collé, T pour manche traversant. Dans le cas de deux modes à déformées identiques (modes 4 et 4 bis, 8 et 8 bis, 9 et 9 bis), les moyennes sont calculées sur les deux modes. 253

H.3 Guitares non-cordées et non-équipées. Modes identifiés sur chacune des neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les guitares G1, G2 et G3 sont à manche vissé, les guitares G4, G5 et G6 sont à manche collé, et les guitares G7, G8 et G9 sont à manche traversant. Les colonnes grisées donnent les moyennes en fréquence et en amortissement pour chaque type de jonction manche/corps : V pour manche vissé, C pour manche collé, T pour manche traversant. On fait remarquer que certains modes (par exemple le mode 5 du tableau H.2) ne sont pas identifiés. 254

Table des figures

1.1 L'environnement de la guitare électrique dans son cadre habituel d'utilisation : le jeu musical. Ce schéma est inspiré de [Lähdeoja *et al.* 2010; Paté *et al.* 2012a]. L'objet « guitare » est vu comme un élément d'un réseau comprenant l'instrumentiste, les traitements électroniques appliqués au son et le système de restitution. 3

1.2 Schéma de principe du *pickup* électromagnétique. Des plots aimantés génèrent un champ magnétique permanent. Ce champ est perturbé par le mouvement des cordes de la guitare (une seule est représentée pour des raisons de clarté) : la variation de flux au travers de la bobine induit un courant au sein de celle-ci. Ce courant est le signal de sortie du *pickup*. . 6

1.3 Photographie d'un exemplaire de la série *Plus* du modèle *Stratocaster* de la marque *Fender*. 8

1.4 Photographie d'un exemplaire de la série *Custom* du modèle *Les Paul* de la marque *Gibson*. 8

1.5 Exemples de modèles de guitare électrique *solid body*. Le nom du fabricant et du modèle est inscrit sous chaque photographie. Toutes les photographies sont sous licence *Creative Commons 2.0* et leur adresse est renseignée en note de bas de page numéro 9. 9

1.6 Schéma d'une guitare électrique *solid body* (géométrie et équipement inspirés de la *Les Paul Junior* de *Gibson*) et dénomination de ses principaux composants (ligne du haut : dénomination en langue française, ligne du bas : dénomination en langue anglaise). Cette guitare n'ayant qu'un seul *pickup*, elle ne possède pas de sélecteur de *pickups*. Cet objet permet, le cas échéant, de choisir à tout moment quel *pickup* est relié à la sortie *jack* de la guitare. 14

1.7 Schéma décrivant le modèle mécanique de la guitare électrique. Les deux extrémités de la corde (en gris) sont mobiles et représentées par des mobilités mécaniques tridimensionnelles. L'une de ces mobilités modélise le comportement vibratoire du manche au point d'attachement de la corde ($\underline{\underline{Y}}_{manche}$), et l'autre le comportement vibratoire du corps à l'autre point d'attachement de la corde ($\underline{\underline{Y}}_{corps}$). Les flèches marron représentent les mouvements potentiels de la corde. Le *pickup* est représenté en traits pointillés. 16

3.1 Un guitariste participant à la première étude perceptive de 2011 portant sur la jonction entre le manche et le corps. 45

4.1 Listening test: sketch of the recording and listening phases. An output of the DI unit is used for the recording of the output of the pickup, the other is connected to the pedal and amplifier for audio feedback. During the listening phase, the recorded signals are sent to the pedal and amplifier. 64

4.2 Musical and tablature notation of the 1st excerpt. Tempo is 108 BPM. Amplifier settings – volume 7, treble 7, bass 7, middle 7, master 5, reverb 2. The overdrive pedal is switched off. This corresponds to a "clean" sound. 65

4.3 Musical and tablature notation of the 2nd excerpt. Tempo is 120 BPM. Amplifier settings – volume 7, treble 6, bass 8, middle 6, master 2, reverb 2. Overdrive pedal settings – volume 3/4, drive 1/2, tone 1/2. This corresponds to a "distorted" sound. 65

4.4 Musical and tablature notation of the 3rd excerpt. Tempo is 164 BPM. Amplifier setting – volume 7, treble 7, bass 7, middle 7, master 2, reverb 2. Overdrive pedal settings – volume 3/4, drive 1/4, tone 1/2. This corresponds to a "crunch" sound. 65

4.5 A guitarist sitting in playing condition during the playing phase of the test. Note that light has been turned on for photograph quality purpose. 67

4.6 Additive tree representation for the stimuli of excerpt 1. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch. 73

4.7 Additive tree representation for the stimuli of excerpt 2. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch. 73

4.8 Additive tree representation for the stimuli of excerpt 3. Black (resp. grey) is used for the nodes corresponding to ebony- (resp. rosewood-) fingerboard guitars. Dashed ellipses denote the categories that are analysed. Dashed arrows assign the proper or shared attributes for each category. Note that leaves having the same name represent the replicas (identical copies of recordings). Numbers denote the length of the branches normalised to the length of the longest branch. 74

5.1 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *agréable / désagréable*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *agréable / désagréable*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 88

5.2 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *agressif*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *agressif*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 88

5.3 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *brillant*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *brillant*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 88

5.4 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *claquer / claquant*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *claquer / claquant*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 89

5.5 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *résonner / résonance*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *résonner / résonance*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 89

5.6 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités du terme *précis / précision*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *précis / précision*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 89

5.7 Mots associés, d'après les musiciens, aux différentes intensités de *sustain*. Les locutions grisées sont les différentes nuances du mot *sustain*, et les locutions non grisées leur sont associées. Les bornes de l'échelle sont qualitatives et indicatives, et sont surlignées en jaune. 91

5.8 Mot associés aux trois nuances de MÉDIUM. 91

5.9 Une partie de l'entrepôt du fabricant *Godin* où sont stockés en atmosphère régulée en température et hygrométrie les bois pour les touches de guitares électriques et acoustiques. 102

5.10 Usine du fabricant *Godin* : manches bruts avec pré-découpe de la tête (à recoller ultérieurement) et rainure pour l'insertion de la *truss-rod*. 102

5.11 Usine du fabricant *Godin* : un petit lot de manches (modèle *xtSA*) de guitare électrique avant leur fixation (par quatre vis) à des corps. 102

5.12 Usine du fabricant *Godin* : machines utilisées pour le collage de la tête et du talon au manche. 102

5.13 Usine du fabricant *Godin* : machines utilisées pour le collage de la tête au manche. 103

5.14 Usine du fabricant *Godin* : une des étapes semi-manuelles de la construction d'une guitare électrique : les frettes sont polies pour uniformiser leur hauteur. 103

6.1 Overview of the mechanical interactions between the string and the structure of an electric guitar. The string is stretched between the bridge and the peg. Energy flows from the string to the structure at several places: bridge, fret, finger, nut, peg. Transverse string vibration along y- and z- axes, as well as longitudinal waves along x-axis and torsional waves around x-axis can occur (dashed lines with arrows). 107

6.2 Cumulative energy between 0 Hz and the current frequency, computed on a recording of all the notes of the guitar played in a row. Dashed-dotted line indicates the frequency 2.5 kHz, above which less than 5 % of the total energy remains. 108

6.3 Scheme of the fully-simplified coupled system standing for the solid body electric guitar: a string moving in two orthogonal polarizations connected to a 2D-mobility Y. 110

6.4 Sketch of the measurement setup for the isolated string. The string is stretched between two heavy supports at playing tension and length. Two optical sensors measure each transverse (y and z) polarization. The string is excited with the wire-breaking method. Clamps firmly attach the string's heavy supports as well as the optical sensors' supports to a heavy I-beam filled with sand, and are not drawn here for clarity reason. 112

6.5 Isolated G3 string: identified Q factors for every vibrating length (corresponding to every bridge-to-fret distance) and every partial below 1000 Hz. For each vibrating length, eight measurements are carried out. For both frequency and Q factor, crosses (resp. diamond, square, upward triangle and downward triangle) indicate the mean value, and circles indicate the expanded uncertainty (95% confidence interval) for the 1st (resp. 2nd, 3rd, 4th and 5th partial). Gray line indicates the results of the isolated lossy string model of Eq. (6.12). 113

6.6 Identified Q factors for the fundamental frequency of the unmounted string, with or without pickup at its vicinity. Two typical distances between the string and the magnetic pole piece are studied. Pickup can be either in open-circuit or plugged into the amplifier. Crosses indicate the mean value and circles indicate the expanded uncertainty (95% confidence interval) of 15 measurements. (a) polarization parallel to the pole piece (z), (b) polarization normal to the pole piece (y). 114

6.7 Out-of-plane (ZZ), in-plane (YY) and cross (ZY) conductance along the G3 string's axis: at every fret and at the bridge. For each fret, circle and squares denote the string's fundamental frequency and partials respectively, for the considered bandwidth. A modal analysis allows us to identify the modes for each out-of-plane conductance peak, above which the corresponding mode shapes are drawn. 115
6.8 Measured conductance at 9th fret (a) and 12th fret (b) along G3 string's axis. Solid line indicates out-of-plane conductance. Dashed line indicates in-plane condutance. The transverse gray line shows the fundamental frequency of the note produced on the G3 string at the corresponding fret. For this frequency, conductance values are given in $m.s^{-1}.N^{-1}$. 117
6.9 Identified Q factor for the fundamental frequency of the note played at 9th fret (a) and 12th fret (b) of the G3 string. Both polarizations' results for the mounted string are compared to the isolated string. Circles and crosses indicate mean values and expanded uncertainty (95% confidence interval) respectively of 15 measurements. The arrows point out the Q value computed by the model of equation 6.20 with the isolated-string Q factors and the conductance values. 117
6.10 String excited by the wire-breaking method, isolated from the guitar, at the vicinity of a pickup. The pickup is set so that the pole pieces are parallel to the z- axis. For in-plane (y, left column) and out-of-plane (z, right column) excitation, corresponding waveshapes of in-plane (y, upper row) and out-of-plane (z, lower row) string polarization recorded by the optical sensors as well as the output of the pickup (lower row) are plotted. String velocity waveshapes are normalized to the maximum value of the excitation polarization. 119
6.11 Identified Q values associated with the fundamental frequency of both string polarizations. The analyzed signal is the output of the pickup, for each note played on the G3 string mounted on the guitar. Solid line is for the out-of-plane (z) polarization and dashed line for the in-plane (y) polarization. For each fret, circles' radii indicate the amplitude of the polarizations, normalized to the amplitude of the z- polarization. 120
6.12 T30 for each fret of the G3 string. Gray circles indicate T30 values computed from the synthesized signal. Black crosses indicate T30 values computed directly from the output signal of the pickup. 121

7.1 Setup for driving-point conductance measurement along the 5th string's axis, at a particular fret. An accelerometer is put on the one side of the fret. The hammer strikes at the other side of the fret. A very light piece of wood moves aside the strings and allows the accelerometer to stay between the two strings. 127
7.2 Driving-point conductance at the 6th fret along the 2nd string's axis. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R. Gray line highlights the fundamental frequency of the F4 played at this place. 128
7.3 Temporal evolution of the fundamental frequency of the F4 (6th fret and 2nd string) played on both guitars. Solid line is for guitar E, dashed line is for guitar R, crosses show the computed decay of the same string with rigid ends. 129
7.4 Guitar E: driving-point conductance values in the frequency range [20Hz–1000Hz] for all frets along the 2nd string. White crosses spot the fundamental frequencies of the notes played at each fret of the 2nd string. Unit of conductance is $m.s^{-1}.N^{-1}$. 130
7.5 Rosewood-fingerboard guitar: driving-point conductance values in the frequency range [20Hz–1000Hz] for all frets along the 2nd string. White crosses spot the fundamental frequencies of the notes played at each fret of the 2nd string. Unit of conductance is $m.s^{-1}.N^{-1}$. 131

7.6 Driving-point conductance at the 1st fret along the 4th string's axis. Solid line is used for the guitar E and dashed line for guitar R. Gray line highlights the fundamental frequency of the D#3 played at this place. 132

7.7 Mean value of conductance in the frequency range [20Hz–2000Hz] as a function of fret number/measurement place along the 2nd string. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R. 133

7.8 Computed time constants τ for each note of the 2nd string. A bandpass filter ([20Hz-2000Hz]) was applied to each note. Solid line is used for the guitar E and dashed line for the guitar R. 133

8.1 Maillage expérimental utilisé pour l'analyse modale sur les guitares construites à l'Itemm. A chaque point est associé un numéro pour les commodités de l'analyse. Les lignes représentant les points sont arbitraires mais facilitent la lecture des déformées modales. 136

8.2 Fréquences modales identifiées sur les six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les croix noires sont utilisées pour les guitares à touche en ébène. Les croix grises sont utilisées pour les guitares à touche en palissandre. Pour chacune des catégories de guitare (touche en ébène ou touche en palissandre), la moyenne des fréquences est indiquée par une croix rouge placée du côté correspondant (à gauche pour les guitares à touche en ébène, à droite pour les guitares à touche en palissandre). Des croix manquantes indiquent des modes non identifiés. 136

8.3 Amortissements modaux identifiés sur les six guitares de l'étude portant sur le matériau de touche. Les croix noires sont utilisées pour les guitares à touche en ébène. Les croix grises sont utilisées pour les guitares à touche en palissandre. Pour chacune des catégories de guitare (touche en ébène ou touche en palissandre), la moyenne des amortissements est indiquée par une croix rouge placée du côté correspondant (à gauche pour les guitares à touche en ébène, à droite pour les guitares à touche en palissandre). Des croix manquantes indiquent des modes non identifiés. 137

8.4 Huit des neuf guitares de l'étude concernant le type de jonction du manche au corps. . . . 138

8.5 Fréquences modales identifiées sur les neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les cercles, "x"et "+" indiquent les guitares à manche vissé, collé et traversant respectivement. La couleur noire est utilisée pour indiquer les fréquences modales identifiées avant l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("av." pour "avant"). La couleur grise est utilisée pour indiquer les fréquences modales identifiées après l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("ap." pour "après"). Pour chacun des types de jonction corps–manche, la moyenne des fréquences est indiquée par un marqueur rouge. Des marqueurs manquants indiquent des modes non identifiés. . 139

8.6 Amortissements modaux identifiés sur les neuf guitares de l'étude portant sur la jonction du manche au corps. Les cercles, "x" et "+" indiquent les guitares à manche vissé, collé et traversant respectivement. La couleur noire est utilisée pour indiquer les amortissements modaux identifiés avant l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("av." pour "avant"). La couleur grise est utilisée pour indiquer les amortissements modaux identifiés après l'équipement des guitares avec l'accastillage et l'électronique ("ap." pour "après"). Pour chacun des types de jonction corps–manche, la moyenne des amortissements est indiquée par un marqueur rouge. Des marqueurs manquants indiquent des modes non identifiés. 140

9.1 One of the 11 guitars of the study. The crosses indicate the measurement points. Point A is close to the nut, on the 1st string's side. Point B is close to the bridge, on the 1st string's side . . . 145

9.2 a) Model of the S1-neck as a beam of rectangle cross-section. b) Model of the S2-neck as a beam of realistic cross-section. . . . 148

9.3 a) Model of the S2-neck as a beam of rectangular cross-section. b) Model of the S3-equipped neck as a composite beam made of two beams (one for the neck and one for the fingerboard) of rectangular cross-section. The local coordinates corresponding to the neck (resp. fingerboard) are written in black (resp. gray). Standard coordinates for an orthotropic material like wood are used: the subscript l refers to the longitudinal direction (parallel to grain), r to the radial direction (perpendicular to the rings), and t to the tangential direction (tangential to the rings). The common coordinate system is written in red. . . . 149

9.4 Mode tracking during the whole making process: modal frequency versus measurement stage. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean values $\bar{f}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_f/\bar{f}$ is indicated as a percentage of $\bar{f}$. The mode shapes are shown alongside the corresponding markers. Solid red line indicate modes being well tracked between two measurement stages. Red dashed lines indicate supposed relationships between separated parts (necks of S3, and bodies of S4) and whole guitars. . . . 157

9.5 Masses of the measured objects, for each measurement stage. a) Stages involving the neck only. b) Stages involving either the body or the whole guitar. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean values $\bar{m}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each stage, percentages in red present the normalised variability $2\sigma_m/\bar{m}$ as a percentage of the mean mass $\bar{m}$. . . . 159

9.6 Modal damping tracking for the separated necks and bodies. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean value $\bar{\xi}$, red circles indicate the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_\xi/\bar{\xi}$ is indicated as a percentage of $\bar{\xi}$. The mode shapes are shown above the corresponding modes. . . . 160

9.7 Modal damping tracking for the assembled guitars. Various black and gray markers are used for the individual objects. Red crosses indicate the mean value $\bar{\xi}$, red circles indicate the typical variability as the 2 standard deviation-large region centered on the mean values. For each mode, the normalised variability $2\sigma_\xi/\bar{\xi}$ is indicated as a percentage of $\bar{\xi}$. The mode shapes are shown above the corresponding modes. . . . 161

10.1 Mobility measurement on one *Type-2* guitar. a) Magnitude in dB scale normalised to 1 m.s^{-1}.N^{-1}. b) Phase. The thick black dashed lines indicate the frequency bandwidth of the study [20 Hz : 800 Hz]. . . . 171

10.2 Magnitude of the hammer excitation spectrum. The dB scale is normalised to the maximum force value. The thick black dashed lines indicate the frequency bandwidth of the study [20 Hz – 800 Hz]. . . . 172

10.3 Mesh used for the modal analysis of the *Type-1* guitar. The gray arrow indicates the measurement point for the driving-point mobility measurement. . . . 172

10.4 Mesh used for the modal analysis of the *Type-2* guitar. The gray arrow indicates the measurement point for the driving-point mobility measurement. 172

10.5 Sample *Type1* guitar (tendencies are the same for the sample *Type 2* guitar): modal identification with the LSCF method implemented in the software MODAN. (a) modulus, (b) phase. The dashed line curve is the measured accelerance, the solid line curve is the synthesised accelerance. A mode numbering is indicated. The mode 2 is identified separately. The mode near 500 Hz is a mode that does not involve the neck, so it is not numbered. 173

10.6 Superimposition of all mobility curves for the 17 *Type-1* specimens. Individual mobility curves are represented with thin gray lines. The thick black line is the mean mobility. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility. 175

10.7 Superimposition of all mobility curves for the 10 *Type-2 RN* specimens. Individual mobility curves are represented with thin dashed gray lines. The mean mobility of the 10 *Type-2 RN* specimens is plotted with a dashed red line. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility. The thick black line is the mean of the mobility curves of all 24 *Type-2* guitars. For comparison purposes, the mean mobility of the 14 *Type-2 MN* specimens is plotted with a solid red line. 176

10.8 Superimposition of all mobility curves for the 14 *Type-2 MN* specimens. Individual mobility curves are represented with thin solid gray lines. The mean mobility of the 14 *Type-2 MN* specimens is plotted with a solid red line. The gray area is centered on this mean mobility, and its boundaries are two standard deviation below and above the mean mobility. The thick black line is the mean of the mobility curves of all 24 *Type-2* guitars. For comparison purposes, the mean mobility of the 10 *Type-2 RN* specimens is plotted with a dashed red line. 177

10.9 Bar plot of the masses of the 17 *Type-1* guitars. The black solid line indicates the mean mass μ_m. The black dotted lines indicate the spread around the mean mass as 1 standard deviation below and above the mean mass: $\mu_m \pm \sigma_m$. The 2-standard deviation spread around the mean is indicated as a percentage of the mean mass. 178

10.10 Bar plot of the masses of the 24 *Type-2* guitars. The light (resp. dark) gray bars represent the *RN* (resp. *MN*) specimens. The black, light gray, and dark gray solid lines indicate the mean mass μ_m of all 24 specimens, $\mu_{m,RN}$ of the *RN* specimens, and $\mu_{m,MN}$ of the *MN* specimens respectively. The black, light gray, and dark gray dashed lines indicate the quantity $\mu_m \pm \sigma_m$ of all 24 specimens, $\mu_{m,RN} \pm \sigma_{m,RN}$ of the *RN* specimens, and $\mu_{m,MN} \pm \sigma_{m,MN}$ of the *MN* specimens respectively. The 2-standard deviation spreads around the means are indicated as a percentage of the corresponding mean mass. 179

10.11 Identified modal frequencies for the 17 *Type-1* specimens. For each mode, the black crosses indicate the single modal frequencies. For each mode, the red crosses indicate the mean value μ_f of the 17 modal frequencies. The red circles indicate the spread of the modal frequencies, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_f \pm \sigma_f$. Red numbers indicate the value σ_f/μ_f. 179

10.12 Identified modal frequencies for the 24 specimens *Type-2*. Black crosses indicate the individual modal frequencies. For each modal frequency, the red crosses indicate the mean value μ_f of the 24 identified frequencies, and the red circles indicate the spread of the modal frequencies, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_f \pm \sigma_f$. For each mode, the two black crosses clusters refer to the modal frequencies of the *RN* guitars, and *MN* guitars, from left to right. Associated with each cluster is the corresponding mean value, and spread around the mean value. Red (resp. black) numbers indicate the value σ_f/μ_f (resp. $\sigma_{f,RN}/\mu_{f,RN}$ and $\sigma_{f,MN}/\mu_{f,MN}$). 180

10.13 Identified modal damping ratios for the 17 *Type-1* specimens. For each mode, the black crosses indicate the single modal damping ratios. For each mode, the red crosses indicates the mean value μ_ξ of the 17 modal damping ratios. The red circles indicate the spread of the modal damping ratios around the mean value, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. Red numbers indicate the value σ_ξ/μ_ξ. 181

10.14 Identified modal damping ratios for the 24 *Type-2* specimens. Black crosses indicate the individual modal damping ratios. For each modal damping ratio, the red crosses indicate the mean value μ_ξ of the 24 identified damping ratios, and the red circles indicate the spread of the modal damping ratios, as 1 standard deviation below and above the mean value: $\mu_\xi \pm \sigma_\xi$. For each mode, the two black cross clusters refer to the modal damping ratios of the *RN* guitars, and the *MN* guitars, from left to right. Associated with each cluster is the corresponding mean value, and spread around the mean value. Red (resp. black) numbers indicate the value σ_ξ/μ_ξ (resp. $\sigma_{\xi,RN}/\mu_{\xi,RN}$ and $\sigma_{\xi,MN}/\mu_{\xi,MN}$). 182

A.1 Plan des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm. 212

A.2 Plan des corps des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm. 213

A.3 Plan des manches des guitares copies de *Les Paul Junior* réalisées à l'Itemm. 214

B.1 Fiche d'évaluation globale de chaque guitare pour l'étude de la jonction du manche au corps : échelles libres. 218

B.2 Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares selon une échelle libre. 218

B.3 Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares : sur une échelle de 1 à 10, le guitariste doit indiquer à quel point il aime ce critère sur chacune des guitares. 219

B.4 Fiche d'évaluation d'un critère sur chacune des guitares : sur une échelle de 1 à 10, le guitariste doit indiquer à quel point l'évaluation de ce critère a contribué à l'élaboration de son jugement global sur chacune des guitares. 219

D.1 Partie imaginaire en fonction de la partie réelle d'une déformée modale (identifiée sur une guitare électrique construite à l'Itemm). 234

D.2 Cas d'un couplage fort. Evolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées. 239

D.3 Cas d'un couplage fort. Evolution des amortissements du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées. 239

D.4 Cas d'un couplage faible. Evolution des fréquences du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées. 240

D.5 Cas d'un couplage faible. Evolution des amortissements du système couplé corde–structure en fonction du rapport des fréquences de la corde et de la structure isolées. 240

D.6 Calcul du terme de couplage α témoignant de la force de couplage entre corde et structure en cas de coïncidence fréquentielle. Les valeurs négatives d'α indiquent un couplage faible et les valeurs positives d'α un couplage fort. La ligne pleine en l'abscisse nulle souligne simplement la limite $\alpha = 0$ entre les deux types de couplage. 240

E.1 Phase typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. 242
E.2 Spectre typique de la force d'excitation au marteau d'impact dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. 242
E.3 Module typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. Plage de fréquence [0 Hz–5000 Hz]. 243
E.4 Module typique d'une mesure de mobilité dans le cadre des mesures effectuées sur les guitares électriques construites à l'Itemm. Plage de fréquence [0 Hz–100 Hz]. 243

G.1 Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 21 » 248
G.2 Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 43 » 248
G.3 Conductance moyenne pour toutes les frettes de long de l'intercorde « 65 » 249

Résumé

Le son perçu d'une guitare électrique *solid body* provient principalement du système électroacoustique rayonnant le signal de vibration de la corde. L'essentiel des travaux antérieurs s'est ainsi focalisé sur les amplificateurs, pédales d'effet, *pickups*, etc. Cependant, la vibration des cordes reste à l'origine du son. La modélisation du couplage entre la corde et la structure de la guitare permet de montrer l'influence de cette dernière sur le son de l'instrument. Nous vérifions ce que revendiquent certains luthiers et musiciens : la qualité de la fabrication mécanique de l'instrument joue bien un rôle important dans le son.

La modification des éléments de lutherie permet une modification de la structure, donc du son. Une collaboration avec des luthiers nous a permis d'étudier des éléments de lutherie (matériau de la touche et jonction du manche au corps) d'une manière raisonnée et réaliste. Les études mécaniques des guitares permettent de dégager une caractérisation des éléments de lutherie par l'analyse modale expérimentale. Une analyse psycholinguistique du discours des guitaristes électriques professionnels s'inscrivant dans une démarche de cognition située montre que ceux-ci sont sensibles aux éléments de lutherie.

Luthiers, mécaniciens et musiciens s'accordent cependant à attribuer à des guitares réputées identiques des caractéristiques contrastées. Ainsi la notion d'élément de lutherie est élargie à deux nouveaux objets : l'évolution du comportement vibratoire au cours de la construction, et la variabilité de fabrication en fin de chaîne de production industrielle. En effet, l'histoire de la guitare électrique *solid body* contraste avec celle de la plupart des autres instruments de musique : sa conception est originellement pensée pour une production de masse. L'analyse vibro-acoustique et l'appréciation de l'instrument par les musiciens doivent en tenir compte.

Ce travail de recherche donne les éléments permettant le développement d'outils profitables à la fois à l'industriel pour le contrôle de la qualité de fabrication, à l'artisan-luthier pour le lien entre lutherie et perception via une interprétation mécanique afin de proposer une production innovante, et au musicien dans sa recherche de l'instrument correspondant à son esthétique musicale.

Abstract

The perceived sound of the solid body electric guitar comes mostly from the electro-acoustic system radiating the string vibration signal. Most of the previous studies have therefore been focusing on the amplifiers, effect pedals, pickups, etc. However, the string remains the origin of the sound. A model of the coupling between the string and the structure of the guitar shows that the structure has an influence on the sound. We check here what some luthiers and musicians affirm: the quality of the lutherie really matters for the sound.

Modifications of the lutherie parameters alter the structure, hence the sound. A collaboration with luthiers allowed us to study some lutherie parameters (fingerboard wood, and junction between neck and body) in a reasonable and realistic way. A mechanical characterisation of the lutherie parameters is possible through experimental modal analysis. On the perception side, a situated cognitive approach is used together with a psycholinguistical analysis of the professional electric guitar players' verbalisations. It is shown that the players are sensitive to the lutherie parameters.

Luthiers, physicists and musicians agree when stating that supposed identical guitars can nevertheless have different features. So the concept of lutherie parameter is extended to two new objects: the evolution of the vibratory behaviour of the guitars during the production process, and the variability at the end of the industrial production chain. As a matter of fact, the history of the solid body electric guitar contrasts with that of most of the other musical instruments. The solid body electric guitar was originally thought to be mass-produced. The vibro-acoustic analysis, and the musicians' judgements may take it into account.

A possible continuation of this research work is the development of tools for the manufacturer wishing to control the quality of his production, for the craftsman wishing to make a link between lutherie and perception with the aim of proposing an innovative production, and for the musician wishing to find an instrument that corresponds to his musical expectations.