

MÉMOIRE DE STAGE DE MASTER 2 SCIENCES ET  
TECHNOLOGIE

MENTION SDI, SPÉCIALITÉ ACOUSTIQUE, PARCOURS ATIAM



Etude vibroacoustique et perceptive de guitares électriques

Arthur Paté

28 février 2011 — 29 juillet 2011

Encadrement : Jean-Loïc Le Carrou (MCF UPMC), Danièle Dubois(DR CNRS), Benoît Navarret  
(Doctorant Paris 8)



Institut Jean Le Rond d'Alembert, UMR CNRS 7190  
Equipe Lutheries Acoustique Musique  
11, rue de Lourmel  
75015 Paris



*Sinon, poncer le dos du manche va un petit peu améliorer le son, il va mieux 'respirer'.  
Par contre, le vernis de la touche érable participe au claquant et au sustain.*

Utilisateur « Orni », forum [www.guitariste.com](http://www.guitariste.com)<sup>1</sup>

---

1. <http://www.guitariste.com/forums/accessoires-et-lutherie/poncer-le-manche-de-ma-tele-ri52,307685.html>

## Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes encadrants : Jean-Loïc Le Carrou pour sa rigueur scientifique ainsi que pour son dynamisme dans le cadre de ce projet prometteur sur la guitare électrique, Danièle Dubois pour avoir apporté une autre dimension à ce travail, et Benoît Navarret, tant pour ses qualités musicales qu'humaines.

Je remercie également toute l'équipe du LAM, en particulier Thibaut Meurisse pour son humour à toute épreuve, les doctorants du bureau 20, Catherine Fourcin, Pascal Le Saëc pour le baptême de mon ordinateur, Jean-Marc Fontaine pour les ouvertures ponctuelles du laboratoire, Hugues Genevois pour son accueil et les discussions guitaristiques toujours fructueuses, ainsi que Laurent Quartier pour son aide en général.

Rien n'aurait été possible sans le travail admirable des apprentis luthiers de la classe de BMA (Brevet des Métiers d'Art) de l'ITEMM (Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique) : Benjamin Amosse, Valentin Bringuier, Etienne Emery, Alan Jan, Hugo Lanches, Félix Lienhard, Jean-Baptiste Lorin, François Saint Martin, et Julien Sanson, leurs encadrants Yann-David Esmans, Fred Pons et Pierre Terrien, ainsi que l'équipe du pôle national d'innovation de l'ITEMM, notamment Marthe Curtit et Vincent Doutaut.

Un dernier mais non moindre merci aux guitaristes qui ont bien voulu se prêter au jeu du test perceptif, dans l'ordre alphabétique : 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, Claude Pavy, Stéphane Rambaud, Jean-Claude Rapin, et Jean-Do Sallaberry.



## Avant-propos

J'ai fait la connaissance du LAM assez tôt dans mon cursus, et le dialogue entre le musicien et le scientifique qu'il propose m'a toujours attiré, car c'est là, me semble-t-il, l'approche la plus raisonnable et pertinente si on veut réellement parvenir à comprendre la musique et son vecteur, le musicien, dans un cadre scientifique. Pratiquant les guitares classique et électrique depuis maintenant de nombreuses années, je n'ai pu résister à l'occasion qui s'est présentée de pouvoir travailler dans le cadre de mon stage de Master 2 ATIAM sur mon instrument, et de pouvoir le questionner et l'ausculter comme je n'en ai jamais eu l'occasion.

Le mémoire sera organisé comme suit : je commencerai par présenter le contexte et les objectifs du stage. Le compte-rendu de l'étude se poursuivra en traitant successivement de la partie mécanique et vibratoire, puis de la partie linguistique et perceptive. Une confrontation des deux approches sera ensuite effectuée. Enfin, une conclusion du travail sera donnée, ainsi qu'une ouverture vers les travaux futurs.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte et objectifs</b>	<b>8</b>
1.1	Le LAM . . . . .	8
1.2	Contexte . . . . .	8
1.3	Objectifs . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Etude vibro-acoustique</b>	<b>11</b>
2.1	Etat de l'art . . . . .	11
2.2	Partie expérimentale . . . . .	11
2.3	Etude modale . . . . .	13
2.3.1	Guitares non cordées et non équipées . . . . .	13
2.3.2	Guitares cordées et équipées . . . . .	15
2.4	Différences entre guitares équipées et non équipées . . . . .	19
2.5	Etude des conductances colocalisées . . . . .	21
2.5.1	Théorie . . . . .	21
2.5.2	Conductances colocalisées au chevalet . . . . .	22
2.5.3	Conductances colocalisées sur le manche (frettes, sillet) . . . . .	24
2.6	Lien entre conductance colocalisée et longueur de son . . . . .	25
2.6.1	Enregistrements audio . . . . .	25
2.6.2	Analyse . . . . .	26
2.7	Conclusion sur l'étude vibratoire . . . . .	27
<b>3</b>	<b>Jugements des musiciens</b>	<b>28</b>
3.1	Protocole expérimental de l'évaluation subjective . . . . .	28
3.2	Analyse linguistique des productions verbales . . . . .	29
3.3	Fiches d'évaluation . . . . .	29
3.3.1	Analyses lexicales produites dans les différentes fiches . . . . .	30
3.3.2	Jugements sur échelles . . . . .	34
3.3.3	Conclusion sur les jugements des musiciens . . . . .	40
<b>4</b>	<b>Etude comparative vibro-acoustique et perceptive</b>	<b>41</b>
4.1	Centre de gravité spectrale . . . . .	41
4.2	Longueur de son . . . . .	41
4.3	Temps d'attaque . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Conclusion et perspectives</b>	<b>44</b>
<b>A</b>	<b>Cotes et poids des neuf guitares</b>	<b>45</b>
<b>B</b>	<b>Schéma des guitares à manches vissé et collé, montées</b>	<b>46</b>
<b>C</b>	<b>Définition des orientations et numérotations</b>	<b>47</b>
<b>D</b>	<b>Modan© et l'analyse modale expérimentale</b>	<b>48</b>
<b>E</b>	<b>Analyse modale pour les neuf guitares non équipées</b>	<b>51</b>
E.1	Déformées — Guitares non équipées . . . . .	51
E.2	Fréquences et amortissements — Guitares non équipées . . . . .	53
<b>F</b>	<b>Analyse modale pour les neuf guitares équipées</b>	<b>55</b>
F.1	Déformées — Guitares équipées . . . . .	55
F.2	Fréquences et amortissements — Guitares équipées . . . . .	57

<b>G</b>	<b>Pourquoi privilégier la conductance « hors-plan » ?</b>	<b>59</b>
<b>H</b>	<b>Quand peut-on considérer une mesure d'admittance comme « colocalisée » ?</b>	<b>61</b>
<b>I</b>	<b>Tracés des « T30 » pour toutes les cordes</b>	<b>64</b>
<b>J</b>	<b>Fragments chromatiques à jouer par les musiciens</b>	<b>66</b>
<b>K</b>	<b>Fiches d'évaluation à la fin des tests perceptifs</b>	<b>67</b>

# 1 Contexte et objectifs

## 1.1 Le LAM

Ma structure d'accueil, le « Laboratoire d'Acoustique Musicale », a été créé en 1963 au sein de la Faculté des Sciences de Paris. Devenu l'équipe « Lutheries Acoustique Musique » avec son rattachement à l'Institut Jean Le Rond d'Alembert (UMR CNRS 7190) en 2007, le laboratoire dépend à la fois de l'université Pierre et Marie Curie (UPMC), du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) et du ministère de la Culture et de la Communication.

Les travaux de recherche menés par l'équipe LAM s'articulent autour de trois thématiques. La première, historiquement la plus ancienne, concerne l'étude du fonctionnement des instruments de musique et de la voix. La deuxième thématique traite de la perception et de la cognition musicale : on s'intéresse au son et à la musique tels qu'ils sont perçus par l'humain. Les disciplines associées sont par exemple la psychoacoustique, la linguistique ou la psycholinguistique. Enfin le troisième axe de recherche concerne les techniques audio, le stockage et la restitution des phénomènes sonores, la conservation des supports et le traitement du signal audio.

De plus, les projets menés dans ce laboratoire ont en commun une approche originale de pluridisciplinarité (voir figure 1), ainsi ils — à l'instar de ce projet sur la guitare électrique — abordent les problématiques selon deux points de vue, celui des sciences de l'ingénieur (mécanique, traitement du signal ...) et celui des sciences humaines (linguistique, psychologie ...).

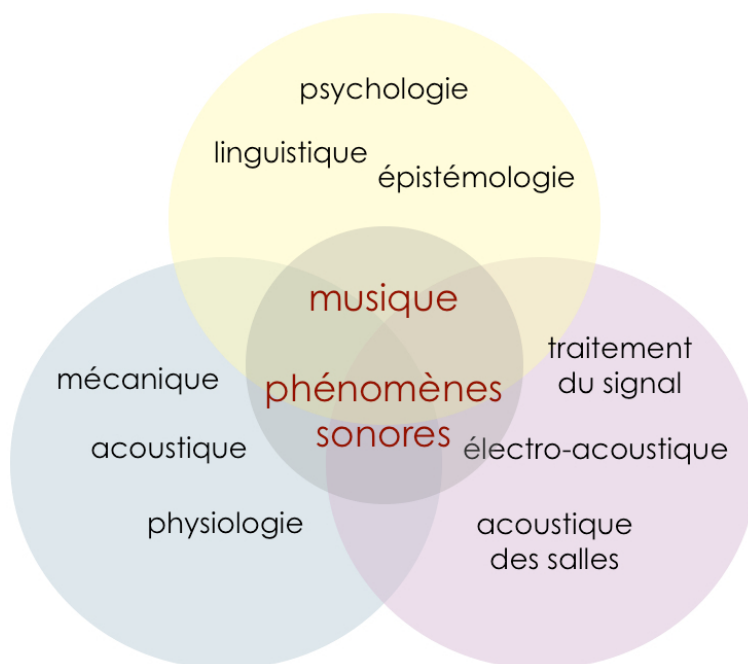


FIGURE 1 – Thématiques de recherche du « LAM »

## 1.2 Contexte

Du point de vue de l'acoustique musicale, la guitare électrique *solid body* (figure 2) a ceci de particulier que le son qu'elle produit est dû en majeure partie aux éléments électroniques qu'elle comporte (et au *pickup*<sup>2</sup> en particulier). La majorité des études acoustiques portant sur la guitare électrique s'est concentrée sur l'électronique intégrée à la *solid body* et sur la caractérisation des *pickups* [Que66] [Lot08] [LL08].

2. On préférera le terme *pickup* à celui plus courant en français de « microphone », pour insister sur le fait que les transducteurs des guitares électriques sont électromagnétiques et non acoustiques.

On peut cependant se demander jusqu'à quel point les différents éléments de lutherie ont une influence sur le son. Certaines (rares) études ([FZ98] [Fle05] [FZ99]) ont montré que le comportement vibratoire de la guitare électrique *solid body* joue un rôle prédominant dans l'apparition de *dead-spots*, qui sont une atténuation rapide de certaines notes situées à certains endroits du manche, atténuation souvent décrite par les guitaristes comme une « perte de *sustain* ». De plus, [Nav06] [Nav10] montrent entre autres que l'appréciation du *sustain* est le critère sur lequel une grande majorité des guitaristes électriques semble s'accorder pour juger de la qualité d'une guitare *solid body*. En effet, pour qu'une guitare soit bien jugée d'après le critère du *sustain*, l'atténuation des notes doit être la plus faible possible.



FIGURE 2 – Guitare électrique *solid body*, modèle *Les Paul Junior*<sup>TM</sup>

Le but des études menées pendant ce stage est de faire un lien entre les effets perçus par les musiciens, les éléments de lutherie, et le comportement dynamique des guitares. A l'instar de [Nav06], des guitares ont été réalisées spécialement pour l'étude par des apprentis luthiers de l'ITEMM<sup>3</sup>, dans le cadre d'un projet pédagogique s'intégrant dans leur formation (deuxième année de Brevet des Métiers d'Art). Le lot de guitares (voir annexes A et B) qui fait l'objet de la présente étude comporte neuf guitares quasi-identiques (elles sont dérivées du modèle *Les Paul Junior*<sup>TM</sup> de la marque *Gibson*<sup>TM</sup>, voir figure 2), dont la seule différence porte sur un des éléments de lutherie, en l'occurrence le mode de jonction entre le manche et le corps.

Il existe trois façons de joindre le manche au corps de la guitare (chaque façon aura donc trois représentants dans notre corpus guitaristique) : en le vissant, en le collant, ou en réalisant un manche en une seule pièce de bois qui se prolonge dans le corps (à la pièce de bois prolongeant le manche sont ajoutées deux ailes sur les côtés, afin de compléter le corps) ; cette dernière méthode portant le nom de « manche traversant ». Les manches « traversants » (ou « conducteurs », ou encore « *neck-through* »), rarement utilisés et peu présents sur le marché de la guitare électrique, sont connus pour offrir le meilleur *sustain*, suivis par les manches collés. Les manches vissés sont ceux qui présenteraient le moins bon *sustain*<sup>4</sup>. Sur les lieux communs (expression à prendre au sens strict, sans aucune connotation dépréciative) du milieu guitaristique, on se reportera par exemple à [Wik11] ou à tout forum internet ayant pour sujet la guitare électrique.

Notre lot de guitares comporte trois guitares à manche vissé (famille 1), trois à manche collé (famille 2) et trois à manche traversant (famille 3). Signalons que dans le but d'obtenir les neuf guitares les plus identiques possibles du point de vue de la lutherie (à part évidemment le mode de jonction entre le corps et le manche), même les corps de nos guitares à manches collé et vissé sont composés de trois parties : une pièce centrale comme la poutre prolongeant le manche des guitares à manche traversant et deux ailes sur les côtés.

3. Institut Technologique Européen des Métiers de la Musique, établi au Mans

4. Notons cependant qu'une étude ([Mot07]) arrive à une classification exactement inversée en se fondant sur le critère du *sustain* : la configuration « manche vissé » a le meilleur *sustain* et la configuration « manche traversant » le moins bon. Cependant, cette étude a porté sur des guitares simplifiées à l'extrême du point de vue de la lutherie, ces guitares n'étaient pas destinées à être jouées, elles ne comportaient par exemple que deux cordes. De plus, le manche, au départ traversant, a été scié pour être ensuite collé pour la deuxième phase de l'expérience, puis re-scié pour être vissé pour la dernière phase de l'expérience . . .

### 1.3 Objectifs

On va donc entreprendre une étude vibratoire de chacune des guitares (d'abord sur les neuf guitares, puis sur les quatre guitares préselectionnées pour les tests perceptifs), afin de savoir si on peut caractériser objectivement au sens de la mécanique cette différence de lutherie (section 2), puis procéder à une étude perceptive (sur les trois guitares finalement sélectionnées) auprès d'une population de guitaristes professionnels, pour tenter une caractérisation issue d'une approche « sciences humaines » (section 3). Ces deux approches seront ensuite mises en regard (section 4).

## 2 Etude vibro-acoustique

### 2.1 Etat de l'art

Dans le cas d'une guitare classique (instrument étudié en détail depuis de nombreuses années, par exemple par [Wri96]), il faut que la corde transfère son énergie à la table d'harmonie, pour que celle-ci puisse rayonner et qu'un son puisse être perçu. Pour la guitare électrique, il est au contraire intéressant que la corde subsiste dans son mouvement vibratoire pendant le temps le plus long possible : la corde n'a pas besoin de perdre de l'énergie car le corps de la guitare électrique *solid body*<sup>5</sup> — par définition plein — rayonne très faiblement. C'est justement le rôle du *pickup* : il est sensible à la vitesse de vibration de la corde et transforme cette énergie mécanique en courant électrique alternatif, laissant au système amplificateur le soin de produire le son.

Néanmoins, il paraît raisonnable de penser que les phénomènes d'amortissement existent et jouent un rôle important dans l'existence de *dead-spots*. Fleischer et Zwicker ([FZ98], [FZ99], [Fle05]) expliquent un *dead-spot* pour une certaine note à une certaine frette par la présence d'une conductance (voir section 2.2) élevée à la fréquence fondamentale de cette note.

D'un autre côté, [ESS02], [Esp03], [Fle05] et [FZ98] ont étudié le comportement vibratoire des guitares électriques du point de vue des déformées modales. Ce dernier compare hélas les comportements modaux de deux guitares trop différentes du point de vue de la facture<sup>6</sup> pour pouvoir conclure sur l'influence d'un élément de lutherie isolé sur le comportement de la guitare en tant que structure. C'est là que se situe l'originalité du présent travail : les neuf guitares sur lesquels nous avons travaillé sont réputées en tous points identiques, à un seul élément/paramètre de lutherie près, de manière à ce que les différences constatées dans les comportements vibratoires des guitares soient imputables avec le maximum de certitudes à ce paramètre.

On se propose dans cette partie d'élaborer un protocole expérimental nous permettant de mesurer ces deux aspects de la vibration de la guitare électrique : on étudiera les déformées modales de la structure, puis les conductances colocalisées, *a priori* responsables des *dead-spots*.

### 2.2 Partie expérimentale

Il s'agit de mener une étude vibratoire de la structure que constitue la guitare électrique. Pour cela on utilise une méthode — classique en vibrations — de mesure de fonctions de réponse en fréquence (FRF) avec un marteau d'impact et un accéléromètre.

La FRF peut être désignée « accélération » ou « admittance », selon qu'elle est définie comme le rapport entre l'accélération ( $A(\omega)$ ) du point considéré et la force ( $F(\omega)$ ) exercée au point d'impact (qui peut être confondu ou non avec le point sur lequel est fixé l'accéléromètre) ou comme le rapport entre la vitesse ( $V(\omega)$ ) du point considéré et la force exercée :

$$Z(\omega) = \frac{A(\omega)}{F(\omega)} \quad (1)$$

l'accélération, ou bien

$$Y(\omega) = \frac{V(\omega)}{F(\omega)} \quad (2)$$

l'admittance.

La conductance est à son tour définie comme la partie réelle de l'admittance :

$$C(\omega) = \text{Re}(Y(\omega)) \quad (3)$$

---

5. On parle de guitare électrique *solid body* quand le corps est plein (pas de caisse de résonance, donc une minimisation de la capacité à vibrer et rayonner).

6. Sont comparées une *Stratocaster*<sup>TM</sup> (entre autres caractéristiques : manche vissé, tête asymétrique, les bois utilisés sont vraisemblablement du frêne ou de l'aulne, et de l'érable) de la marque *Fender*<sup>TM</sup> et une *Les Paul*<sup>TM</sup> (manche collé, tête symétrique, les bois utilisés sont vraisemblablement de l'acajou et de l'érable) de la marque *Gibson*<sup>TM</sup>

C'est la conductance qui caractérise la capacité d'une structure à transférer (ou de manière équivalente : à se faire transférer) de l'énergie.

Lors des mesures vibratoires, les guitares sont toujours disposées sur des tendeurs attachés à un portique (figure 3), ceci réalisant une bonne approximation de conditions aux limites libres (les fréquences de résonance du système « masse-ressort » composé par les tendeurs et la guitare sont bien inférieures aux fréquences qui nous intéressent dans l'étude vibratoire des guitares).

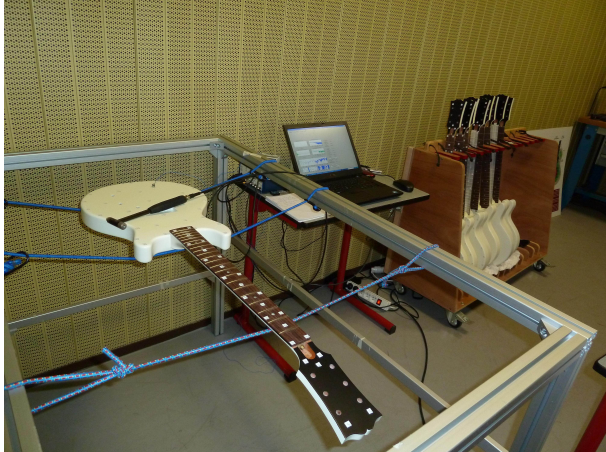


FIGURE 3 – Montage expérimental pour les mesures vibratoires

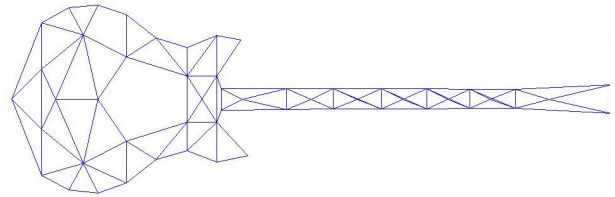


FIGURE 4 – Maillage expérimental pour l'analyse modale

Deux types de mesures sont réalisées. Dans un premier temps, les FRF sont mesurées sur toute la structure. Un maillage expérimental a été défini (voir figure 4). Il est identique pour chaque guitare et réalise un compromis entre une bonne résolution spatiale (dans la bande de fréquence où nos mesures au marteau d'impact sont valides, c'est-à-dire environ [20Hz - 1500 Hz]) et une durée d'expérimentation raisonnable. On fixe l'accéléromètre en un point du maillage et on frappe avec le marteau successivement en chacun des points du maillage. Chaque mesure nous fournit une fonction de réponse en fréquence. L'identification modale se fait avec le logiciel *Modan*© (voir annexe D), qui calcule, à partir des FRF en chacun des points d'excitation, les déformées, fréquences et amortissements de chaque mode de chaque guitare. Ces mesures ont été effectuées à l'ITEMM (figures 5 et 6) sur les neuf guitares non cordées, sans accastillage<sup>7</sup> ni électronique (le maillage comportait alors 56 points), puis au LAM (figures 7 et 8) une fois les guitares équipées en accastillage et électronique, cordées et réglées (le maillage comportait alors 52 points).

Dans un deuxième temps (voir section 2.5), on réalise des mesures dites colocalisées sur le manche. L'excitation et la captation se font en un même point. Plus précisément, pour une mesure on place (voir annexe H) l'accéléromètre sur l'intercorde (voir annexe C) « 65 » (ou « 43 », ou « 21 ») à proximité immédiate d'une frette, et on applique l'impact juste à côté de la position de l'accéléromètre (pour les choix des positions respectives de l'accéléromètre et du point d'impact, voir l'annexe H). On recommence pour chaque frette et chaque intercorde.

Ces mesures ont été faites (à l'ITEMM) sur certaines frettes de trois guitares non cordées et non pourvues d'électronique et accastillage (mesures non traitées), puis sur chaque frette des quatre guitares sélectionnées pour les tests perceptifs (au LAM, voir section 3).

Ces mesures colocalisées nous permettent de quantifier la capacité qu'a le manche, en tout point, à absorber l'énergie de la corde par couplage. Les mesures de conductance colocalisée se sont focalisées sur le manche, car [FZ98] [CFMN10] montrent que la conductance au chevalet est très faible dans le cas d'une guitare électrique *solid body*, c'est-à-dire que la transmission d'énergie de la corde au corps de la guitare se fait principalement par l'autre extrémité, à savoir le sillet dans le cas d'une corde à

7. L'accastillage désigne toutes les pièces métalliques ou en plastique qui seront montées sur la guitare, par exemple le chevalet, les mécaniques d'accordage, les potentiomètres, ... Voir figure 49 annexe C pour une illustration.





FIGURE 5 – Dispositif expérimental — ITEM

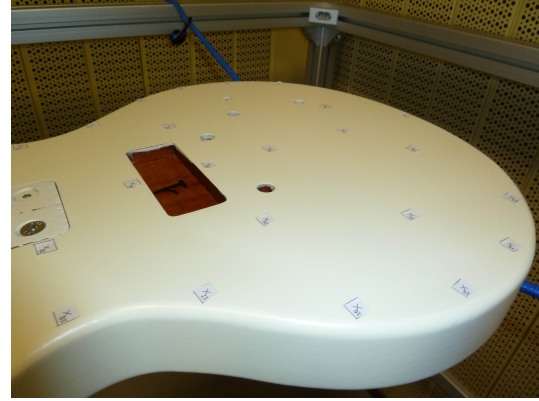


FIGURE 6 – Dispositif expérimental — ITEM



FIGURE 7 – Dispositif expérimental — LAM



FIGURE 8 – Dispositif expérimental — LAM

vide, ou la frette dans le cas d'une note frettée. Nous reviendrons cependant sur cette hypothèse en section 2.5.2.

## 2.3 Etude modale

### 2.3.1 Guitares non cordées et non équipées

Nous étudions tout d'abord les FRF, ou accélérances. Nous disposons d'une mesure d'accélération par point du maillage pour chaque guitare. On peut, par exemple, représenter comme en figure 9, la fonction de transfert entre l'accélération mesurée au point 12 et la force exercée au point 26, pour chaque guitare. On voit (et ceci est vrai sur les FRF en les autres points, qui, pour des raisons de place, ne seront pas représentées ici) que le comportement jusqu'à environ 500 Hertz est très similaire pour toutes les guitares. Ensuite, les neuf courbes conservent des traits communs, mais les maxima sont décalés.

L'idée est ensuite de voir si, pour chaque point, fixé, les accélérances mesurées sur trois guitares d'une même famille (famille « manche vissé », famille « manche collé », famille « manche traversant ») ont une allure similaire. On trace en figure 10 les mêmes accélérances qu'en figure 9, mais en ayant cette fois-ci donné la même couleur aux courbes des guitares de chaque famille. Encore une fois, les trois familles tendent à avoir le même comportement en-dessous de 500 Hertz. Dans les fréquences supérieures, le comportement est encore très similaire, bien qu'on constate certains écarts en fréquences. On n'observe pas de trait discriminant chaque famille.

Pour pousser plus loin l'analyse et pour trouver des « airs de famille », on a ensuite tracé, pour chaque point, la somme des FRF (valeurs complexes) pour chaque famille. Dans un souci de comparaison, on représente en figure 11 ces sommes pour la fonction de transfert entre les points 12 et

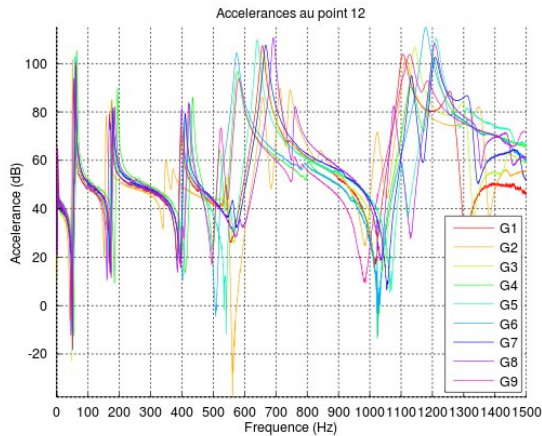


FIGURE 9 – Modules des accélérances entre le point 12 et le point 26, pour toutes les guitares non équipées, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

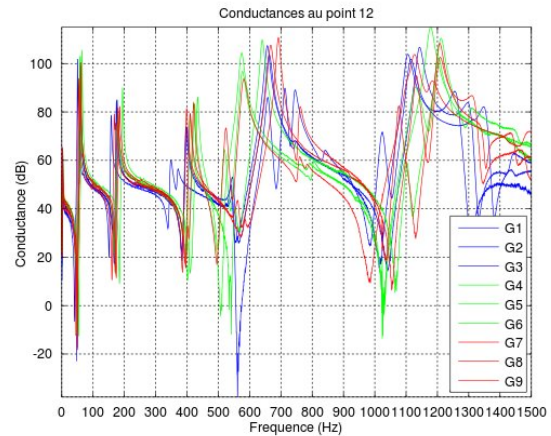


FIGURE 10 – Modules des accélérances entre le point 12 et le point 26, guitares regroupées par famille, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

26. En-dessous de 500 Hertz on retrouve encore une fois des comportements très proches. Cepen-

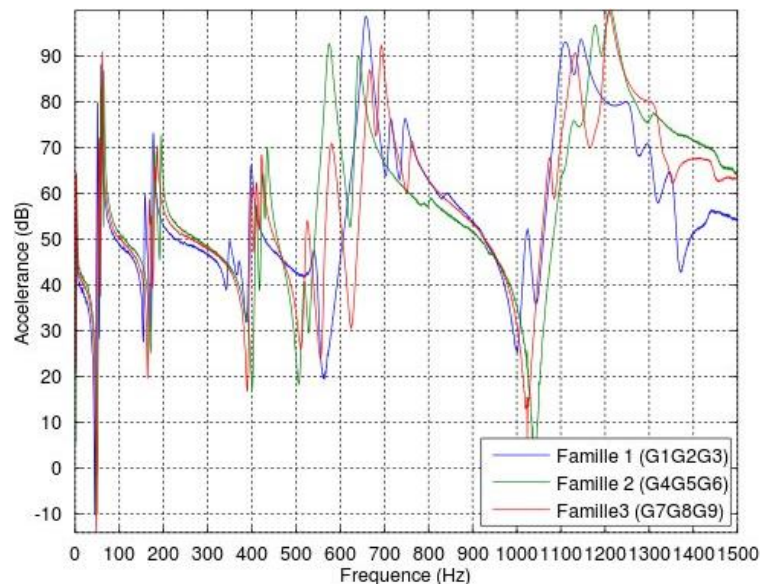


FIGURE 11 – Modules des accélérances entre le point 12 et le point 26, sommes par famille, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

nant (toujours en basses fréquences), il apparaît ici (et sur les tracés des FRF en les autres points) que, si les allures des courbes sont identiques, les fréquences de résonance (les fréquences des pics) sont légèrement décalées en fonction de la famille/construction observée. D'une manière générale, on trouve que, comme sur la figure 11, les fréquences des maxima sont plus basses pour la première famille (manches vissés), plus haute pour la deuxième famille (manches collés), la troisième famille (manches traversants) se situant entre les deux précédentes. Au-delà de 500 Hertz, il apparaît en revanche difficile de tirer des conclusions pertinentes quant au comportement caractéristique de chaque famille de guitare, en raison des dissimilarités d'allure des courbes.

Le deuxième type de résultat est obtenu par identification modale avec le logiciel *Modan*©. A partir des FRF mesurées sur le maillage, les déformées modales, ainsi que les fréquences et amortissements qui leur sont associés sont calculés pour chaque guitare dans la bande de fréquence [0

Hz - 1700 Hz]. A titre d'exemple on donne en figure 13 à 17 les six premières déformées modales identifiées pour la guitare 1. Pour des raisons de place, un tableau récapitulatif des modes, fréquences et amortissements peut être trouvé en annexes E.1 et E.2.

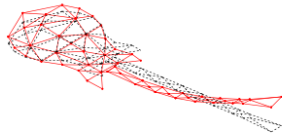


FIGURE 12 – Déformée 1 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Mode 1 de flexion globale.

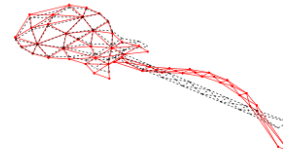


FIGURE 13 – Déformée 2 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Mode 1 de flexion locale du manche.

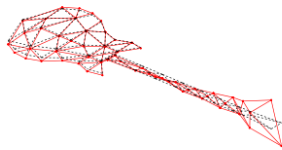


FIGURE 14 – Déformée 3 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Mode de torsion locale de la tête.

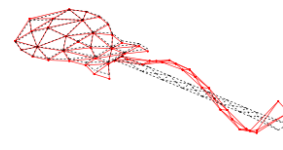


FIGURE 15 – Déformée 4 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Mode 2 de flexion locale du manche.

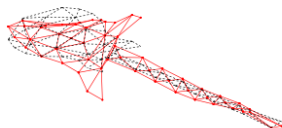


FIGURE 16 – Déformée 5 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Mode de torsion globale.

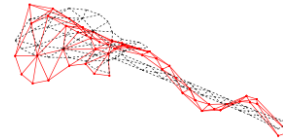


FIGURE 17 – Déformée 6 de la guitare 3, non équipée et non cordée. Modes de flexion locale du corps et de flexion locale du manche.

On regroupe dans les tableaux 1 et 2 les moyennes (chiffre du haut) et écart-types (chiffre du bas) par famille (manche vissé/collé/traversant) des fréquences (tableau 1) et amortissements (tableau 2) de modes retenus pour ce calcul. Les modes retenus sont ceux (voir annexe E.1) qui sont identifiés sur au moins cinq guitares, et sur au moins une guitare de chaque famille. Le but est de savoir si un certain type de construction pouvait par exemple faire systématiquement baisser les fréquences des modes, ou d'autres tendances de la sorte. On se rend qu'aucune tendance inter-famille ne se dégage, aucun mode de jonction corps-manche ne se démarque en terme de fréquences ou amortissements des modes. Les écarts-type (témoins de la variabilité intra-famille), en plus d'augmenter globalement avec la fréquence (ce qui est d'ailleurs une tendance générale), montrent que la variabilité entre plusieurs guitares d'une même famille est au moins aussi importante que la variabilité entre plusieurs guitares de familles différentes.

### 2.3.2 Guitares cordées et équipées

Les mêmes mesures que dans la partie 2.3.1 sont étudiées. On dispose encore une fois d'une mesure d'accélération par point du maillage, pour chaque guitare. On constate (figure 18), ainsi que cela avait

Tableau 1 – Moyennes par famille des fréquences pour chaque mode retenu, guitares non cordées et non équipées. Chiffre du haut : moyenne, chiffre du bas : écart-type

Mode	Manches vissés (G1, G2, G3)	Manches collés (G4, G5, G6)	Manches traversants (G7, G8, G9)
1	55,8 Hz 4,3 Hz	60,7 Hz 3,7 Hz	58 Hz 3,6 Hz
2	169 Hz 10,3 Hz	185,4 Hz 12,2 Hz	174,2 Hz 7,5 Hz
3	238,7 Hz 17,2 Hz	238,1 Hz 5,1 Hz	241,1 Hz 8,1 Hz
4	395,8 Hz 0,8 Hz	422,2 Hz 12,2 Hz	403,7 Hz 7,8 Hz
5	545 Hz 2,9 Hz	532,1 Hz 18,6 Hz	557 Hz 30,8 Hz
6	658,1 Hz 3,7 Hz	596,5 Hz 37,8 Hz	646,2 Hz 58,9 Hz
7	738,7 Hz 7 Hz	771,7 Hz 25,2 Hz	761,5 Hz 7,3 Hz
8	878,2 Hz 62,4 Hz	917,5 Hz 31,2 Hz	927,8 Hz 30,4 Hz
9	1119,9 Hz 19,4 Hz	1194,1 Hz 23,3 Hz	1172,1 Hz 59,3 Hz
10	1305,8 Hz 45,9 Hz	1273,1 Hz 37,3 Hz	1335,2 Hz 20,9 Hz
11 bis	1435,5 Hz	1466,4 Hz 21,5 Hz	1448,2 Hz 29,5 Hz
12	1644,1 Hz 48,9 Hz	1614,3 Hz 57,1 Hz	1479,9 Hz

été le cas pour les guitares non cordées et non équipées que le comportement jusqu'à environ 500 Hertz est très similaire pour toutes les guitares. Ensuite, les neuf courbes semblent se décaler, même si l'allure générale des courbes est conservée. Il est à préciser que sur les mesures sur les guitares cordées et équipées, l'embout du marteau d'impact a été changé pour un embout plus mou (afin de ne pas détériorer les guitares), la bande passante de l'excitation s'en est ainsi trouvée réduite (les mesures sont valables jusqu'à environ 1000 Hertz).

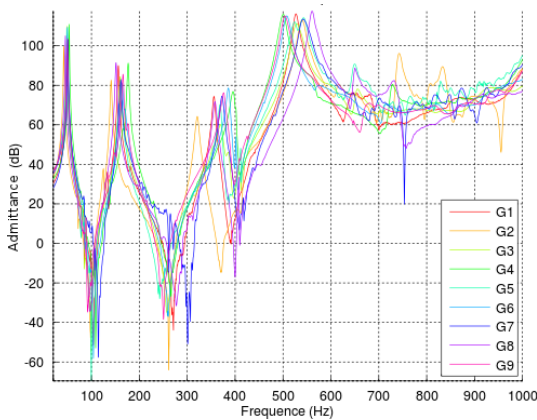


FIGURE 18 – Modules des accélérances entre le point 2 et le point 26, pour toutes les guitares équipées, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

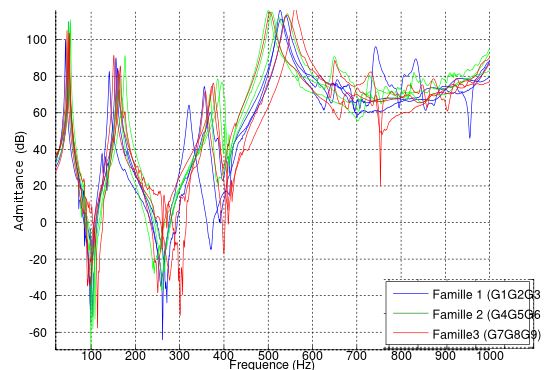


FIGURE 19 – Modules des accélérances entre le point 2 et le point 26, guitares regroupées par famille, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

Tableau 2 – Moyennes par famille des amortissements pour chaque mode retenu, guitares non cordées et non équipées. Chiffre du haut : moyenne, chiffre du bas : écart-type

Mode	Manches vissés (G1, G2, G3)	Manches collés (G4, G5, G6)	Manches traversants (G7, G8, G9)
1	0,9 % 0 %	0,9 % 0,1 %	1 % 0,1 %
2	0,8 % 0 %	0,9 % 0,2 %	1,2 % 0,1 %
3	0,7 % 0 %	0,5 % 0,2 %	0,6 % 0 %
4	0,8 % 0 %	0,7 % 0 %	0,7 % 0,1 %
5	1,1 % 0,1 %	1,1 % 0 %	1,1 % 0,1 %
6	1,2 % 0,1 %	1,2 % 0,2 %	1,1 % 0,3 %
7	0,7 % 0,2 %	0,7 % 0,3 %	0,9 % 0,1 %
8	1 % 0 %	0,8 % 0,1 %	0,9 % 0 %
9	1 % 0,1 %	0,9 % 0 %	0,9 % 0,1 %
10	1,1 % 0,1 %	0,9 % 0,1 %	1 % 0,2 %
11 bis	0,9 % -	0,9 % 0 %	1 % 0,1 %
12	1,4 % 0,5 %	0,8 % 0,1 %	1,2 % -

On représente ici les modules des accélérances en donnant aux guitares d'une même famille une couleur similaire (figure 19). Les trois familles semblent conserver le même comportement. On note cependant qu'en-dessous de 400 Hertz, les résonances des guitares à manche vissé (famille 1) ont lieu à des fréquences plus graves que les guitares à manche traversant (famille 3), qui les ont plus graves que les guitares à manche collé (famille 2). Entre 400 et 600 Hertz, ce sont les guitares de la famille 2 qui semblent avoir des résonances aux fréquences les plus graves, suivies par les guitares à manche vissé et par les guitares de la famille 3 (pas toujours dans le même ordre). Dans les fréquences supérieures, les comportements des différentes guitares sont plus individualisés, si bien qu'il est difficile de déceler une « tendance familiale ». Ces tendances sont conservées quand on examine les moyennes des accélérances pour chaque famille (figure 20).

On donne à présent les résultats de l'identification modale avec le logiciel *Modan*©. A partir des FRF mesurées sur le maillage, les déformées modales, ainsi que les fréquences et amortissements qui leur sont associés sont calculés pour chaque guitare dans la bande de fréquence [0 Hz - 1500 Hz]. A titre d'exemple on donne en figure 21 à 26 les six premières déformées modales identifiées pour la guitare 1. Pour des raisons de place, un tableau récapitulatif des modes, fréquences et amortissements peut être trouvé en annexes F.1 et F.2.

On regroupe dans les tableaux 3 et 4 les moyennes (chiffre du haut) et écart-types (chiffre du bas) par famille (manche vissé/collé/traversant) des fréquences (tableau 3) et amortissements (tableau 4) de modes qu'on a retenu de la même manière qu'en section 2.3.1 (ceux qui sont (voir annexes F.1) identifiés sur au moins cinq guitares, et sur au moins une guitare de chaque famille).

On se demande, comme avec les guitares non équipées, si la construction de la guitare peut faire apparaître une tendance à décaler les fréquences ou à changer les amortissements des modes

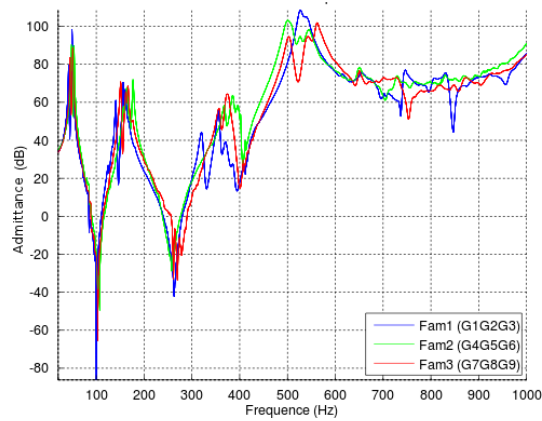


FIGURE 20 – Modules des accélérations entre le point 2 et le point 26, moyennes par famille, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

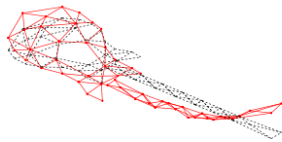


FIGURE 21 – Déformée 1 de la guitare 1, équipée et cordée. Mode 1 de flexion globale.

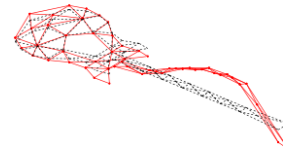


FIGURE 22 – Déformée 2 de la guitare 1, équipée et cordée. Mode 1 de flexion locale du manche.

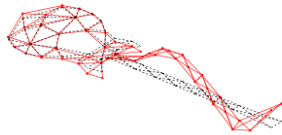


FIGURE 23 – Déformée 3 de la guitare 1, équipée et cordée. Mode 2 de flexion locale du manche.

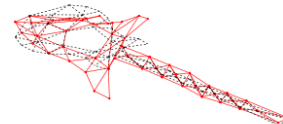


FIGURE 24 – Déformée 4 de la guitare 1, équipée et cordée. Mode de torsion globale.

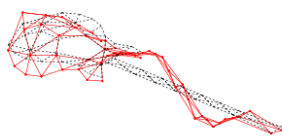


FIGURE 25 – Déformée 5 de la guitare 1, équipée et cordée. Modes de flexion locale du manche et du corps.

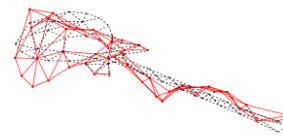


FIGURE 26 – Déformée 6 de la guitare 1, équipée et cordée. Modes de flexion locale du manche et du corps.

identifiés. Pour les amortissements, on ne note aucune tendance « familiale » particulière. Ceci n'est pas surprenant, sachant que toutes les guitares sont construites dans le même matériau. On remarque tout de même que l'amortissement local qui serait *a priori* introduit par la colle utilisée dans le collage des manches n'est pas visible dans ces mesures du comportement dynamique global. En revanche, en ce qui concerne les fréquences de résonance des modes retenus, les guitares à manche vissé (guitares 1,

Tableau 3 – Moyennes par famille des fréquences pour chaque mode retenu, guitares cordées et équipées. Chiffre du haut : moyenne, chiffre du bas : écart-type

Mode	Manches vissés (G1, G2, G3)	Manches collés (G4, G5, G6)	Manches traversants (G7, G8, G9)
1	47,3 Hz 4,1 Hz	50,7 Hz 2,5 Hz	48,8 Hz 2,9 Hz
2	152,1 Hz 10,4 Hz	166,5 Hz 8,4 Hz	159,9 Hz 7,6 Hz
3	347,2 Hz 25,1 Hz	383,2 Hz 13,9 Hz	369,4 Hz 10,2 Hz
4	531,8 Hz 6,7 Hz	510,2 Hz 12,7 Hz	535,6 Hz 29,2 Hz
5 bis	645,2 Hz 8,9 Hz	653,6 Hz 12,2 Hz	648,6 Hz -
6	693,1 Hz 9 Hz	696,6 Hz -	698,7 Hz 51,7 Hz
9	1077,4 Hz 18,8 Hz	1060,7 Hz 47,2 Hz	1097,3 Hz 39,5 Hz
11	1253,5 Hz 33,9 Hz	1254,7 Hz 25,2 Hz	1283,7 Hz 15,7 Hz
12	1326,8 Hz 0,2 Hz	1372,4 Hz 22,4 Hz	1369 Hz 41,3 Hz

2 et 3) ont très souvent les plus basses fréquences, mais ce résultat est le seul de ce type (voir section 2.3.1), il n’y a donc pas de conclusion générale quant à l’influence du mode de jonction du manche au corps (quant à l’appartenance d’une guitare à une famille ou à une autre) sur l’emplacement des fréquences ou les valeurs des amortissements des modes, dans le domaine de fréquences étudié.

## 2.4 Différences entre guitares équipées et non équipées

Tout d’abord, l’observation suivante est faite : que les guitares soient cordées et équipées ou non, on se rend compte que le comportement est le même en basses fréquences (avant 500 Hertz), quelles que soient les guitares. Ensuite les comportements tendent à devenir différents pour chaque guitare, sans forcément de tendance liée à l’appartenance d’une guitare à telle ou telle famille. On peut aussi conclure que la variabilité inter-guitares (entre deux guitares du lot de neuf) est au moins aussi grande que la variabilité inter-famille (entre deux guitare d’une famille de trois).

On observe sur les tableaux 5 et 6 l’influence de l’accastillage et du cordage sur les fréquences et amortissements des modes identifiés. Pour pouvoir comparer, on met en correspondance, à l’aide des tableaux des déformées en annexes E.1 et F.1 les modes identifiés sur les guitares avant et après avoir été équipées et cordées. On constate — à une exception près, les modes 6 « non cordées » et 5 bis « cordées » que le fait d’ajouter l’accastillage, l’électronique et les cordes (et d’accorder les cordes, si bien que la pré-contrainte appliquée à la guitare est « habituelle ») fait baisser les fréquences des modes. Ce résultat peut paraître contradictoire avec celui de [CFMN10] qui voit les fréquences monter quand les guitares sont cordées. Dans cet article, la raison qui est donnée pour cette augmentation des fréquences est que la raideur de la structure est augmentée par la tension des cordes. Dans notre cas, il ne faut pas oublier qu’en plus d’avoir cordé les guitares, l’accastillage (chevalet, mécaniques), l’électronique (comprenant boutons, potentiomètres et *pickup*) a aussi été rajouté<sup>8</sup> entre les deux cas nommés trop restrictivement « cordé » et « non cordé », ce qui augmente la masse (d’environ 400 à 500g). Notre conclusion est qu’entre les deux séries de mesure (NC et C), la masse a connu un

8. Dans les expériences de [CFMN10], l’accastillage et l’électronique étaient présents dans les deux cas « cordées » et « non cordées »

Tableau 4 – Moyennes par famille des amortissements pour chaque mode retenu, guitares cordées et équipées. Chiffre du haut : moyenne, chiffre du bas : écart-type

Mode	Manches vissés (G1, G2, G3)	Manches collés (G4, G5, G6)	Manches traversants (G7, G8, G9)
1	1,2 % 0,3 %	0,9 % 0,1 %	1,3 % 0,1 %
2	1,2 % 0,2 %	1,2 % 0,1 %	1,6 % 0,3 %
3	1,4 % 0,4 %	1 % 0,1 %	1 % 0,1 %
4	1,3 % 0,2 %	1,4 % 0,2 %	1,5 % 0,3 %
5 bis	1,3 % 0,1 %	1,2 % -	1,2 % 0,5 %
6	1,3 % 0,2 %	0,9 % -	1,5 % 0,2 %
9	0,8 % 0,6 %	0,8 % 0,3 %	0,8 % 0,2 %
11	1,1 % 0,5 %	1,1 % 0,3 %	0,7 % 0,6 %
12	0,4 % 0,1 %	0,6 % 0,5 %	0,6 % 0,4 %

Tableau 5 – Moyennes par famille des fréquences pour chaque mode retenu, guitares non cordées (NC) puis cordées (C)

Mode (NC)	Vissés	Collés	Traversants	Mode (C)	Vissés	Collés	Traversants
1	55,8 Hz	60,7 Hz	58 Hz	1	47,3 Hz	50,7 Hz	48,8 Hz
2	169 Hz	185,4 Hz	174,2 Hz	2	152,1 Hz	166,5 Hz	159,9 Hz
4	395,8 Hz	422,2 Hz	403,7 Hz	3	347,2 Hz	383,2 Hz	369,4 Hz
5	545 Hz	532,1 Hz	557 Hz	4	531,8 Hz	510,2 Hz	535,6 Hz
6	658,1 Hz	596,5 Hz	646,2 Hz	5 bis	645,2 Hz	653,6 Hz	648,6 Hz
9	1119,9 Hz	1194,1 Hz	1172,1 Hz	9	1077,4 Hz	1060,7 Hz	1097,3 Hz
10	1305,8 Hz	1273,1 Hz	1335,2 Hz	11	1253,5 Hz	1254,7 Hz	1283,7 Hz

accroissement plus grand que la raideur, d'où l'abaissement des fréquences.

L'influence de l'équipement sur les amortissements des modes est apparemment une augmentation de l'amortissement pour chaque famille de guitare, dans les modes « basses fréquences » (jusqu'au mode 6 « non cordées » et 5 bis « cordées » inclus). Il faut cependant modérer cette conclusion de la même manière que [CFMN10] : la présence des cordes a nécessité l'emploi de papier (figure 27) autour de celles-ci afin de les empêcher d'entrer en résonance (on ne s'intéressait qu'aux vibrations de la structure sans les vibrations des cordes), et la présence d'objets tels que les mécaniques, le chevalet, les boutons de réglage ont nécessité l'emploi de pâte à modeler (figure 28) pour étouffer les vibrations parasites. Tout ceci a sans doute également rajouté de l'amortissement à la structure, si bien qu'il paraît difficile d'établir un lien évident et clair entre les différences d'amortissements et le changement produit par l'équipement de la guitare en cordes, électronique et accastillage.





FIGURE 27 – Papier et pâte à modeler pour étouffer cordes et vis



FIGURE 28 – Pâte à modeler pour étouffer cordes, mécaniques et *truss-rod*

Tableau 6 – Moyennes par famille des amortissements pour chaque mode retenu, guitares non cordées (NC) puis cordées (C)

Mode (NC)	Vissés	Collés	Traversants	Mode (C)	Vissés	Collés	Traversants
1	0,9 %	0,9 %	1 %	1	1,2 %	0,9 %	1,3 %
2	0,8 %	0,9 %	1,2 %	2	1,2 %	1,2 %	1,6 %
4	0,8 %	0,7 %	0,7 %	3	1,4 %	1 %	1 %
5	1,1 %	1,1 %	1,1 %	4	1,3 %	1,4 %	1,5 %
6	1,2 %	1,2 %	1,1 %	5 bis	1,3 %	1,2 %	1,2 %
9	1 %	0,9 %	0,9 %	9	0,8 %	0,8 %	0,8 %
10	1,1 %	0,9 %	1 %	11	0,4 %	1,1 %	0,7 %

## 2.5 Etude des conductances colocalisées

### 2.5.1 Théorie

On peut modéliser la corde comme sur la figure 29, l'encastrement représentant la liaison entre la corde et le chevalet (voir section 2.5.2) et l'admittance « hors-plan » (voir G)  $Y_c$  représentant le couplage entre la corde et le manche via la frette. On suit ici le raisonnement de [Bar10b], fondé lui-même sur [CK08].

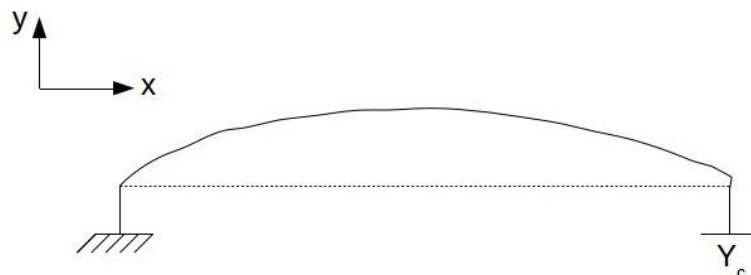


FIGURE 29 – Modélisation de la corde vibrante

On connaît l'équation des ondes de d'Alembert :

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} - c \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = 0 \quad (4)$$

avec  $c = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$  la célérité des ondes,  $T$  la tension de la corde et  $\mu$  la masse linéique de la corde. La solution avec les deux extrémités de la corde encastées donne :

$$y(x, t) = A_n \sin(k_n x) e^{-j\omega_n t} \quad (5)$$

avec  $k_n = \frac{n\pi}{L}$  le nombre d'onde et  $\omega_n = \frac{n\pi c}{L}$ .

On montre, pour un mode de corde ( $y(x, t) = A \sin(kx) e^{-j\omega t}$ ), que la force s'exerçant sur la corde au niveau de la frette (de l'admittance  $Y_c$ ) suivant l'axe  $y$  (défini en figure 29) s'écrit :

$$F_y = -Tk \cos(kx) e^{-j\omega t} \quad (6)$$

et que la vitesse de l'extrémité de la corde au point de jonction avec la frette suivant le même axe s'écrit :

$$v_y = \frac{\partial y}{\partial t} = -j\omega \sin(kx) e^{-j\omega t} \quad (7)$$

d'où l'admittance « hors-plan »  $Y_c$  s'écrit :

$$Y_c = \frac{v_y}{F_y} = \frac{j \tan(kL)}{Z_c} \quad (8)$$

avec  $Z_c = \sqrt{\mu T}$  l'impédance caractéristique de la corde.

Avec une hypothèse de faible couplage  $Z_c Y_c \ll 1$  et un développement perturbatif, il vient :

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L} \left(1 - j \frac{Z_c Y_c}{n\pi}\right) \quad (9)$$

les pulsations propres de la corde, qui sont complexes.

Il vient donc que la mobilité de la structure représentée par l'admittance  $Y_c$  déplace les fréquences propres :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \operatorname{Re}(\omega_n) = \frac{nc}{2L} \left(1 + \frac{Z_c \operatorname{Im}(Y_c)}{n\pi}\right) \quad (10)$$

et introduit un amortissement supplémentaire :

$$\xi_n = -\operatorname{Im}(\omega_n) = \frac{Z_c \operatorname{Re}(Y_c)}{n\pi} \quad (11)$$

le tout indexé par l'entier  $n$ . L'amortissement induit par le couplage est donc proportionnel à la partie réelle de l'admittance au point de couplage. Cette partie réelle de l'admittance a déjà été rencontrée en section 2.2 et se nomme « conductance ». C'est cette conductance qui paraît déterminante pour la compréhension des amortissements du point de vue de la corde.

Côté expérimental, on obtient d'après le protocole décrit en section 2.2 des mesures de conductances colocalisées, dont on peut montrer un exemple en figure 30, qui sera analysée en section 2.5.3.

### 2.5.2 Conductances colocalisées au chevalet

[FZ99] compare les conductances colocalisées au chevalet et au sillet. Dans la bande de fréquences étudiée dans cet article ([0 Hz - 700 Hz]), il est montré que la conductance au chevalet (toujours mesurée à l'intercorde « 43 ») est négligeable devant la conductance au sillet.

Dans l'optique de vérifier cette affirmation, des mesures similaires ont été faites dans le cadre de ce stage. On a mesuré la conductance au chevalet aux trois intercordes, pour chaque guitare. Ces conductances ont été comparées aux conductances pour les guitares et intercordes correspondantes,

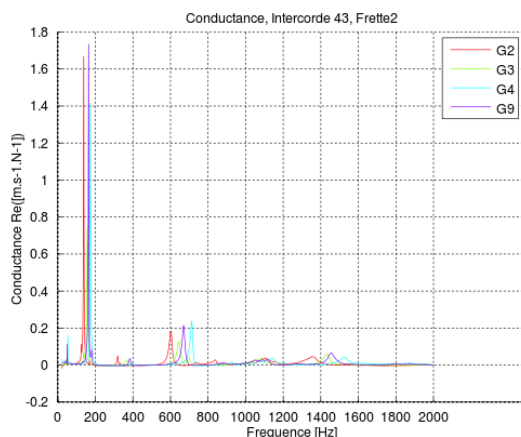


FIGURE 30 – Conductances colocalisées pour les quatre guitares au niveau de l’intercorde « 43 », frette 2

pour chaque frette (sillet inclus, dénommé « frette 0 » ici pour plus de souplesse au niveau des graphiques, bien qu’il ne s’agisse pas d’une véritable « frette 0 » du point de vue de la lutherie). Nous tirons comme résultat qu’en effet (voir pour illustration la figure 31), la conductance au chevalet est bien inférieure à la conductance au sillet, dans la bande de fréquence approximative de [0 Hz - 850 Hz]. En revanche, pour les fréquences supérieures (bande [850 Hz - 2000 Hz]), les conductances au chevalet et au sillet sont d’amplitudes comparables et il arrive que pour certaines fréquences la conductance au chevalet dépasse la conductance au sillet.

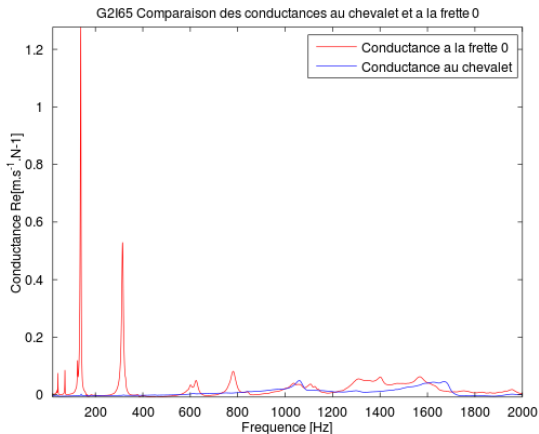


FIGURE 31 – Comparaison des conductances au chevalet et au sillet (frette 0)

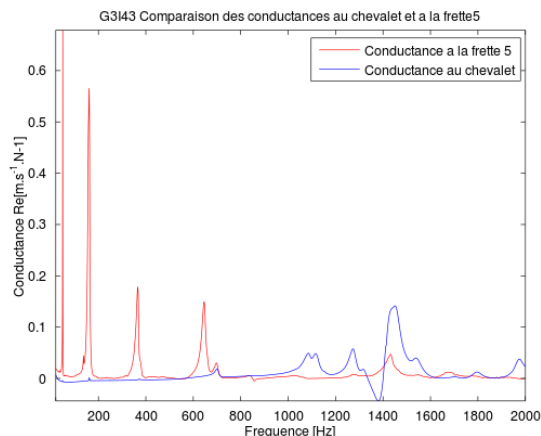


FIGURE 32 – Comparaison des conductances au chevalet et à la frette 5

Les conductances au chevalet sont comparées aux conductances à chaque frette (figures 32, 33 et 34). On remarque que plus on monte vers les aigus (numéros de frettes croissants), plus la conductance à la frette prend des valeurs petites. On trouve que — dans la bande [850 Hz - 2000 Hz] — l’approximation faite que la conductance au chevalet est négligeable devant toutes les autres n’est vraie que pour le « bas » du manche, c’est-à-dire de la frette 0 à la frette 15 environ.

Cependant, comme on le verra en section 2.5.3, nos mesures ne sont valables que dans la bande de fréquences [0 Hz - 1000 Hz], où la conductance colocalisée au chevalet est négligeable, ce qui justifie de n’étudier que la conductance colocalisée sur le manche.

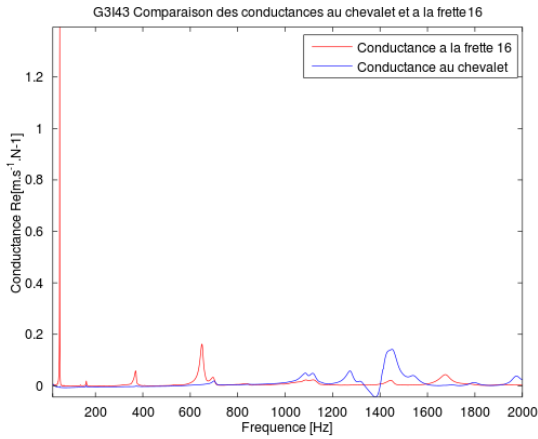


FIGURE 33 – Comparaison des conductances au chevalet et à la frette 16

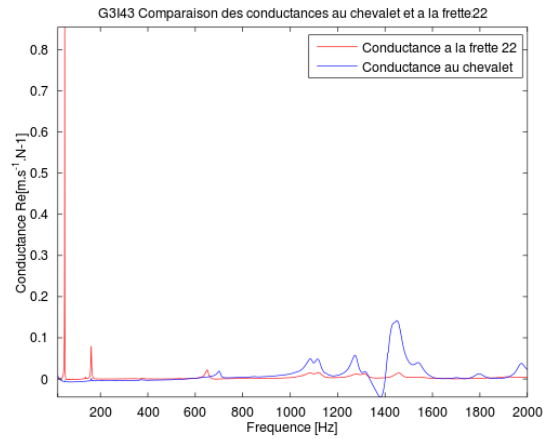


FIGURE 34 – Comparaison des conductances au chevalet et à la frette 22

### 2.5.3 Conductances colocalisées sur le manche (frettes, sillet)

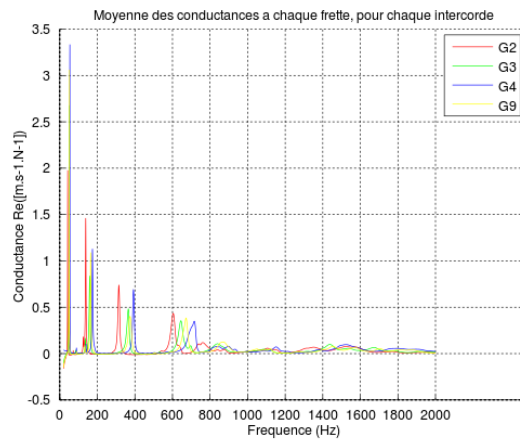


FIGURE 35 – Conductances colocalisées pour les quatre guitares, moyenne sur tous les intercordes et toutes les frettes

L'observation, pour chacune des quatre guitares retenues pour les tests perceptifs (guitares 2, 3, 4 et 9), des conductances colocalisées à tous les intercordes et à toutes les frettes (dans la bande de fréquences [0Hz - 1000 Hz]) nous montre que les pics de conductance ont toujours lieu pour des fréquences plus graves dans le cas de la guitare 2 (manche vissé). Si on poursuit le classement croissant des fréquences d'occurrence des maxima de conductance, alors il vient ensuite la guitare 3 (manche vissé), puis la guitare 9 (manche traversant) et enfin la guitare 4 (manche collé). On peut être tenté de rapprocher les deux guitares à manche vissé en ceci que leurs pics de conductance colocalisée sur le manche arrivent à des fréquences plus basses que ceux des deux autres guitares, mais on remarque sur la figure 30 (entre autres, qui ne sont pas représentées ici), que les pics de conductance des guitares 2 et 3 (même famille) sont aussi distants l'un de l'autre que les pics de conductance des guitares 3 et 9... On retrouve un résultat de la section 2.3.2 : la variabilité au sein d'une même famille est potentiellement plus importante que la variabilité entre deux familles...

Ces résultats se retrouvent sur la figure 35, où on a, pour chaque guitare, moyenné les mesures de conductance sur toutes les frettes et tous les intercordes. Ainsi, chaque courbe de la figure 35 représente une conductance moyenne sur le manche associée à une guitare, en fonction de la fréquence. On peut faire un lien entre les amplitudes des pics de conductance colocalisée de la figure 35 avec

les amplitudes des déformées des guitares (annexes F.1 et F.2). Des pics aux alentours de 150 Hertz, c'est celui correspondant à la guitare 2 qui est le plus haut, suivi par les guitares 4, 9 et 3. Cette fréquence est celle du mode 2 (F.2), et on voit en F.1 que c'est effectivement les guitares 2 et 4 qui ont les mouvements les plus amples sur les représentations de déformées modales. En revanche cette relation n'est pas vérifiée pour les pics aux alentours de 50 Hertz, correspondant au mode 1 : dans l'ordre décroissant d'amplitude de pics viennent les guitares 4, 9, 3 puis 2, alors que les guitares ayant les plus grandes amplitudes de vibration sont les 2 et 3. . .

## 2.6 Lien entre conductance colocalisée et longueur de son

On se propose dans cette section de vérifier le lien entre conductance colocalisée (voir section 2.5.1) et *sustain* proposé par [FZ99] et [Fle05]. La définition du *sustain* qui est donnée dans ces articles est : « long decay ». D'après les articles, un *dead spot* (un endroit sur le manche caractérisé par un temps de décroissance anormalement court de la note correspondante) est provoqué par une grande valeur de conductance à l'endroit (frette) correspondant pour la fréquence de la fondamentale de la note produite. Inversement, un *live spot* (un endroit sur le manche caractérisé par un temps de décroissance plus long que les endroits/frettes adjacent(e)s) est dû à un minimum de conductance à l'endroit (frette/corde) correspondant, pour la fréquence fondamentale de la note produite. C'est cette correspondance (forte conductance  $\leftrightarrow$  court temps de décroissance ; faible conductance  $\leftrightarrow$  long temps de décroissance) que nous allons vérifier.

### 2.6.1 Enregistrements audio

Pour chaque frette et chaque corde des quatre guitares que nous avons conservées, un enregistrement audio de la note correspondante a été effectué. Pour des raisons de répétabilité, l'emploi d'un capodastre a été préféré pour appuyer sur les cordes. L'excitation est en revanche réalisée manuellement à l'aide d'un médiator en s'efforçant d'avoir le geste le plus répétable possible. On montre (voir notamment [CCFDed]), que le geste du musicien expert est effectivement extrêmement répétable. Pour chaque note, quatre signaux ont été recueillis : ceux de deux accéléromètres (l'un placé à côté du chevalet, l'autre placé sur la tête de la guitare), celui d'un microphone aérien<sup>9</sup>, et enfin celui issu du *pickup* de la guitare.

Nos analyses de signaux audio n'ont pour l'instant porté que sur le signal issu du *pickup*<sup>10</sup>, car c'est la méthode proposée par [FZ99]. Faute de temps, une étude des *pickups* n'a pas pu être menée, on fait l'hypothèse que les quatre *pickups* provenant de la même série du même constructeur (ce qui est le cas) possèdent des caractéristiques similaires. On a pris soin de régler le potentiomètre de « volume » au maximum et de laisser le réglage de « tonalité » court-circuité pour altérer au minimum la « coloration » du son par le *pickup* et sa réponse en fréquence. Les signaux des accéléromètres (et peut-être du microphone aérien) seront exploités lors de la suite de ce travail de stage.

Comme dans [FZ99], on propose comme estimateur du *sustain* le « T30 » qui est le temps mis par l'énergie du signal pour décroître de 30 dB à partir d'un certain niveau qu'on définit ici comme le niveau maximal de l'énergie du signal. La courbe de décroissance de l'énergie est obtenue en utilisant la méthode de lissage décrite par [Sch67] : la courbe lissée de l'énergie du signal  $s$  est définie comme :

$$c(t) = \int_t^{+\infty} s^2(x) dx \quad (12)$$

On calcule ensuite à partir d'une régression linéaire de la courbe  $c(t)$  le temps de décroissance « T30 ».

9. situé à 15 cm de la douzième case, sur l'axe perpendiculaire à la touche

10. Remarquons que le microphone aérien a été disposé de manière arbitraire et qu'aucune étude de la directivité du rayonnement de la guitare électrique n'a été faite, ce que nous ferons dans la suite de ces travaux

## 2.6.2 Analyse

Pour chaque note (une corde et une frette) de chaque guitare, deux mesures sont confrontées : le « T30 » calculé à partir de l'enregistrement audio de la note (voir 2.6.1) et la valeur de la conductance mesurée en la fréquence correspondant à la note produite (comme les conductances ont été mesurées dans la direction parallèle aux frettes seulement en trois endroits (intercordes « 21 », « 43 » et « 65 »), on utilisera la mesure de conductance à l'intercorde « 43 » pour les cordes 4 et 3, et ainsi de suite). Nous suivons dans un premier temps le raisonnement des articles [FZ98] [FZ99] et [Fle05], c'est-à-dire qu'on ne considère que la conductance « YY » (voir les définitions en annexe C).

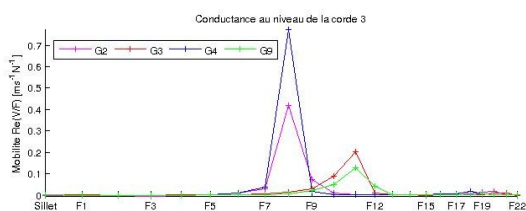


FIGURE 36 – Conductance YY aux fréquences correspondant au notes des quatre guitares sur la corde 3

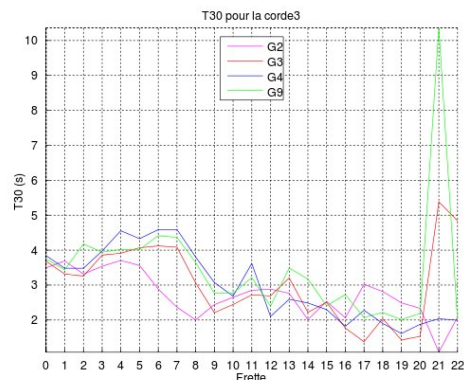


FIGURE 37 – T30 de chaque note des quatre guitares sur la corde 3

D'après les articles précédemment cités, aux « endroits » (qu'on qualifie « géométriquement » de frettes, mais dont il ne faut pas perdre de vue qu'on considère toujours la fréquence fondamentale de la note produite à cette frette, pour la corde observée) de faible (respectivement de forte) conductance (respectivement un creux ou un pic de conductance), le « T30 » est conséquemment fort (respectivement faible). A titre d'illustration, nous donnons en figures 36 et 61 des mesures de conductance et les calculs de « T30 » qui leur sont associés. La conductance mesurée sur la corde 3 de la guitare 2 présente une zone de maxima autour des fréquences fondamentales des notes produites aux frettes 7 à 9, et on remarque que pour les notes de ces mêmes frettes, le « T30 » a diminué sensiblement par rapport aux frettes précédentes. De même, la conductance pour la guitare 2 présente un maximum à la frette 8, c'est à cette même frette que le « T30 » chute de manière assez prononcée. On peut penser que le lien entre forte (resp. faible) conductance et court (resp. long) « T30 » est vérifié.

En revanche, pour les guitares 2 (conductance élevée aux fréquences fondamentales des frettes 10 à 12, mais « T30 » augmentant justement pour les fréquences fondamentales des notes produites à ces endroits) et 9 (maximum de conductance en la frette 11, et « T30 » au même endroit ne diminuant pas, voire présentant un maximum local), le lien n'est pas vérifié. Nous avons donc trouvé des cas où la « règle » de [FZ99] n'était pas vérifiée. La confrontation des « T30 » calculés sur toutes les cordes et des conductances YY (représentation linéaire ou logarithmique) nous fournit finalement autant de contre-exemples que d'exemples confirmant cette « règle ».

Les mêmes analyses ont été effectuées par la comparaison des « T30 » et des conductances ZZ et YZ. Ici encore les cas où la relation de [FZ99] est vérifiée sont aussi nombreux que ceux où elle ne l'est pas. On examine la moyenne des conductances YY, YZ et ZZ et on la confronte encore une fois aux « T30 », ce qui nous donne le même résultat d'équirépartition des exemples et contre-exemples à la relation.

Les tentatives suivantes ont été la prise en considération des partiels d'ordre supérieur des notes produites dans notre mesure de conductance YY. Il est à noter que ceci a été fait avec les signaux audios et les mesures de conductance du lot de trois guitares de 2006. Les valeurs de conductance ont été successivement calculées comme suit :

- pour une frette : valeur de la conductance à la fréquence du premier partiel<sup>11</sup> de la note correspondante
- pour une frette : valeur de la conductance à la fréquence du deuxième partiel de la note correspondante
- pour une frette : valeur de la conductance à la fréquence du troisième partiel de la note correspondante
- pour une frette : valeur de la conductance à la fréquence du quatrième partiel de la note correspondante
- pour une frette : addition des valeurs de conductance aux fréquences des deux (resp. trois, quatre) premières composantes de la note correspondante
- pour une frette : moyenne des valeurs de conductance aux fréquences des deux (resp. trois, quatre) premières composantes de la note correspondante
- pour une frette : moyenne (pondérée par le rang du partiel) des valeurs de conductance aux fréquences des deux (resp. trois, quatre) premières composantes de la note correspondante
- pour chacune des propositions précédentes, on remplace finalement la valeur de la conductance à la fréquence précise du partiel (ou de la fréquence fondamentale) par une moyenne des valeurs de conductance autour de ces fréquences

Chaque méthode de calcul de valeurs de conductance a été encore une fois comparée aux « T30 ». Il s'est avéré qu'aucune méthode ne permet de vérifier la relation donnée par [FZ99]. Dans des travaux futurs, il faudra reprendre ces derniers calculs incluant les fréquences des partiels en incorporant les mesures de conductance YZ et ZZ. On pourra aussi rechercher un autre indicateur que le « T30 » pour qualifier le *sustain*, par exemple chercher aussi des indicateurs spectraux à l'aide de représentations temps/fréquence, car on se rend compte ([Nav06]) que le jugement du *sustain* comporte bien souvent une dimension spectrale.

## 2.7 Conclusion sur l'étude vibratoire

Au niveau du comportement modal des guitares, il a été montré qu'il ne se dégageait pas nécessairement de tendance commune à toutes les guitares dont le mode de jonction entre corps et manche est partagé. Autrement dit on trouve ici que la variabilité inter-groupes/familles n'est pas supérieure à la variabilité intra-groupe/famille. Ceci n'est pas étonnant car toutes les guitares étudiées ici possèdent la même géométrie et le même matériau (de l'acajou de Bolivie), ce qui tend à uniformiser les fréquences de résonance et les amortissements.

Dans des travaux futurs on pourra donc s'orienter vers une étude approfondie des bois constituant la guitare (et aussi sur le sens de la coupe du bois, qui était ici identique pour chacune des guitares), et aussi sur des mesures de comportement modal plus localisées, par exemple dans la zone de jonction entre corps et manche (comportements modaux sans doute différents, dus aux différences de conditions aux limites pour le manche et le corps), ou isoler les comportements modaux du corps d'une part et du manche d'autre part (des comportements différents du manche en torsion pouvant apparaître selon le mode de jonction entre corps et manche).

En ce qui concerne le lien entre conductance localisée et temps de décroissance de la note correspondante, on s'attachera à l'avenir à trouver un autre indicateur du temps de décroissance (en lien avec les données perceptives recoltées en section 3), et à prendre en compte les mesures de conductance dans toutes les directions, ainsi que les partiels d'ordre supérieur de la note en question.

---

11. la fréquence de chaque partiel est examinée sous réserve d'existence, notre mesure expérimentale d'admittance étant à bande fréquentielle limitée

## 3 Jugements des musiciens

### 3.1 Protocole expérimental de l'évaluation subjective

Le protocole des épreuves de jugement mis en place prend pour point de départ la méthodologie générale de l'analyse sensorielle et de la psychologie, déjà antérieurement appliquée à l'évaluation des guitares par [Nav06]. Il s'agit de faire évaluer aux sujets (ici des musiciens) plusieurs guitares et de recueillir leurs impressions et jugements d'abord à partir de commentaires spontanés, puis à travers un questionnement plus systématique sur des échelles. Nous pensions au départ présenter quatre guitares à chaque sujet, soit un représentant de chaque famille (manche vissé, manche collé, manche traversant), une famille comprenant de surcroît un doublon, ou leurre, destiné à évaluer si deux instruments de la même famille étaient appréciés de la même manière par les guitaristes. L'expérience perceptive a duré deux mois et compté vingt-deux musiciens (entretien d'une durée de 3 heures par sujet).

Les guitares ont été choisies préalablement à la campagne de test par nos soins, selon des critères que nous avons établis en fonction d'hypothèses reposant sur nos connaissances de la guitare (en tant que musicien). Nous avons choisi trois guitares qui nous semblaient les plus semblables possible du point de vue de la facture, du réglage, du « confort de jeu » et de la fiabilité de l'électronique ; et une guitare (la 3) a été rajoutée à la sélection pour constituer le leurre. Un des intérêts du test de jugement est également d'évaluer dans quelle mesure ces critères *a priori* sont également pertinents pour les guitaristes que nous allons interroger. Ainsi, dès les deux premiers tests qui ont eu lieu avec ces quatre guitares (numérotées 2, 3, 4 et 9), les deux premiers guitaristes ont tous deux fait remarquer que la guitare 3 était trop différente des trois autres, et que de ce fait les comparaisons étaient difficiles sur l'ensemble des guitares. De ce fait, les tests suivants se sont déroulés avec trois guitares plus semblables et ne différant principalement que sur le manche (guitares numérotées 2, 4 et 9, manches respectivement vissé, collé et traversant).

Pour s'assurer que le guitariste est dans la situation la plus confortable et habituelle possible, et de ce fait recueillir des informations représentatives des jugements réels, ordinaires, le test présente davantage le caractère d'un entretien qui se veut délibérément le plus libre possible, que celui d'une épreuve expérimentale de laboratoire qui inciterait les musiciens à rechercher des « bonnes » réponses attendues des expérimentateurs. Néanmoins, nous avons veillé à ce que les conditions de questionnement soient les mêmes pour chaque musicien et nous avons régulièrement suivi le déroulement décrit en figure 38. Il est ainsi demandé au musicien de jouer et d'essayer les trois guitares « comme s'il était dans un magasin en vue d'un achat ou d'un choix d'instrument pour un concert ». L'entretien débute par une phase de familiarisation avec les trois guitares. Durant cette phase, le musicien est invité à tester les guitares dans l'ordre qu'il souhaite, comme s'il était seul, sans « obligation » de communiquer son ressenti. Ensuite, un dialogue naît de l'expression de ses premières impressions sur chaque guitare. La discussion est nourrie du jeu des trois guitares (toujours dans un ordre libre) et de la verbalisation des sensations du musicien.

Le dialogue peut se trouver relancé par nos questions, sollicitant en grande partie des reformulations de ce que le guitariste a exprimé. Nous avons porté une attention toute particulière à faire en sorte que chaque sujet explicite précisément chaque terme spécifique qu'il emploie (par exemple, si un sujet parle de *sustain* ou d'un son *chaud*, on lui demande qu'il explicite le sens précis qu'il confère à ces termes).

Nous recueillons par écrit ce que dit le musicien, l'entretien est par ailleurs filmé et enregistré (figure 39) et donnera lieu à une analyse linguistique spécifique, recherche qui n'entre cependant ni dans le cadre de nos compétences actuelles ni dans les délais imposés à ce travail. Le guitariste dispose pour jouer, en plus des trois guitares, d'un amplificateur (*Fender*<sup>TM</sup> « Blues Junior<sup>TM</sup> ») et d'une pédale de saturation (*Ibanez*<sup>TM</sup> « TubeScreamer<sup>TM</sup> »), il a donc la possibilité (implicite, car l'ensemble du dispositif lui est décrit sans que soit requise l'utilisation d'un de ses éléments) de jouer les guitares en « son clair » (son sortant de l'amplificateur), « son saturé » (sortant de l'amplificateur, en ayant rajouté la pédale) ou « son acoustique » (sans amplification). Il est important de laisser à





FIGURE 38 – Déroulement d'un test perceptif



FIGURE 39 – Installation pour les tests perceptifs

chacun le choix et la possibilité de jouer les guitares dans ces trois configurations, car chacune correspond à une situation de jeu courante dans le milieu de la guitare électrique. Le guitariste n'écoute pas nécessairement son instrument de la même manière dans chacune de ces trois configurations

Une fois cette phase achevée<sup>12</sup> vient la phase de type « figure imposée ». Il est demandé au musicien — sur chaque guitare — d'exécuter des fragments chromatiques (dont les transcriptions sont données en annexe J) et d'interpréter un morceau d'une vingtaine de secondes. Comme précédemment, cette phase est enregistrée. L'idée de cette partie du test est de recueillir des données non seulement sur les guitares en situation de jeu, mais aussi sur le musicien lui-même et ses pratiques de la guitare (via le morceau librement choisi et interprété par chaque musicien, à condition que l'interprétation et le choix soient identiques pour chacune des trois guitares).

### 3.2 Analyse linguistique des productions verbales

Les données verbales recueillies (enregistrements vidéo et sonore) lors des entretiens avec les guitaristes seront dans les mois qui suivent analysées par Benoît Navarret et Arthur Paté avec des méthodes de la linguistique cognitive, développées en liaison avec les recherches en analyse sensorielle et en psychologie cognitive ([Gai09] ou [GDGD09]). L'analyse linguistique des discours des sujets nous permettra d'obtenir une description et une explicitation de leur expérience sensorielle et des jugements qu'ils portent sur les guitares, en situation de jeu.

### 3.3 Fiches d'évaluation

Nous ne présentons ici que les résultats des réponses à un ensemble de fiches que nous avons demandé au musicien de remplir à la fin du test. La première de ces fiches (reproduite en figure 68 de l'annexe K) demande une évaluation globale et personnelle de chaque guitare. Pour chaque guitare

12. la durée indiquée en figure 38 n'est qu'indicative, la phase s'arrête en réalité quand le guitariste estime avoir fait le tour de ce qu'il pouvait dire sur les guitares

(identifiée par une couleur lors du test, couleurs jaune, orange et vert), le sujet dispose d'une échelle dont il doit d'abord définir les valeurs extrêmes entre lesquelles il inscrit ensuite son jugement (ces bornes peuvent être des notes, des chiffres, des mots, des signes). L'idée est de laisser un maximum de liberté au sujet, mais de conserver un mode d'évaluation (fiches formatées, évaluation écrite) permettant un calibrage des réponses et donc un dépouillement plus rapide que celui des entretiens oraux.

Ensuite, le sujet est invité à revenir sur un certain nombre de critères (qui peuvent être par exemple le *sustain*, le son, l'ergonomie . . .) qu'il a cités au cours de la discussion. Pour chaque critère choisi (nous portons l'attention sur le fait que c'est le sujet qui décide seul des critères qu'il juge suffisamment pertinents pour être traités via ces fiches, nous n'avons ni imposé ni suggéré aucun critère), il lui est délivré trois fiches, correspondant chacune à un mode d'évaluation différent de ce même critère.

La première fiche (reproduite en figure 69 de l'annexe K) reprend l'idée de l'échelle aux bornes libres pour juger chacun des critères choisis par le musicien sur les trois guitares.

La deuxième fiche (reproduite en figure 70 de l'annexe K) demande de noter, sur une échelle de 1 à 10, à quel point le critère retenu contribue/a contribué à l'évaluation globale de la guitare faite précédemment.

Enfin, la troisième fiche (reproduite en section 71) demande de noter, sur une échelle de 1 à 10 dans quelle mesure le sujet aime le critère, sur chacune des guitares. Ces trois dernières fiches sont redistribuées pour chaque critère voulu par le sujet.

### 3.3.1 Analyses lexicales produites dans les différentes fiches

On a d'abord fait l'inventaire de l'ensemble des productions des sujets sur l'ensemble des cases « pourquoi » ou « commentaires » de chacune des quatre fiches, cases dans lesquelles le musicien peut préciser sa pensée sur son jugement, réexpliquer ce qu'il entend par les termes employés, justifier son jugement et son choix d'échelle. . . A cette première étape de l'analyse linguistique (les suivantes seront réalisées hors du cadre de ce stage), il s'agit de dresser un inventaire des ressources de la langue française disponibles pour les locuteurs (musiciens) et qui seront utilisées différenciellement selon les guitaristes, et selon les guitares décrites.

Dans un premier temps, on a présenté la diversité de ces données lexicales dans plusieurs tableaux (et classés par guitare<sup>13</sup>) selon les thèmes suivants :

- le *son* — ou *timbre*, ou *sonorité* — en tableaux 7 et 8
- l'*équilibre* — ou *homogénéité*, ou *balance spectrale* — en tableau 9
- l'*instrument* — ou *lutherie*, ou *réglage* — en tableau 12
- l'*attaque* — ou *réponse* — en tableau 10
- le caractère général de la guitare en tableau 11
- la guitare dans un contexte précis en tableau 13

**Tableaux 7 et 8** A cette étape de l'analyse lexicale, on peut d'abord observer soit un consensus entre les différents locuteurs, soit une grande diversité voire une originalité dans l'expression des différents jugements. Nous pouvons observer par exemple que les mots *rondeur/rond*<sup>14</sup>, *brillant*, *sustain*, *ample/ampleur*, *plein*, *terne*, *équilibré*, *net*, *netteté* sont partagés par plusieurs guitaristes pour décrire les trois guitares. Bien qu'il faille attendre le dépouillement des enregistrements audio des tests, on peut déjà émettre l'hypothèse que ces **mots** sont, dans le discours des guitaristes, des **termes** ; leur usage partagé manifeste que ces mots particuliers tendent à revêtir une signification propre à et partagée par la communauté de spécialistes qui l'utilise, à savoir ici la communauté des guitaristes électriques. En revanche, les mots *mou*, *fluet*, *ferailleux*, *fluteuse*, *moelleux*, *fade*, *sec* n'ont été employés qu'une fois (donc par un seul musicien) ne peuvent être considérés comme des **termes** et leur signification semble relever davantage du sens commun, d'un discours ordinaire que

13. Chaque guitare sera identifiée par son numéro, sa couleur, et son mode de jonction entre le corps et le manche, V pour vissé, T pour traversant, C pour collé.

14. Les mots typographiés en italique indiquent les verbatims (expressions données comme telles par les musiciens)

Tableau 7 – Mots employés pour décrire le *son*

GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
assez mou agréable	douceur/cristal	plus précis belle saturation
globalement fluide		
plus rock équilibré	son équilibré entre graves, . . . . . . médiums, aigus sonorité OK	bon son spectre sonore intéressant . . . . . . en son clean
timbre relativement homogène brouillon en accord relativement net	timbre relativement homogène	timbre relativement homogène
brillant	son ferrailleux assez flûteuse moins brillant	manque de netteté  plus (trop) terne . . . . . . avec beaucoup moins . . . . . . de brillance sonorité terne et sans caractère un peu terne, sourde
nasillarde aigre froid	un peu neutre	son un peu moins personnel
plus sec		fade « coin-coin » son assez rond
un peu trop agressif	joli son, facile à jouer trop brillant, . . . . . . manque de rondeur manque de rondeur	un peu trop rond
manquant un peu . . . . . . de rondeur	pureté et clarté qui . . . . . . donnent de la rondeur	un peu plus rond, agréable plus moelleux
variété de timbres gênante	le manque de variété . . . . . . est dommage moins puissant harmoniques résonnent . . . . . . moins longtemps moins brillante son pas assez « plein »	sonorité moins puissante
très bonne tenue du son		plénitude plein un peu creux timbre et niveau faibles instrument plus riche . . . . . . en couleurs

Tableau 8 – Mots employés pour décrire le « son » (suite)

peu de <i>sustain</i> avec un <i>sustain</i> qui me convient	buzz petit manque de <i>sustain</i>  spectre/résonance plus large	buzz <i>sustain</i> correct et bon peu résonante disparition rapide des basses  plus ample plus de présence et d'ampleur
---	--	--

d'un discours de spécialiste.

**Tableau 9** Ici encore, on peut faire l'hypothèse que les mots *présent*, *agressivité*, *équilibre/équilibré*, *creux/creusée* sont des **termes**, et qu'ils ont ainsi une signification acceptée de manière consensuelle par la communauté des guitaristes dans le contexte de l'évaluation de l'*équilibre*. *Sèche*, *registre* et *polyvalente* restent *a priori* des **mots**.

On peut remarquer dans les tableaux 7, 8, 9 et 10 des jugements qui peuvent apparaître parfois cohérents, et parfois contradictoires. Dans les jugements en apparence cohérents, on voit qu'il est dit plusieurs fois que la guitare verte est *ronde* et *terne* (*sonorité*), avec *beaucoup de résonnant*; que la guitare orange est *moins brillante* et *manque de rondeur* (*sonorité*), *manque de grave(s)* avec des *aigus bien/assez présents* (*équilibre*); et que la guitare jaune a un aspect *brillant* (*sonorité*). Dans les jugements en apparence contradictoires, on peut lire que

- la guitare verte a un son à la fois *plein* et *un peu creux*
- la guitare orange *manque de rondeur* mais possède une *pureté* et une *clarté qui donnent de la rondeur au son*
- la guitare verte a un *sustain correct et bon*, mais est *peu résonante* et souffre d'une *disparition rapide des basses*
- la guitare verte a *beaucoup de mediums* et est en même temps *creusée dans le médium*
- la guitare jaune a un *son équilibré*, mais a une *perte d'équilibre en médium*
- la guitare verte est jugée comme ayant des *aigus agressifs* et *pas d'agressivité dans l'aigu*
- la guitare orange souffre à la fois de *manque de grave* et de *dominance des graves*
- la guitare verte a du *résonnant* et est *peu réactive aux attaques et articulations*
- ...

Un des aspects des recherches à mener dans l'avenir sur ces données perceptives est de comprendre pourquoi ces jugements sont contradictoires (ou du moins se manifestent comme tels dans les discours des musiciens). On peut d'ores et déjà avancer une série d'hypothèses pour identifier les causes des contradictions apparentes :

- bien souvent les jugements sont émis relativement à un « contexte », ainsi il faudra identifier dans quel contexte chaque jugement a été effectué (son clair, son acoustique ...)
- On note aussi que tout le circuit électronique en aval de la guitare était imposé. Les jugements sont soumis aux conditions de test et d'écoute, ce qui recalibre l'écoute de l'instrumentiste
- chaque guitariste émet un jugement relativement à sa propre histoire, sa propre compétence, sa propre pratique et sa propre expérience (y compris au niveau de la verbalisation et de la formulation de cette expérience). Chaque guitariste a donc ses propres attentes en ce qui concerne les instruments, chacun cherche des caractéristiques différentes dans les instruments à tester/acheter/jouer
- pour un même musicien, les jugements varient en fonction du point de vue, en tant que producteur du son ou en tant que récepteur du son peuvent s'avérer très différents, et il peut être délicat de passer d'un point de vue à l'autre

**Tableau 10** Le mot *réponse* semble être — de loin — le terme le plus utilisé pour décrire ce critère d'*attaque*, l'analyse linguistique nous dira si le sens conféré à ce mot est partagé par tous les

Tableau 9 – Mots employés pour décrire l'équilibre

GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
son plus rock, ... ...avec de l'aigu aigus trop présents	aigus bien présents	aigus agressifs
trop aigu en clair, ... ...pas mal en saturé mediums plus faibles un peu trop sèche en ... ...médium et « nasillarde » trop medium creux dans le medium graves manquent de corps	aigus assez présents sur ... ...les dernières cases	agressivité aigu manque d'aigus
	manque de graves	creusée dans le medium beaucoup de médiums
	dominance des graves manque de grave	trop de basses quelques sons un peu ... ...pauvres, lié à des ... ...basses plus fortes disparition rapide des basses
pas très homogène son équilibré entre graves, ... ...médiums et aigus	identique en terme de ... ...timbre du grave ... ...à l'aigu certain « déséquilibre »... ...en solo	un bon équilibre sonore pas d'agressivité ... ...dans l'aigu
son équilibré mais un peu ... ...brouillon en accords	équilibre correct sans ... ...être terrible	son [...] propice à ... ...être utilisé dans des ... ...registres plus nombreux
perte d'équilibre en medium	les aigus sont un peu trop là perte d'équilibre dans ... ...l'aigu (cordes 4 et 3) perte de niveau et de ... ...brillance (cordes 4 et 3)	équilibre bon, on entend ... ...toutes les fréquences
guitare plus polyvalente		bon équilibre en clair ... ...et en saturé

Tableau 10 – Mots employés pour décrire l’*attaque*

GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
manque de réponse ... ...dans le grave		guitare avec du répondant
		réponses variées selon ... ...le lieu du manche
	corps de note un peu ... ...faible par rapport à ... ...son attaque	
mollesse des cordes qui ... ...ne permet pas de ... ...bien doser les attaques	son saturé trop confus ... ...pour bien réagir ... ...aux nuances	peu réactive aux attaques ... ...et articulations
attaque plus riche ... ...beaucoup de caractère	attaques nettes mais neutres	beaucoup de répondant
impossible d’attaquer fort j’ai du mal à faire ... ...répondre la guitare ... ...comme je l’entends	moins claquantes je suis plus à l’aise ... ...dans l’orientation que ... ...je veux donner à la ...réponse de la guitare	réponses très différentes ... ...selon le mode de jeu

guitaristes ou non et s’il peut être considéré comme un **terme** technique du discours des guitaristes.

**Tableau 11** On peut également faire l’hypothèse que les mots *équilibre*, *polyvalent/polyvalence*, *agressif/agressivité*, *relief*, *gain*, *caractère* et *agréable* sont des **termes**. Par contre, les mots *puissante*, *lisse*, *froid*, *sans âme* sont en revanche des **mots** spécifiques d’un seul musicien.

**Tableau 13** Ici on voit que le contexte d’utilisation de la guitare modifie profondément le jugement qu’on en fait. Ainsi chaque guitare semble avoir un style de prédilection (*blues*, *jazz*, *rock* ...), et l’utilisation en son branché (clair ou distorsion/saturation) ou acoustique change beaucoup l’impression produite et le jugement porté sur la guitare.

Dans le tableau 14, on a relevé tous les critères cités et évalués durant cette phase écrite par les sujets, et on les a classés par thème (ainsi par exemple les critères *sustain* et *résonance* sont regroupés, comme le sont aussi les critères *équilibre spectral* et *balance spectrale*). Le nombre de fois que chaque critère/thème est cité est reporté en deuxième colonne du tableau 14.

Nous trouvons quinze critères différents, et ceci après regroupement des critères isolés dans plusieurs thématiques. On voit ici la diversité des jugements parmi les différents sujets : non seulement le choix des critères pour qualifier les guitares semble personnel (aucun guitariste ne choisit exactement les mêmes critères que les autres), mais encore ces critères s’appliquent différemment à chaque guitare qui est caractérisée comme un individu singulier difficilement classable sur des échelles comparables. C’est en présageant de cette tendance que nous avons tenu dès les premiers entretiens à laisser les sujets libres du choix des critères plutôt que d’imposer des critères (les nôtres) sans pouvoir les justifier plus avant.

On note cependant une hiérarchie dans l’importance des différentes thématiques : la thématique la plus souvent choisie pour évaluer les guitares est le *timbre*, puis viennent les thématiques (intimement liée à la précédente) de l’*équilibre* du timbre et du *son*. C’est seulement ensuite que vient le critère du *sustain*, que nous croyions au début de ce travail le critère le plus important...

### 3.3.2 Jugements sur échelles

On a réuni, au sein des évaluations globales, toutes les échelles proposant une notation chiffrée et/ou convertible en une note entre 0 et 10 indiquant le degré de préférence de chaque guitare. A titre d’exemple, on a gardé toutes les échelles inscrivant le jugement global entre deux notes, typiquement de 0 à 20, ou les échelles de type *j’aime/j’aime pas*, *me convient/ne me convient pas*, mais les échelles

Tableau 11 – Mots employés pour décrire le caractère général de la guitare

GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
meilleure dynamique meilleur équilibre		bon équilibre et ... ...bonne définition
	elle n'a pas les qualités des ... ...deux autres et cumule ...autres et cumule leurs défauts au milieu des deux autres ... ...peut-être moins d'intérêt	
	l'instrument le plus homogène	puissante ample
moins agressive que ... les deux autres certaine agressivité agréable à jouer ... ...et à écouter	agréable à jouer	polyvalente
prise en main plus facile	confortable physiquement ... et soniquement	polyvalence/présence
manque cruellement de relief ... ...c'est lisse	sans trop de relief ...manque un peu de tout le manque de variété ... ...est dommage	
côté froid, sans âme pas assez de gain	pas assez de gain niveau de sortie moins gros	pas assez de gain
elle dispose d'un vrai caractère caractère affirmé	agréable à jouer	

Tableau 12 – Mots employés pour décrire l'*instrument*

	GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
MANCHE	manche trop fin doux  pas assez épais  défaut structurel ... ...du manche	manche « top » manche un peu ... ...moins agréable bonne épaisseur	manche OK doux  finition des frettes ... ...moyenne
MÉCANIQUES	trop petites jeu important	trop petites léger jeu	trop petites jeu important
POIDS	poids un peu élevé pas assez lourde poids plus important	pas assez lourde plus léger à porter ... ...donc agréable	pas assez lourde
TOUCHER	toucher doux		toucher assez dur
RÉGLAGE	réglage « top » à régler  action des cordes ... ...mieux réglée beaucoup de « frise » sillet mal réglé	bon réglage pas très bien réglée	réglage trop haut hauteur cordes ... ...trop haute
ACCORD/JUSTESSE	problèmes de justesse	ne tient pas l'accord	problèmes de justesse
NIVEAU DE SORTIE		niveau de sortie ... ...plus faible	niveau plus faible
CORDES	mollesse des cordes  cordes proche manche ... ...très bien		plus de tension dans ... ...les cordes cordes plus dures
CONFORT	confort appréciable  confortable	meilleure sensation à ... ...la prise en main	meilleure sensation à ... ...la prise en main confortable



Tableau 13 – Mots employés pour décrire la guitare dans un contexte précis

GUITARE JAUNE (G2,V)	GUITARE ORANGE (G9,T)	GUITARE VERTE (G4,C)
<p>mériterait tests sur d'autres ...                      ...systèmes pour voir à quel ...                      ...point elle permet de jouer                      plus faite pour le blues et ...                      ...le rock que le jazz                      blues-boogie                      bien en son clair</p> <p>son saturé trop confus pour ...                      ...bien réagir aux nuances                      surtout avec un léger <i>overdrive</i></p> <p>trop aigu en clair                      ...pas mal en saturé                      en acoustique je ne ...                      ...l'appréciais pas du tout</p>	<p>saturation un peu confuse</p> <p>ma préférée en acoustique</p> <p>ma préférée en électrique</p>	<p>à tester avec un autre ...                      ...système de son</p> <p>plus jazz ?</p> <p>répondant qui permet de ...                      ...bien nuancer, en clair ...                      ...comme en saturé                      bon équilibre en clair et ...                      ...en saturé                      belle saturation assez précise                      à l'aise à peu près partout ...                      ...une fois branché avec ou                      ...sans pédale d'<i>overdrive</i></p> <p>ma préférée en acoustique</p> <p>ma préférée en électrique</p>

Tableau 14 – Critères cités et nombre de fois qu'ils sont cités

CRITÈRE	NOMBRE D'OCCURENCES
Timbre en général	16
Homogénéité du timbre / Equilibre, balance spectral(e)	9
Son / Sonorité / Rendu sonore	8
<i>Sustain</i> / Résonance	7
Ergonomie / Confort / Jouabilité	6
Réglage / Manche / Lutherie	6
Sensibilité à la dynamique / Attaque	3
Poids	3
Esthétique / Couleur	2
Mécaniques	1
Jeu en accords	1
Solo rock	1
Niveau sonore	1
Justesse / Tempérament	1
Expressivité de l'instrument	1

du type *équilibrée/pas équilibrée*, ou *son pauvre/son riche* n'ont pas été traitées ici. Une moyenne a donc été effectuée sur les 16 échelles/notations qui ont été traitées, on reporte les notes en tableau 15.

Tableau 15 – Notes (sur 10) à l'évaluation « globale et personnelle » pour chaque guitare

Guitare jaune (G2,V)	Guitare orange (G9,T)	Guitare verte (G4,C)
5,4	5,6	5,7

On voit alors que les notes sont très proches et qu'il serait difficile d'en déduire une préférence générale, bien que la guitare verte semble avoir une note très légèrement plus haute.

Une analyse quantitative a également été menée sur les données issues des trois fiches d'évaluation de chaque critère. Pour la fiche d'évaluation via des échelles aux bornes libres, on n'a encore une fois retenu que les échelles et bornes permettant une interprétation ou une conversion en terme de notation quantitative (les bornes du type *0/20 - 20/20*, *mauvais - bon*, *moins - plus* ou encore *faible - fort* ont été conservées et ramenées à la même échelle, les bornes du type *terne - brillant*, *sourd - cristallin* n'ont pas été traitées ici, en raison de la difficulté d'opérer à une conversion vers une notation chiffrée).

Les évaluations à la métrique imposée « contribue/ne contribue pas au jugement global » et « j'aime/j'aime pas » ont également été analysées pour ces critères. Les différents critères choisis ont été regroupés comme dans le tableau 14 et sept groupes de critères ont été dégagés :

- critères *confort, toucher, manche, réglage, lutherie, facilité de jeu, hauteur du sillet* → confort/ergonomie
- critères *résonance, sustain, vie du son, profondeur* → sustain/résonance
- critères *homogénéité, équilibre harmonique/sonore/tonal, balance spectrale* → équilibre
- critères *sensibilité à la dynamique, attaque, réponse au coup de médiator* → attaque
- *pureté, clarté, sonorité, rendu sonore, son, agressivité des aigus, spectre, brillance* → son
- *justesse et tempérament, mécaniques* → justesse
- *poids, masse* → poids

Les tableaux 16, 17 et 18 donnent les moyennes (notes sur 10) obtenues pour chaque groupe de critères sur chaque guitare, pour chaque mode d'évaluation (= pour chaque fiche).

Tableau 16 – Notes (sur 10) à l'évaluation à échelle « libre » de différents critères, pour chaque guitare

Critère	Guitare jaune (G2,V)	Guitare orange (G9,T)	Guitare verte (G4,C)
attaque	3,6	5,6	6,8
équilibre	5,3	6,5	6,5
<i>sustain</i> /résonance	6,7	5,9	6,5
Confort/ergonomie	4,6	5,4	5,8
son	4,8	5,7	5,8
justesse	3,3	2,8	3,9
poids	8,1	1,4	1,5

Nous examinons les tableaux 16, 17 et 18 en parallèle, en regard de chaque critère. Notons qu'en raison de la sélection des échelles qu'on a faites sur leur capacité à être convertie en note de 0 à 10, on peut interpréter les notes du tableau 16 comme des échelles de jugement sur le critère allant de *mauvais* à *bon* (confort, résonance, équilibre, attaque, son), ou de *moins* à *plus* (justesse, poids).

**Confort** La guitare verte (manche collé) a apparemment le meilleur confort, devant la guitare orange (manche traversant) et la guitare jaune (manche vissé). Cependant, c'est sur la guitare orange que le confort est le plus aimé. On remarque que pour la guitare jaune, le confort est le moins bien jugé, et c'est justement pour cette guitare-là que le critère *confort/ergonomie* a le plus contribué (entre les trois guitares) à l'évaluation globale.

Tableau 17 – Notes (sur 10) à l'évaluation de la contribution de différents critères à l'évaluation globale, pour chaque guitare

Critère	Guitare jaune (G2,V)	Guitare orange (G9,T)	Guitare verte (G4,C)	Moyenne
attaque	7,3	7,7	9,3	8,1
équilibre	8	8,2	9	8,4
<i>sustain</i> /résonance	6,9	6,7	7,6	7,1
Confort/ergonomie	7,8	6,9	6,6	7,1
son	7,8	7,8	8	7,9
justesse	7,5	6,5	6	6,7
poids	6,5	5,5	5,5	5,8

Tableau 18 – Notes (sur 10) à l'évaluation de l'appréciation (j'aime/j'aime pas) de différents critères, pour chaque guitare

Critère	Guitare jaune (G2,V)	Guitare orange (G9,T)	Guitare verte (G4,C)
attaque	5,3	6,3	5,7
équilibre	6,3	5,4	6,8
<i>sustain</i> /résonance	6,4	6,4	5,4
Confort/ergonomie	4,8	6	5,7
son	6,2	6	6,3
justesse	3,5	3	4,5
poids	4	6	6

**Sustain** Un résultat qui nous a étonné est que le *sustain* de la guitare orange (manche traversant) est perçu comme le moins bon, et il n'est même pas le plus apprécié. Au contraire, c'est le *sustain* de la guitare jaune qui est jugé comme étant le meilleur, et le plus plaisant. C'est un résultat important : pour ces guitares et ces guitaristes, c'est la guitare à manche vissé qui offre le meilleur *sustain*, ce qui est contraire aux *a priori* de la communauté guitaristique . . .

**Équilibre** L'équilibre spectral des guitares orange et verte est jugé de qualité semblable, cependant celui de la guitare verte est plus apprécié que celui de la guitare orange. La guitare jaune, dont l'équilibre était jugé le moins *bon*, est finalement plus appréciée que la orange, qui offrait l'*équilibre* le meilleur. Ces avis en apparence contradictoires sont peut-être dûs au fait qu'il est difficile d'évaluer un critère de manière totalement isolée des autres critères, notamment la tâche de séparer *équilibre* et *qualité du son* semble difficile.

**Son** Du moins bon *son* au meilleur *son*, les guitares sont classées dans l'ordre jaune — orange — verte, en revanche de la moins aimée à la plus aimée au niveau du son, l'ordre est alors orange — jaune — verte, comme selon le critère de l'*équilibre*. Remarquons que c'est pour la guitare verte, qui est la mieux appréciée au niveau du son, que ce critère a le plus contribué à l'évaluation globale de la guitare.

**Attaque** C'est la guitare verte qui est jugée avoir une *attaque* de meilleure qualité ; la guitare orange offrant une qualité d'*attaque* intermédiaire est cependant la plus appréciée. C'est encore un résultat important, si la guitare *répond instantanément* et *à toutes les différents modes de jeu*, elle ne sera pas forcément pour autant très bien appréciée, l'instrument pouvant être perçu comme trop facile à jouer et sans *personnalité*.

**Justesse** Les guitares ont globalement de mauvaises notes sur ce critère. Elles souffraient en effet d'un problème de réglage de longueur de corde (diapason).

**Poids** La guitare jaune est effectivement la plus lourde (2,940 kg contre 2,720 kg pour la verte et 2,730 kg pour l'orange). En revanche, dans le tableau 16 elle paraît perçue comme beaucoup

plus lourde que les deux autres, alors que dans le tableau 18, l'écart d'appréciation est réduit. Ceci est à comparer avec les notes des contributions de chaque critère à l'évaluation globale de la guitare, où le critère *poids* est le critère le moins important.

Enfin, on peut ordonner les différents critères suivant l'importance relative qu'ils ont dans le jugement global de la guitare, cet ordre est :

1. Equilibre
2. Attaque
3. Son
4. Confort/Ergonomie
5. *Sustain*/Résonance
6. Justesse
7. Poids

On voit ici que le critère du *sustain* n'a pas été — pour nos sujets et nos guitares — un des critères les plus importants, et qu'avant lui passent les critères timbraux, de confort et de sensation de réactivité à la diversité des sollicitations de la main droite (doigt, médiator).

### 3.3.3 Conclusion sur les jugements des musiciens

En conclusion, ces résultats quantitatifs vont nous permettre de calibrer nos instruments de mesure du subjectif pour les travaux futurs : la diversité des critères cités, des échelles choisies, des jugements portés et des mots employés justifient *a posteriori* notre méthode, qui est de proposer un maximum d'échelles libres à bornes non fixées, de n'imposer aucun critère à privilégier, et d'accorder une importance plus grande aux données issues de la verbalisation lors des entretiens, bien que la période de traitement de ces données soit beaucoup trop longue pour la durée de ce stage.

## 4 Etude comparative vibro-acoustique et perceptive

L'idée de cette partie est d'amorcer la mise en place de relations entre attributs perceptifs et indicateurs « physiques » calculés avec des méthodes de traitement du signal à partir de signaux vibratoires ou acoustiques issus des quatre guitares sélectionnées pour les tests perceptifs. Le travail effectué jusque là a consisté en la vérification d'indicateurs (et de leurs liens avec certains attributs perceptifs) proposés dans la littérature. Les indicateurs dont nous allons parler sont : le centre de gravité spectrale, le temps d'attaque, et le temps de décroissance.

### 4.1 Centre de gravité spectrale

Comme [Fuj09] et [KMS94], on définit, pour un signal donné le centre de gravité spectrale comme :

$$CGS = \frac{\sum_k k A_k}{\sum_k A_k} \quad (13)$$

où  $A_k$  est l'amplitude de l'harmonique de rang  $k$ .

Cet indicateur estime la répartition de l'énergie entre les différents partiels du signal. Ainsi, plus le  $CGS$  s'élève, plus l'énergie passe du fondamental aux partiels. Pour fixer les idées, on vérifie aisément qu'un son pur aura un «  $CGS$  » de 1, et un son ayant  $N$  harmoniques de même amplitude aura un «  $CGS$  » de  $\frac{N+1}{2}$ . Dans la littérature, cet indicateur est conseillé pour rendre compte de la notion de *brillance* ou de *clarté* ([Fuj09], [KMS94])

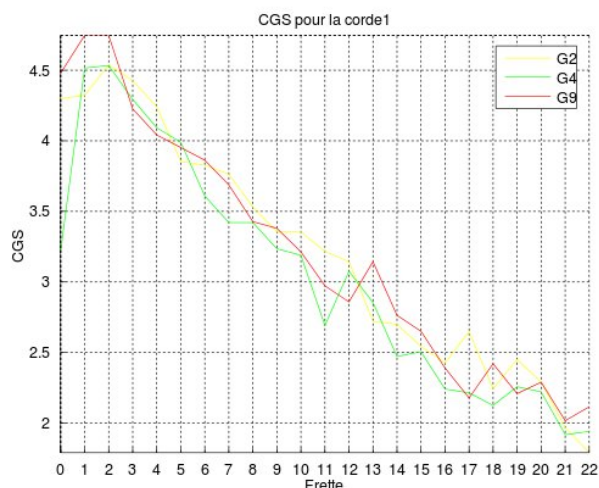


FIGURE 40 – CGS pour la corde 1, toutes les frettes, toutes les guitares

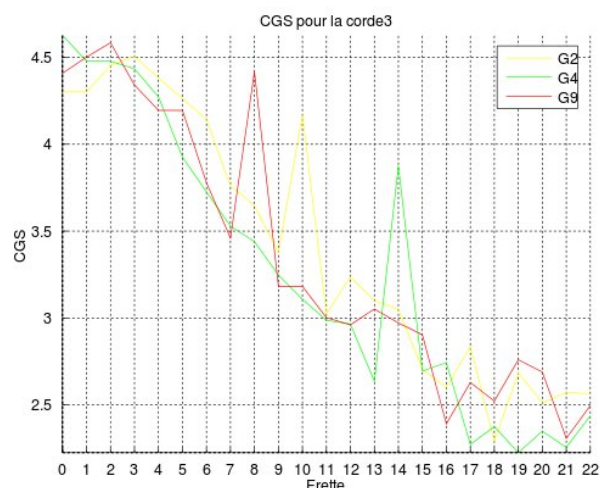


FIGURE 41 – CGS pour la corde 3, toutes les frettes, toutes les guitares

On peut confronter le «  $CGS$  » au caractère *aigu/grave* des guitares, en faisant l'hypothèse qu'une sonorité *aiguë* aura un «  $CGS$  » plus grand qu'une sonorité *grave*. On peut déduire du tableau 9 que les guitares jaune (2) et orange (9) ont — certes de peu — une sonorité plus *aiguë* que la verte (4). Sur la figure 41, qui représente l'évolution du «  $CGS$  » pour toutes les notes sur la corde 3 de chaque guitare, on peut voir que la courbe du «  $CGS$  » des guitares 2 et 9 est souvent légèrement au-dessus des courbes des «  $CGS$  » des guitares 3 et 4. Ce n'est en revanche pas le cas pour la corde 1 (figure 40). Il est donc difficile de conclure à un lien entre le «  $CGS$  » et l'aspect *aigu* de la sonorité.

### 4.2 Longueur de son

Notre mesure de la longueur de son sera celle décrite en section 2.6, c'est-à-dire qu'on l'estime par le calcul du « T30 ». D'après les sujets de nos tests, l'ordre des guitares par la qualité de leur

*sustain* (sans aucun doute par la durée de tenue/décroissance du son) est : jaune — verte — orange. L'ordre de préférence est : jaune — orange — verte.

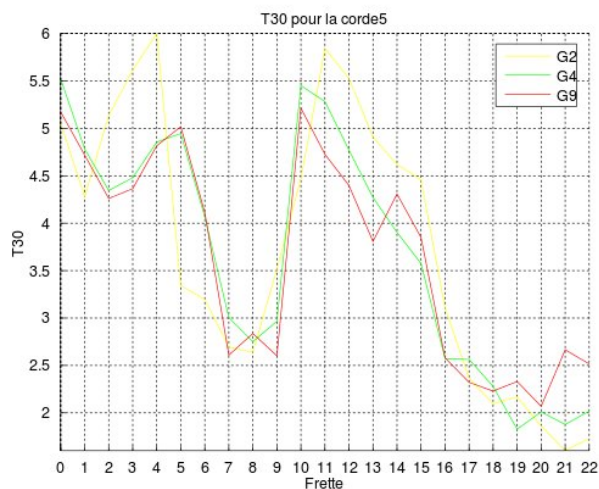


FIGURE 42 – « T30 » pour la corde 5, toutes les frettes, toutes les guitares

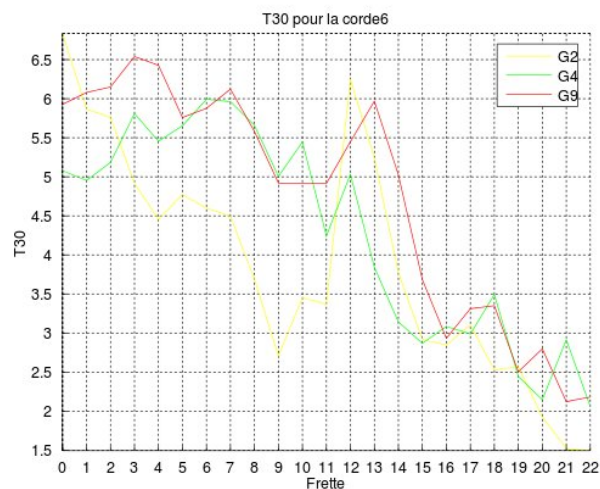


FIGURE 43 – « T30 » pour la corde 6, toutes les frettes, toutes les guitares

Sur la figure 66 (les tracés des « T30 » pour toutes les cordes sont donnés en annexe I), la guitare 2 (jaune) a souvent un « T30 » inférieur à ceux des deux autres guitares. La guitare jaune est pourtant celle qui est jugée comme ayant le meilleur *sustain*...

Sur la même figure (66), la guitare 9 (orange) offre un « T30 » souvent légèrement supérieur à celui de la guitare 4 (verte), ce qui va dans le sens des notations du tableau 18 (notation de l'appréciation (« j'aime/j'aime pas ») du *sustain*).

Sur la figure 65, la guitare 2 (jaune) a cette fois-ci souvent un « T30 » supérieur à ceux des deux autres guitares, cependant les trois courbes ont des allures très semblables, les écarts sont toujours minimes, et la courbe du « T30 » de la guitare 2 n'est pas systématiquement au-dessus des autres.

L'hypothèse d'expliquer la sensation de longue tenue de son (*sustain*) par l'observation de grands « T30 » est peut-être trop restrictive, l'impression de notes qui durent/résonnent longtemps est également très certainement liée à des aspects de l'ordre du timbre. Dans les critères choisis par les musiciens pour qualifier les guitares, on en remarque certains allant dans ce sens : ont été cités les critères *vie du son profond*, *expressivité de l'instrument* et *spectre sonore / résonance*. On voit que l'écoute de la résonance et du *sustain* a aussi une dimension spectrale, comme par exemple l'écoute des variations se produisant au sein du spectre lors de la décroissance temporelle (en intensité) du son, c'est dans cette direction que se poursuivront les prochaines investigations pour trouver des indicateurs physiques pertinents rendant compte du *sustain* et de sa perception).

### 4.3 Temps d'attaque

Les guitaristes ayant testé nos guitares ont souvent parlé d'*attaque*, de *réponse à l'attaque*... Après discussion avec les guitaristes, il semble que ces termes revêtent une double signification.

On va se doter d'un indicateur nommé « temps d'attaque », et on adoptera la définition de [BM86] : le temps d'attaque est le temps que met l'amplitude du signal à passer de 10 % à 90 % de sa valeur maximale. Un schéma explicatif est donné en figure 44. D'après les premiers résultats de l'étude perceptive (section 3) La guitare verte est la guitare qui offre la meilleure sensibilité à l'attaque, la meilleure réponse, ensuite vient la guitare orange puis la guitare jaune. L'ordre d'appréciation de l'*attaque* est quant à lui : guitare orange (la plus appréciée) — guitare verte — guitare jaune (la moins appréciée).

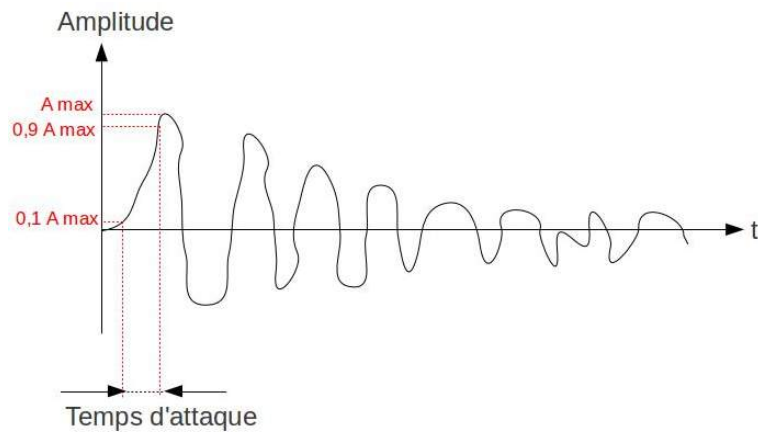


FIGURE 44 – Calcul du temps d'attaque

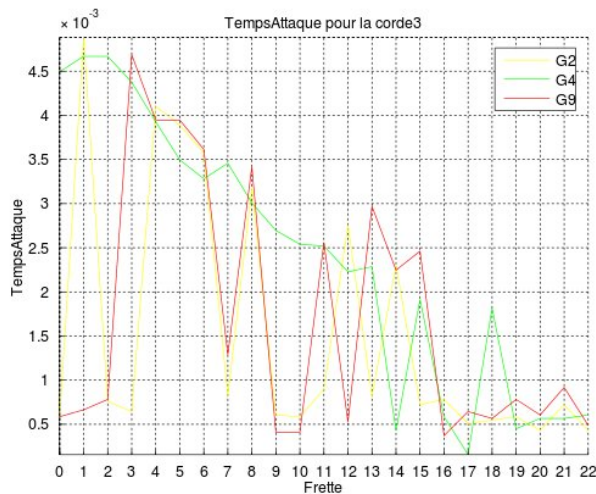


FIGURE 45 – Temps d'attaque pour la corde 3, toutes les frettes, toutes les guitares

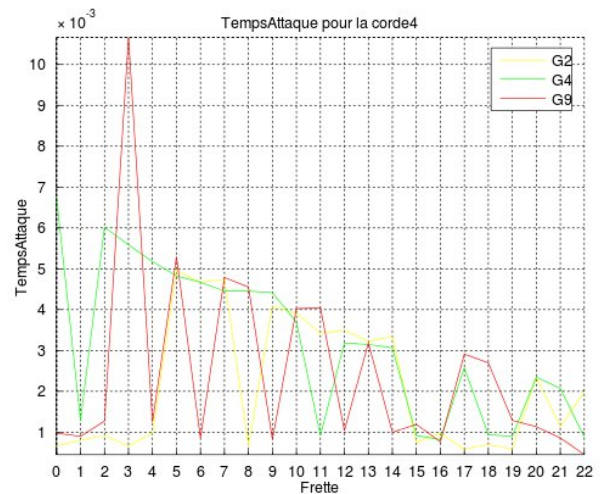


FIGURE 46 – Temps d'attaque pour la corde 4, toutes les frettes, toutes les guitares

On voit sur les figures 45 et 46 qu'aucune des guitares ne semble présenter un temps d'attaque systématiquement plus court ou plus long que les autres guitares. En particulier, les guitares 4 et 9 (les mieux classées du point de vue de l'attaque) ne se démarquent pas par la longueur de leur temps d'attaque.

Par contre, on remarque que la guitare 4 paraît présenter le temps d'attaque le plus homogène le long du manche. C'est sans aucun doute une piste à explorer par la suite, le temps d'attaque (et vraisemblablement d'autres critères) n'est peut-être pas évalué dans l'absolu, mais par observation de ses variations internes à la guitare.

## 5 Conclusion et perspectives

Au cours de l'étude vibratoire, nous avons cherché à vérifier les résultats de la littérature sur la guitare électrique *solid body*.

Le lien entre conductance (respectivement élevée ou moindre) et « T30 » (respectivement court ou long) énoncé par [FZ99] n'est pas systématiquement vérifié. Il existe même pratiquement autant de cas où la loi est infirmée que de cas où la loi est confirmée. Comme il semble censé que l'explication des *dead spots* réside tout de même dans la présence de phénomènes d'amortissement de la vibration de la corde, ces phénomènes doivent faire l'objet d'une modélisation, puis de mesures et de simulations. Ceci sera effectué dans le cadre de la thèse « Vibro-acoustique de la Guitare électrique » qui débute en octobre 2011 et qui constitue la suite de ce stage.

Une modélisation complète de la corde vibrante (avec raideur, amortissements visqueux, visco- et thermo-élastiques, d'après entre autres [VC93]) couplée à la structure vibrante constituée par le manche et le corps est d'ores et déjà en cours. La modélisation se fonde et se fondera sur les travaux de [Woo04a] [Woo04b] repris par [Bar10a]. La comparaison entre les signaux de guitares enregistrés avec les signaux synthétisés (en prenant en compte l'amortissement dû au couplage, ou en n'étudiant que les autres mécanismes d'amortissement) nous permettra de déterminer l'influence du couplage. L'interaction entre le doigt, la corde et la frette sera aussi étudiée en profondeur, en partant de travaux tels que [Eva11]. Enfin, les phénomènes mécaniques seront comparés aux phénomènes électromagnétiques, afin d'établir une hiérarchie des contributions à l'amortissement des cordes par exemple.

Un autre résultat important de l'étude mécanique est que la variabilité (en fréquence, amortissement, déformée modale ...) entre deux guitares du lot de neuf et la variabilité entre deux guitares d'une même famille sont au moins aussi importantes. Ceci est probablement dû à certaines (minimes) différences de lutherie qui subsistent néanmoins entre trois guitares d'une même famille, à la variabilité du bois (inhomogénéités de masse, de souplesse ...).

Il reste néanmoins (surtout après l'étude perceptive) que le mode de jonction entre le corps et le manche n'est pas un paramètre « miracle » et que la qualité des bois et surtout du luthier sont sans doute primordiaux.

L'étude perceptive reste un chantier en friche, compte tenu de la quantité énorme (mais riche, du point de vue scientifique) de données récoltées, mais on a vu apparaître certains éléments fort concluants et instructifs, notamment la difficulté qu'on a de parler de ce qu'on entend, et ce qui en découle : le dépouillement des verbalisations nous renseignera sur les **termes** (mots partagés) et **mots**, sur les significations communément admises ou non... L'étude perceptive et linguistique, dans son état actuel, et bien qu'inachevée, nous permet tout de même d'appréhender avec beaucoup plus de visibilité les prochains tests en rapport avec le musicien et sa perception, en tenant compte de la diversité des écoutes, des approches, des critères...

En conclusion, ce travail indique de nombreuses pistes pour la poursuite des travaux sur le comportement vibratoire et acoustique de la guitare électrique *solid body*, et constituera une solide base pour le départ de la thèse précédemment annoncée, qui s'attachera à maintenir des liens renforcés avec la partie linguistique et perceptive.



# Annexes

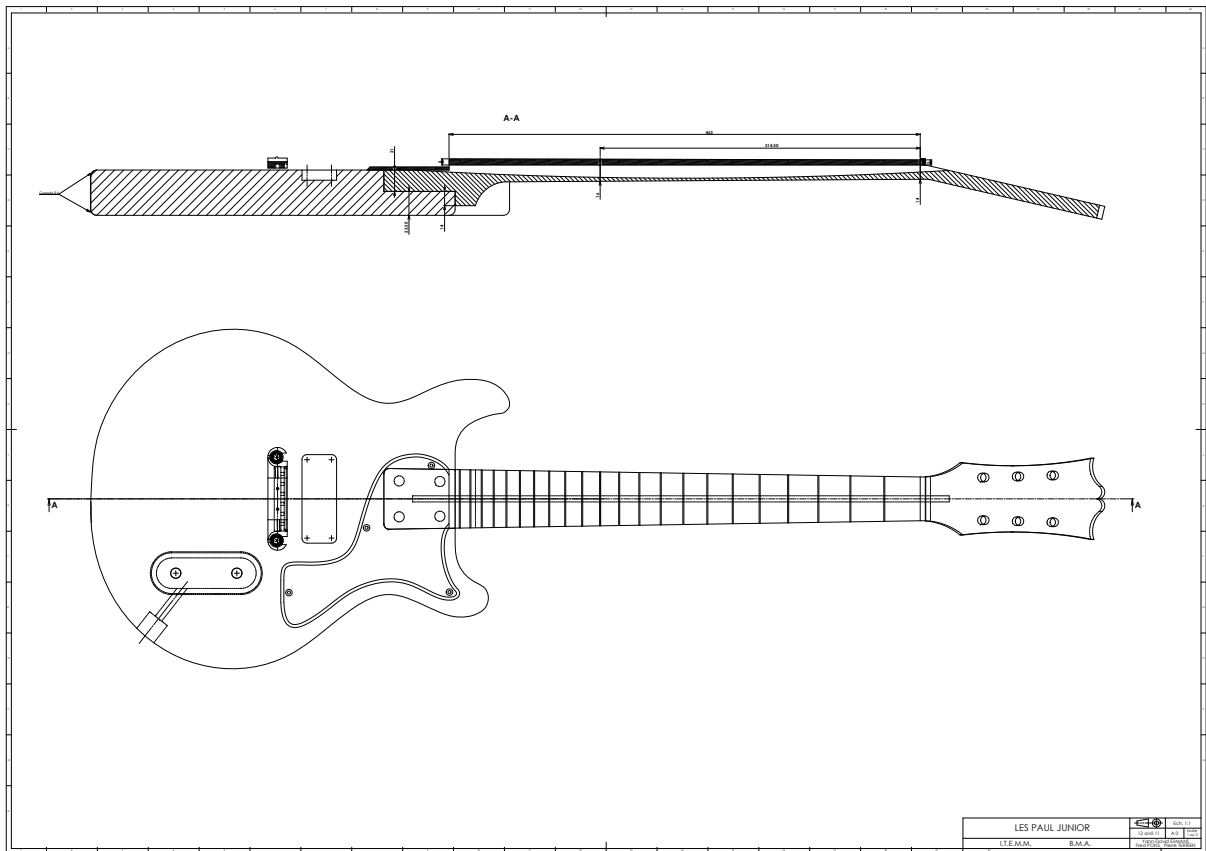
## A Cotes et poids des neuf guitares

NAVARRRET Benoît – Relevé des cotes des guitares  
 Mercredi 4 mai 2011 : Visite ITEM – Relevé de cotes des 9 guitares + photographies  
 Guitares non cordées, sans accastillage mais assemblées

Guitares	Touche Longueur (mm)	Touche Epais. (mm)	Touche Largeur Sillet (mm)	Touche Largeur 12 <sup>e</sup> frette (mm)	Touche Largeur 22 <sup>e</sup> frette (mm)	Cavité micro Distance 2 <sup>e</sup> fret. 1 <sup>er</sup> bord cavité micro (mm)	Cav. Mic Distance 2 <sup>e</sup> bord cavité micro centre pivot (mm)	Manche Epais. Sillet (mm)	Manche Epais. 12 <sup>e</sup> frette (mm)	Manche Epais. Talon 22 <sup>e</sup> frette (mm)	Corps Epais. (mm)	Corps Longueur dans l'axe depuis limite échancre (mm)	Tête Longueur depuis sillet jusq. Haut arrondi (mm)	Poids idem Horiz/ Vertical (kg)	Dessin Tête Non creusée	Dessin Tête Creusée	Type de jonction de manche
1	465	45	41/2	51,2	57	121/2	25	20	23	45	45	359	179	3,000	X		Visé
2	465	45	43	52	57	120/1	25	20	20/1	44	45	360	179	3,100	X		Visé
3	465	45	43	52	57	122	25	21	23	45	45	358/9	178	3,100		X	Visé
4	464	45/6	43	53	56	122	25	20	22	45	45	362	178	2,750		X	Collé
5	464	45	42	52	57	120	25	19	22	45	45	358	179	2,950	X		Collé
6	466	45	43	51	57	125	25	19	22	46	45	358	179	2,900		X	Collé
7	463	45	42	51	55	121	26	19	22	44	45	360	179	2,800	X		Trav.
8	460	45	41	52	56	112	30	20	22	45	45	360	179	2,850	X		Trav.
9	467	45	42,5	52	57	125	25	20	22	44	44	360	177	2,800		X	Trav.

4 mai 2011

## B Schéma des guitares à manches vissé et collé, montées



Ce schéma a été réalisé par Yann-David Esmans, Fred Pons et Pierre Terrien.

## C Définition des orientations et numérotations

On donne ici une brève définition d'abréviations ou de termes qui sont employés dans ce mémoire.

- X : axe X (on donne en figure 48 l'orientation adoptée durant ce travail)
- Y : axe Y
- Z : axe Z
- Intercorde : espace entre deux cordes adjacentes. Sur la figure 47, on appelle « 43 » l'intercorde où est collé l'autocollant 32, « 21 » l'intercorde où est collé l'autocollant 34 et « 65 » l'intercorde où est collé l'autocollant 33.
- FRF YY : FRF mesurée selon l'axe Y sous une excitation suivant l'axe Y du repère
- FRF YZ : FRF mesurée selon l'axe Z sous une excitation suivant l'axe Y du repère
- ...
- Pour les divers éléments de lutherie constituant une guitare électrique, on montre en figure 49 un schéma commenté d'une guitare électrique.



FIGURE 47 – « Intercordes »

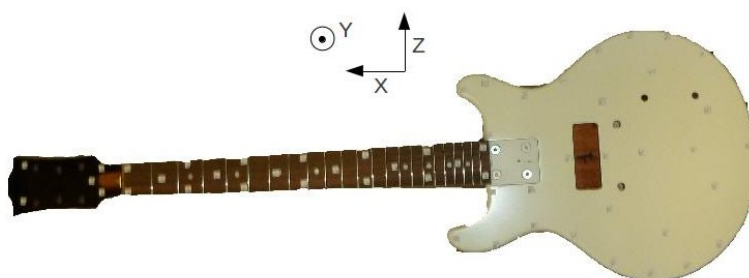


FIGURE 48 – Définition des axes pour les mesures de FRF

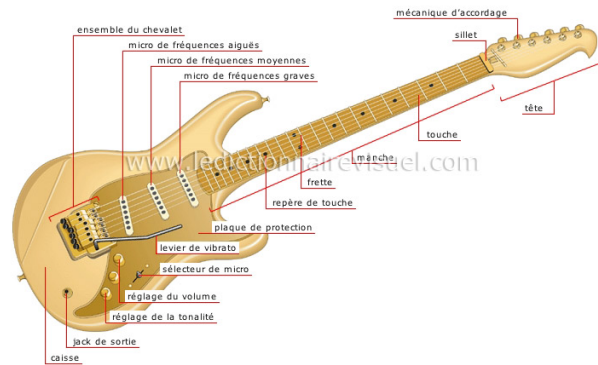


FIGURE 49 – Vue éclatée d’une guitare électrique, d’après [vis11]

## D Modan© et l’analyse modale expérimentale

Pour l’analyse modale expérimentale et l’identification modale, on a utilisé le logiciel Modan©, développé au département « Mécanique appliquée » de l’Institut FEMTO-ST (Franche Comté Electronique Mécanique Thermique et Optique - Sciences et Technologies). Modan© permet de déterminer à partir des mesures vibratoires une base modale expérimentale, par identification modale (un schéma de principe est rappelé en figure 50).

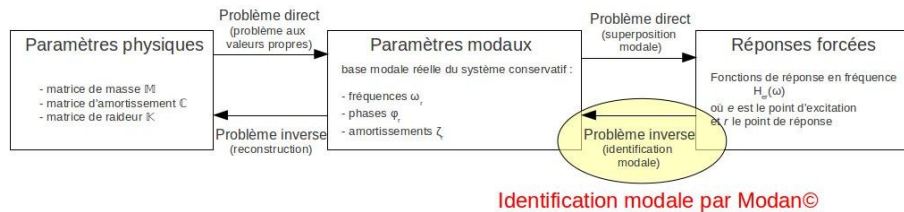


FIGURE 50 – Principe de l’identification modale

Modan© prend en entrée les signaux d’accélération (auquel a été appliquée, dans le domaine temporel, une fenêtre exponentielle décroissante) et de force (auquel a été appliquée, dans le domaine temporel, une fenêtre porte) acquis en chaque point du maillage, ainsi que la définition géométrique du maillage.

L’identification modale est fondée sur la modélisation d’une structure complexe comme une superposition de sous-systèmes à un degré de liberté (voir [Fuj09] ou [Pir]) :

$$H_{ij}(j\omega) = \sum_{k=1}^N \frac{r_{ijk}}{j\omega - \lambda_k} + \frac{r_{ijk}^*}{j\omega - \lambda_k^*} \quad (14)$$

est la fonction de transfert entre les points  $i$  et  $j$ ,  $N$  est le nombre de degrés de liberté à identifier.  $r_{ijk}$  étant le résidu pour le mode  $k$ ,  $*$  représente le complexe conjugué, et  $\lambda_k$  est le pôle complexe pour le mode  $k$  qui se réécrit  $\lambda_k = \delta_k + j\omega_k$ ,  $\delta_k$  étant le facteur d’amortissement du mode  $k$  et  $\omega_k$  la pulsation du mode  $k$ . Les paramètres  $\omega_k$  et  $\delta_k$  sont justement ceux qui seront estimés par le logiciel Modan©.

La méthode d’identification utilisée durant ce travail est la méthode « LSCF » (*Least Square Frequency Domain*). Comme le nom l’indique, cette méthode fonctionne dans le domaine spectral. Bien que faute de temps, les identifications modales effectuées lors de ce stage l’ont été dans un

contexte mono-référence, cette méthode peut être également utilisée dans un contexte multi-références (avec plusieurs accéléromètres, les mesures ont été faites, mais pas encore traitées). La méthode est fondée sur une identification des paramètres modaux complexes par une estimation des moindres carrés. L'ordre du modèle est augmenté progressivement, et la sélection des modes se fait par sélection manuelle des pôles stables sur le diagramme de stabilisation (graphique en haut à gauche de la figure 51). A partir de cette sélection de pôles, les FRF sont synthétisées par le logiciel (graphique en haut à droite de la figure 51, la courbe verte est la courbe synthétisée à partir de la courbe bleue, FRF entre les points 49 et 26).

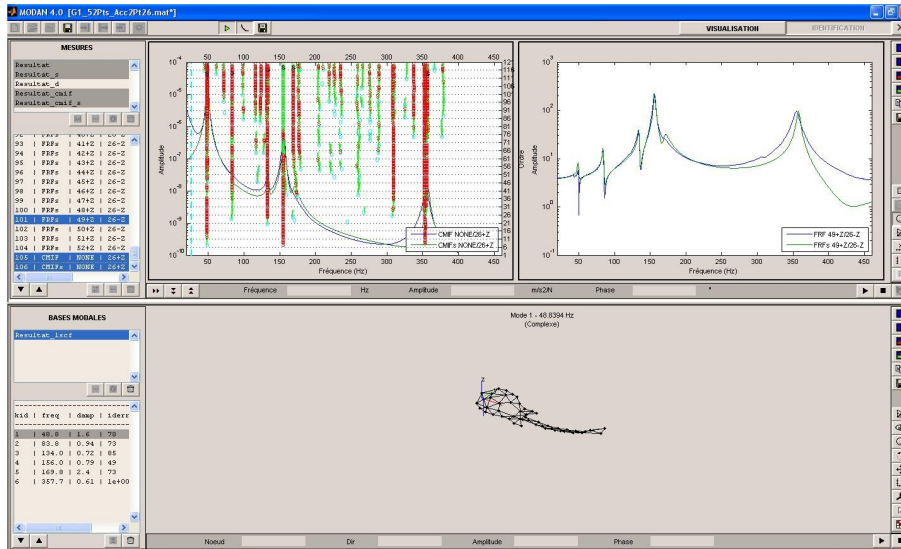


FIGURE 51 – Interface de Modan© — mode « identification »

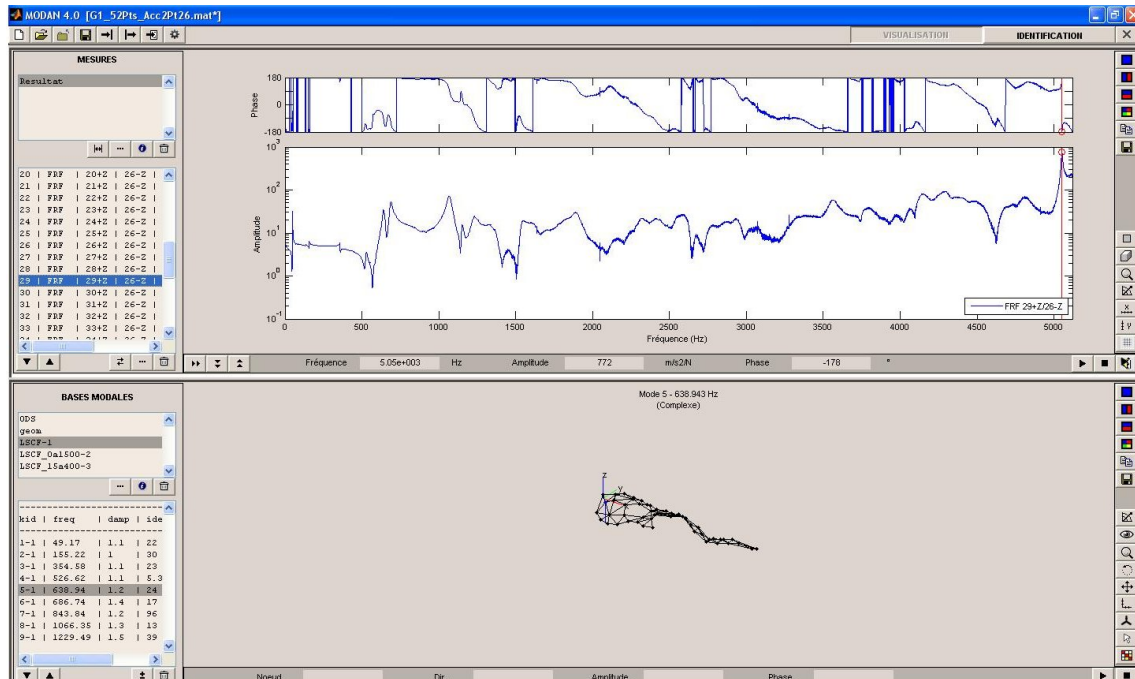


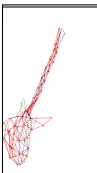
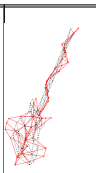
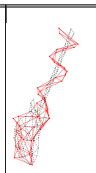


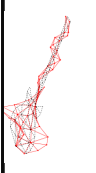
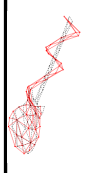


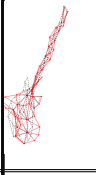
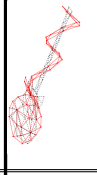


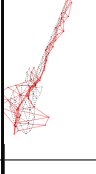

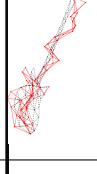


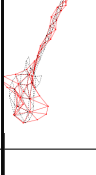
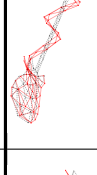
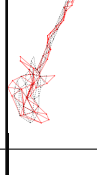


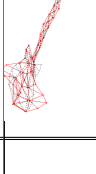



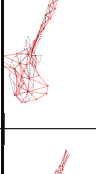


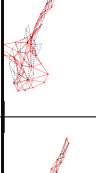
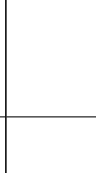


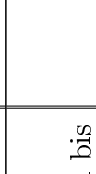

FIGURE 52 – Interface de Modan© — mode « visualisation »

Modan© propose également le calcul d'indicateurs tels que le « MPC » (*Modal Phase Colinearity*), ou le « MAC » (*Modal Assurance Criteria*).

# E Analyse modale pour les neuf guitares non équipées

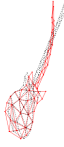

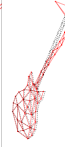
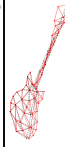


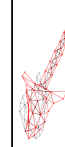
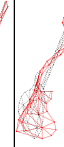
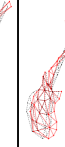
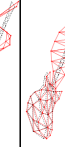
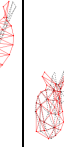
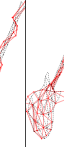
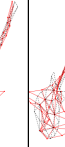
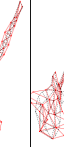
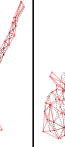
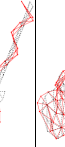
## E.1 Déformées — Guitares non équipées

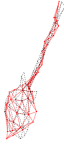
	Guitare 1	Guitare 2	Guitare 3	Guitare 4	Guitare 5	Guitare 6	Guitare 7	Guitare 8	Guitare 9
Mode 1									
Mode 2									
Mode 2 bis									
Mode 3									
Mode 4									
Mode 4 bis									
Mode 5									
Mode 6									
Mode 7									
Mode 8									
Mode 9									

Mode 9 bis									
Mode 10									
Mode 10 bis									
Mode 11									
Mode 11 bis									
Mode 12									
									
									
									



## E.2 Fréquences et amortissements — Guitares non équipées




Mode	Déformée	Guitare 1	Guitare 2	Guitare 3	Guitare 4	Guitare 5	Guitare 6	Guitare 7	Guitare 8	Guitare 9
1		58, 8 Hz 0,89%	50, 3 Hz 0,87%	58, 4 Hz 0,96%	64, 8 Hz 0,79%	57, 7 Hz 0,91%	59, 6 Hz 0,92%	60, 4 Hz 1,1%	53, 8 Hz 1%	59, 8 Hz 0,97%
2		174, 1 Hz 0,8%	157, 1 Hz 0,84%	175, 8 Hz 0,84%	194, 0 Hz 0,78%	176, 7 Hz 1,1%		179, 5 Hz 1,2%	168, 9 Hz 1,1%	
2 bis							179, 7 Hz 1,3%			183, 8 Hz 1,2%
3			219, 1 Hz 0,63%	245, 8 Hz 0,7%	251, 2 Hz 0,66%		241, 7 Hz 0,37%	234, 5 Hz 0,6%	239, 3 Hz 0,58%	250, 8 Hz 0,63%
4		395, 2 Hz 0,76%		396, 3 Hz 0,8%	433, 6 Hz 0,68%	409, 4 Hz 0,69%	423, 7 Hz 0,75%	409, 2 Hz 0,76%	398, 2 Hz 0,63%	
4 bis										420, 5 Hz 0,67%
5		541, 9 Hz 1%	547, 6 Hz 1,1%	545, 5 Hz 1,1%	520, 1 Hz 1,1%	553, 5 Hz 1,1%	522, 8 Hz 1,1%	562, 6 Hz 1,2%	584, 7 Hz 0,95%	523, 8 Hz 1,1%
6		655, 5 Hz 1,1%	656, 5 Hz 1,1%	662, 4 Hz 1,3%	575, 8 Hz 1,3%	640, 2 Hz 0,93%	573, 6 Hz 1,3%	667, 3 Hz 1,2%	691, 7 Hz 0,79%	579, 7 Hz 1,4%
7		730, 6 Hz 0,76%	743, 0 Hz 0,95%	742, 6 Hz 0,5%	800, 8 Hz 0,76%	755, 8 Hz 0,87%	758, 5 Hz 0,33%	769, 8 Hz 0,95%	758, 7 Hz 0,79%	756, 0 Hz 0,82%
8			834, 0 Hz 1%	922, 3 Hz 0,93%	937, 5 Hz 0,83%	881, 6 Hz 0,77%	933, 5 Hz 0,9%	919, 5 Hz 0,87%	902, 5 Hz 0,88%	961, 5 Hz 0,8%
9		1104, 8 Hz 1%	1113, 2 Hz 1,1%	1141, 8 Hz 1%		1210, 6 Hz 0,88%	1177, 6 Hz 0,94%	1206, 6 Hz 0,99%	1206, 0 Hz 0,83%	1103, 6 Hz 0,85%
9 bis										1179, 1 Hz 1%
10		1260, 7 Hz 1,1%	1352, 4 Hz 1,1%	1304, 2 Hz 1%		1299, 4 Hz 0,86%	1246, 7 Hz 1%	1320, 4 Hz 1,1%	1349, 9 Hz 0,84%	
10 bis					1141, 1 Hz 1,2%					1125, 4 Hz 1,3%
11					1201, 5 Hz 0,88%	1103, 1 Hz 0,71%		1132, 8 Hz 0,77%	1075, 7 Hz 0,69%	
11 bis				1435, 6 Hz	1491, 2 Hz	1454, 5 Hz	1453, 6 Hz	1479, 6 Hz	1444, 0 Hz	1421, 0 Hz

12		1602,6 Hz 0,96 %	1698,1 Hz 1,9%	1631,7 Hz 1,2%	0,88%	0,97%	1654,7 Hz 0,68%	1573,9 Hz 0,89%	1,1%	0,85%	0,94%
											1479,9 Hz 1,2%


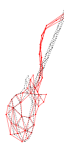


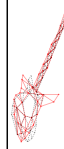
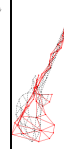
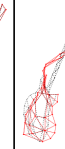
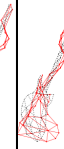
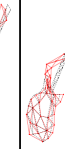
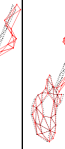
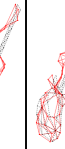
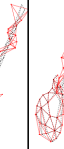
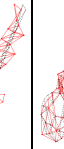
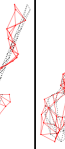
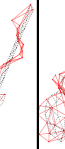
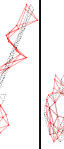
## F Analyse modale pour les neuf guitares équipées


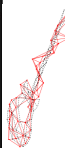
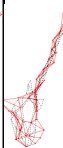
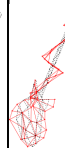

### F.1 Déformées — Guitares équipées

	Guitare 1	Guitare 2	Guitare 3	Guitare 4	Guitare 5	Guitare 6	Guitare 7	Guitare 8	Guitare 9
Mode 1									
Mode 2									
Mode 3									
Mode 4									
Mode 4 bis									
Mode 5									
Mode 5 bis									
Mode 6									
Mode 6 bis									
Mode 6 ter									
Mode 7									

Mode 7 bis																				
Mode 8																				
Mode 8 bis																				
Mode 9																				
Mode 9 bis																				
Mode 9 ter																				
Mode 10																				
Mode 11																				
Mode 12																				
Mode 12 bis																				

## F.2 Fréquences et amortissements — Guitares équipées

Mode	Déformée	Guitare 1	Guitare 2	Guitare 3	Guitare 4	Guitare 5	Guitare 6	Guitare 7	Guitare 8	Guitare 9
1		49,7 Hz 1,1%	42,55 Hz 1,5%	49,58 Hz 1%	53,46 Hz 0,81%	48,59 Hz 0,92%	50,09 Hz 1%	50,90 Hz 1,2%	45,55 Hz 1,3%	50,08 Hz 1,3%
2		155,22 Hz 1%	140,49 Hz 1,3%	160,49 Hz 1,3%	175,52 Hz 1,1%	158,8 Hz 1,3%	165,21 Hz 1,2%	161,95 Hz 1,8%	151,47 Hz 1,2%	166,30 Hz 1,7%
3		354,58 Hz 1,1%	319,19 Hz 1,3%	367,74 Hz 1,8%	395,39 Hz 1%	368,06 Hz 1%	386,16 Hz 1,1%	372,16 Hz 1,2%	358,05 Hz 0,92%	377,89 Hz 1%
4		526,62 Hz 1,1%	539,39 Hz 1,4%	529,24 Hz 1,5%	499,18 Hz 1,6%	524,01 Hz 1,3%	507,36 Hz 1,3%	541,68 Hz 1,8%	561,24 Hz 1,2%	503,73 Hz 1,6%
4 bis						544,37 Hz 1,1%				
5					567,68 Hz 1,7%		574,32 Hz 1,2%			572,49 Hz 2,4%
5 bis		638,94 Hz 1,2%		651,46 Hz 1,3%		644,94 Hz 1,2%		662,17 Hz 1,6%	648,55 Hz 0,88%	
6		686,74 Hz 1,4%		699,5 Hz 1,1%		696,63 Hz 0,85%		662,17 Hz 1,6%	735,23 Hz 1,3%	
6 bis			613,11 Hz 1,3%							668,57 Hz 1,2%
6 ter			739,8 Hz 0,71%		722,4 Hz 0,77%		712,18 Hz 0,9%			
7		843,84 Hz 1,2%	845,91 Hz 0,48%							876,62 Hz 0,67%
7 bis				894,42 Hz 1%		824 Hz 0,66%	865,12 Hz 0,49%			
8						905,1 Hz 0,67%	915,99 Hz 0,68%	918,51 Hz 0,96%		
8 bis										923,31 Hz 1%
9		1066,35 Hz 1,3%	1066,70 Hz 0,18%	1099,15 Hz 0,85%	1042,11 Hz 0,86%	1025,49 Hz 0,48%	1114,35 Hz 1%	1125,21 Hz 0,93%	1069,35 Hz 0,58%	
9 bis					1090,78 Hz	1161,82 Hz		1198,5 Hz	1108,49 Hz	

9 ter					1,8%	0,34%		0,9%	0,83%	
10				1154,16 Hz 0,54%					1171,44 Hz 0,87%	1102,77 Hz 2%
11		1229,49 Hz 1,5%		1277,49 Hz 0,79%		1272,54 Hz 0,94%	1236,86 Hz 1,3%	1294,77 Hz 1,1%	1272,57 Hz 0,26%	
12		1326,89 Hz 0,48%		1326,67 Hz 0,34%		1388,16 Hz 0,96 %	1356,54 Hz 0,3%	1367,44 Hz 0,53%	1328,49 Hz 0,29%	1411,09 Hz 1%
12 bis									1407,14 Hz 0,58%	

## G Pourquoi privilégier la conductance « hors-plan » ?

Pendant le stage, des mesures préliminaires de conductance colocalisée ont été effectuées sur un ancien lot de trois guitares électriques ([Nav06]) à l'aide d'un marteau d'impact et d'un accéléromètre triaxe afin de déterminer quelles directions d'excitation et de réponse étaient à privilégier lors des futures mesures. Les axes sont définis comme dans la figure 53.

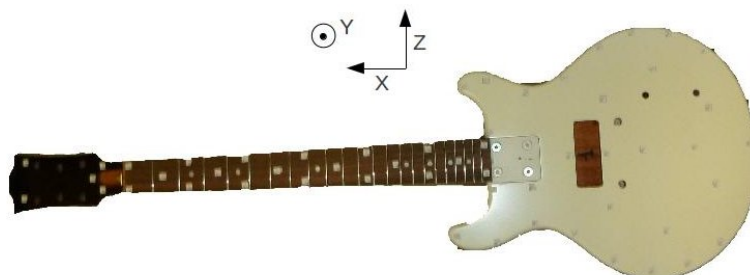


FIGURE 53 – Définition des axes pour les mesures de FRF

Voulant relier les mesures de conductance au comportement vibratoire de la corde, il a été choisi de négliger la direction X dans nos mesures. En effet ([Woo04a], [Woo04b]), le mouvement de la corde se fait presque exclusivement dans les directions Y et Z.

La figure 54 montre les mesures de conductance « YY » (courbe rouge), « YZ » (courbe verte) et « ZZ » (courbe bleue). On peut y voir que, pour les trois orientations choisies, les conductances sont toujours du même ordre de grandeur. Ainsi, on ne peut « a priori » pas privilégier une direction. Cependant, on remarque qu'au point de contact avec la frette, la corde glisse suivant l'axe Z. Il y a donc du frottement donc il reste potentiellement peu d'énergie à la corde pour la transmettre à la touche (puis au manche et à la structure). Cet effet, s'il est observable, reste à démontrer et à quantifier, ce qui constitue une des principales pistes pour la poursuite de ce travail. On a néanmoins fait durant ce travail cette hypothèse, à savoir que l'orientation dominante dans l'observation des conductances est YY.

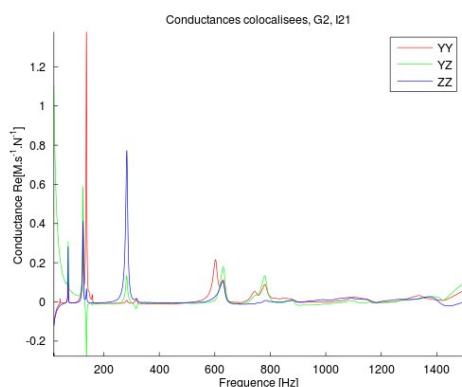


FIGURE 54 – Conductances YY, YZ et ZZ

On vérifie sur la figure 55 que la direction X peut effectivement être négligée, la conductance YX étant bien moindre que la conductance YY.

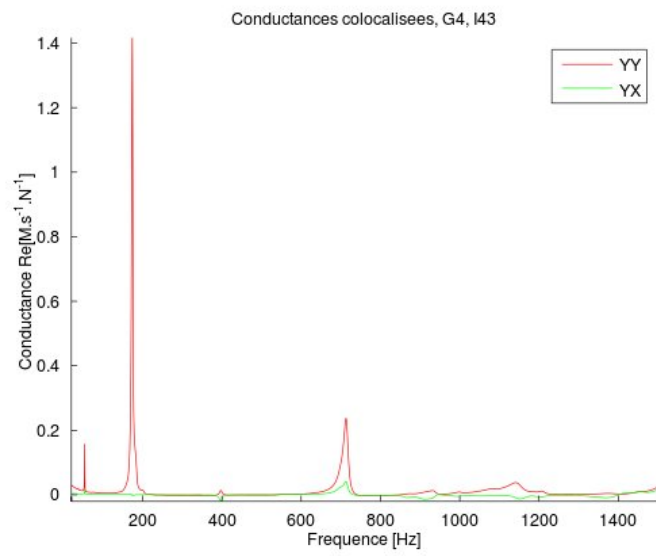


FIGURE 55 – Conductances YY et YX



## H Quand peut-on considérer une mesure d'admittance comme « colocalisée » ?

On conserve les orientations définies sur la figure 53. Si on excite (à toutes les intercordes) suivant l'axe Y et si on mesure la réponse suivant les axes X, Y ou Z (et pareillement si on excite et mesure suivant l'axe Z aux intercordes « 21 » et « 65 »), il est relativement aisé d'obtenir un point d'impact du marteau très proche de la position de l'accéléromètre, c'est-à-dire d'obtenir une mesure de FRF quasi-colocalisée.

Les mesures de FRF ZZ (excitation et réponse suivant l'axe Z) peuvent poser problème lorsqu'on souhaite obtenir une réponse en fréquence à l'intercorde « 43 ». En effet, il est impossible d'exciter avec le marteau suivant cet axe à cet endroit. On doit donc poser l'accéléromètre entre les cordes 4 et 3, et exciter d'un côté ou de l'autre de la touche. On peut se demander une telle FRF peut être considérée comme colocalisée. C'est le sens des mesures présentées ici. La figure 56 présente un

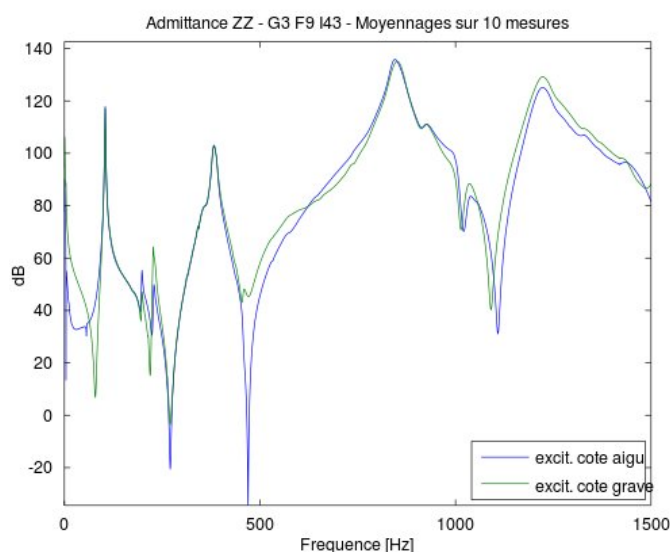


FIGURE 56 – Admittance ZZ, F9 I43, guitare 3 du lot de [Nav06], deux excitations différentes, Ref  $1\text{dB} = 1\text{m}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{N}^{-1}$

exemple de mesure vérifiant la colocalisation, on a ici le module de l'admittance mesurée à la neuvième frette entre les cordes 4 et 3, sur une guitare du lot utilisé par [Nav06]. L'excitation (suivant l'axe Z) est effectuée deux fois, une fois (courbe bleue) sur la face latérale de la touche, du côté de la corde 1, une autre fois (courbe verte) sur la face latérale de la touche, du côté de la corde 6. Ces deux mesures sont de plus effectuées chacune dix fois, si bien que la figure 56 présente un moyennage de ces dix mesures. On se rend compte que les deux courbes tendent à se confondre. Ainsi on peut déduire que le point d'impact est assez proche du point de mesure pour que la FRF puisse être considérée comme quasi-colocalisée. De plus, il apparaît que pour la mesure « ZZ » à l'intercorde « 43 », on peut exciter indifféremment d'un côté de la touche ou de l'autre.

On peut aller plus loin, et comparer les FRF mesurées aux autres intercordes via deux excitations à des endroits différents. La figure 57 présente le module de l'admittance ZZ mesurée à la neuvième frette entre les cordes 6 et 5, sous une excitation (courbe verte) sur la face latérale de la touche, du côté de la corde 6 (mesure *a priori* colocalisée, étant donnée la position de l'accéléromètre), puis sous une excitation (courbe bleue) du côté de la corde 1. Encore une fois, on remarque que les deux courbes sont quasiment identiques et on en conclut que les mesures ZZ peuvent — pour une frette donnée — avoir la même localisation de l'excitation, quelle que soit l'intercorde où est fixé l'accéléromètre.

Un deuxième problème apparaissant pour qualifier les FRF mesurées de colocalisées est dans le choix des positions de l'excitateur (marteau) et du capteur (accéléromètre) lors de la mesure

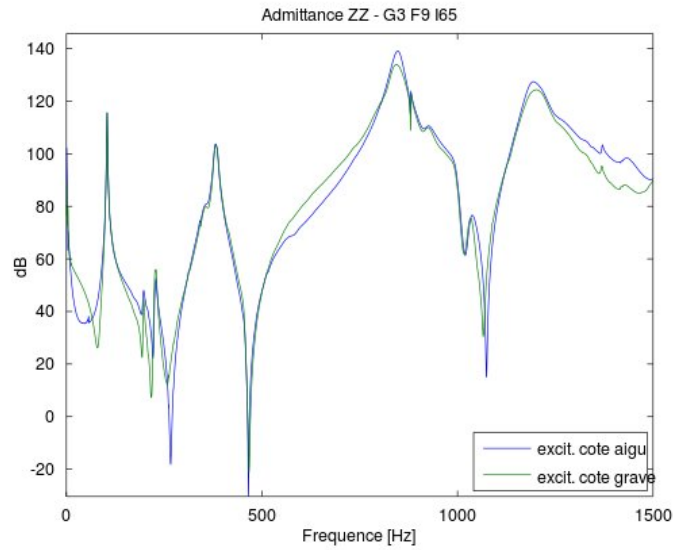


FIGURE 57 – Module de l’admittance ZZ, F9 I65, guitare 3 du de [Nav06], deux excitations différentes, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

de conductance « YY ». On montre ici un exemple des mesures effectuées : la figure 58 présente l’admittance « YY » mesurée à la frette 5 et à l’intercorde « 43 ». Les différentes mesures ont été faites avec un accéléromètre monoaxe et un vibromètre laser. La mesure idéale d’admittance colocalisée sur la frette consiste à situer le capteur et l’excitateur sur la frette. C’est la mesure présentée sur la courbe rouge, le laser vise la frette et le marteau frappe sur la frette, juste à côté. Les courbes bleue et verte représentent respectivement un impact devant (vers les aigus) la frette et un impact derrière (vers les graves) la frette, le laser pointant toujours sur la frette. Enfin la courbe cyan indique l’admittance mesurée lorsque le laser pointe sur la touche juste derrière la frette et quand l’impact se fait sur la touche juste devant la frette (par principe de réciprocité, l’inversion excitation - captation donnera le même résultat).

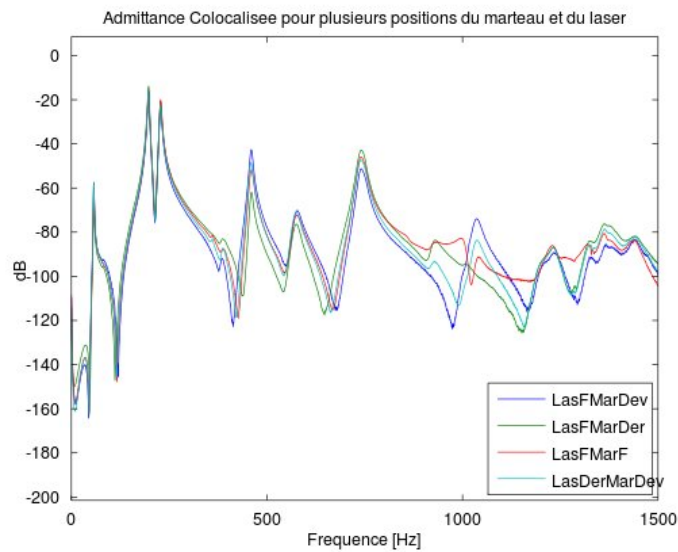


FIGURE 58 – Module de l’admittance pour différentes positions du marteau et du laser, Ref 1dB =  $1m.s^{-2}.N^{-1}$

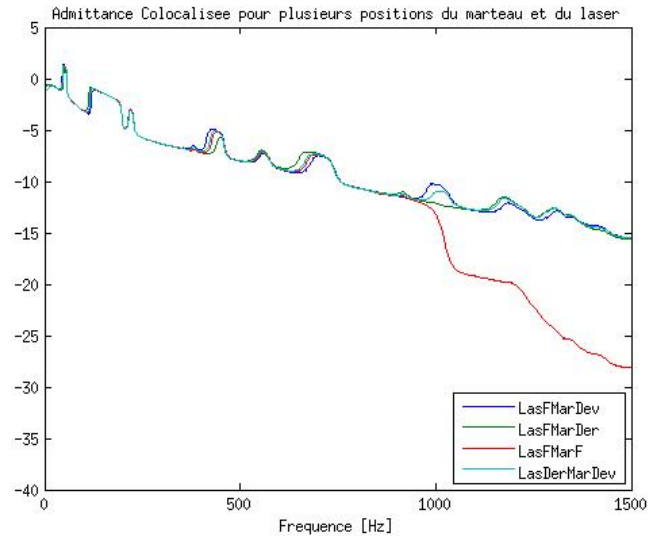


FIGURE 59 – Phase de l'admittance pour différentes positions du marteau et du laser

On observe que les quatre courbes de module sont quasiment identiques jusqu'à 1000 Hertz, et que les allures sont largement conservées jusqu'à 1500 Hertz (on rappelle que nos mesures d'admittance au marteau d'impact ne sont valables que jusqu'à environ 1500 Hertz, étant donnée la bande passante fréquentielle de l'impact du marteau). Ainsi nous pouvons nous permettre de choisir indifféremment une de ces configurations de positions d'excitateur et de capteur. La configuration la plus pratique a été choisie : l'accéléromètre est placé juste derrière la frette (il n'est évidemment pas raisonnable de vouloir fixer un accéléromètre sur une frette) et le marteau frappe juste devant la frette. C'est ces positions que nous avons utilisées pendant toutes nos mesures d'admittance « YY ». Nous montrons schématiquement ces positionnements en figure 60.

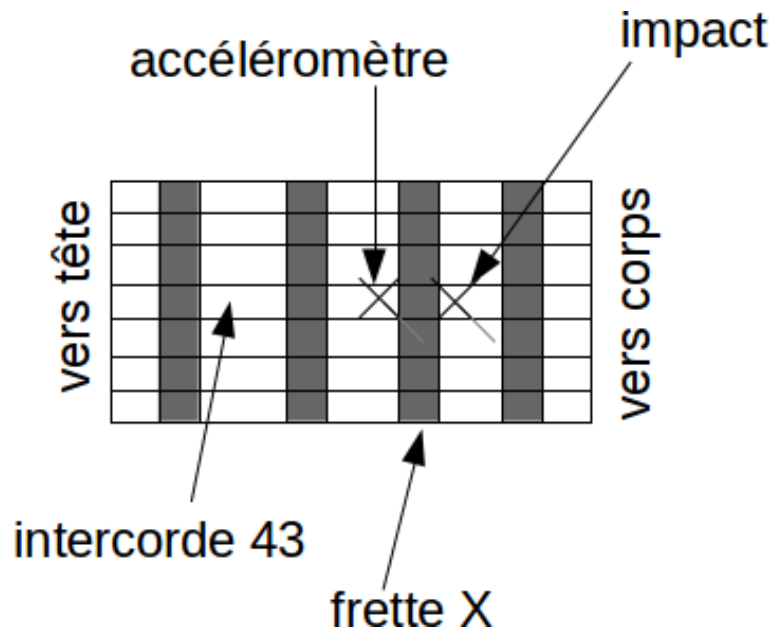


FIGURE 60 – Positions de l'accéléromètre et de l'impact pour la mesure d'une conductancec colocalisées à la frette X et à l'intercorde « 43 »

# I Tracés des « T30 » pour toutes les cordes

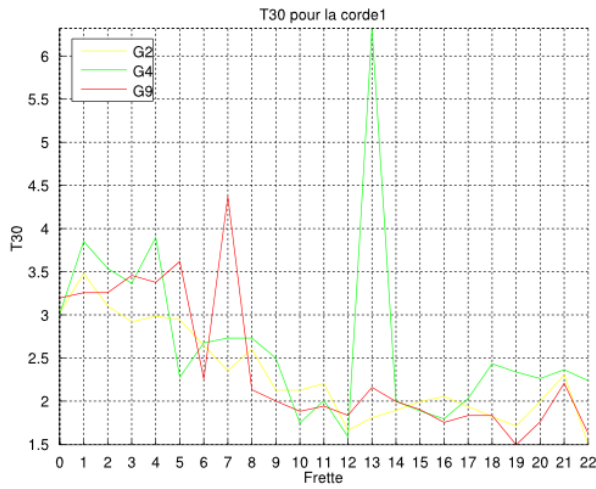


FIGURE 61 – « T30 » pour la corde 1, toutes les frettes, toutes les guitares

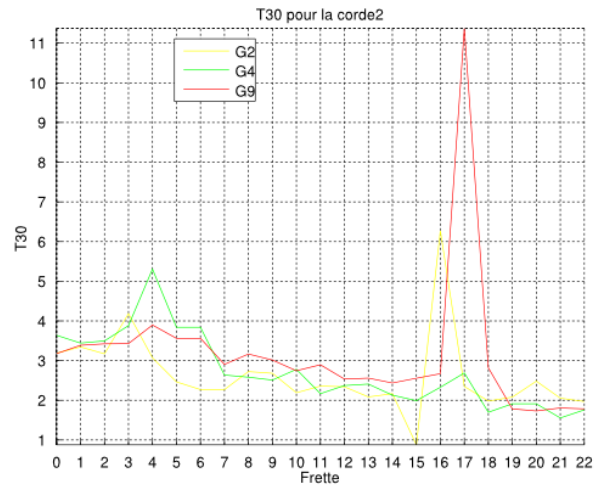


FIGURE 62 – « T30 » pour la corde 2, toutes les frettes, toutes les guitares

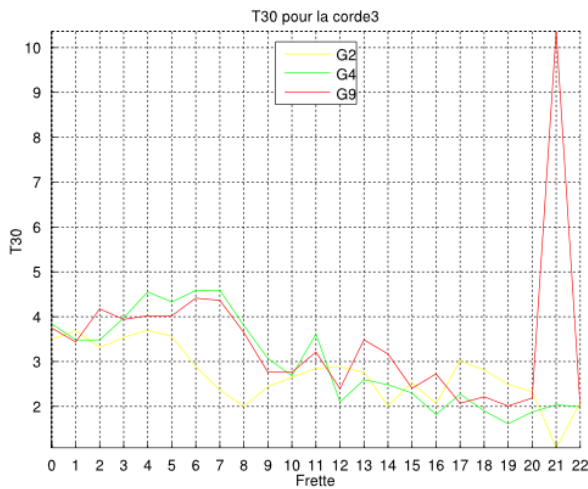


FIGURE 63 – « T30 » pour la corde 3, toutes les frettes, toutes les guitares

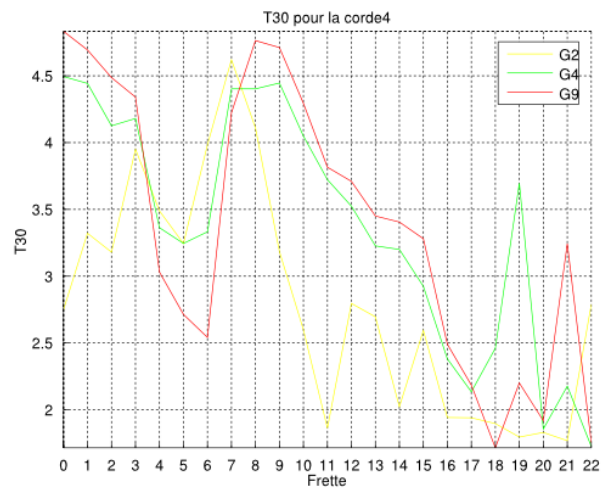


FIGURE 64 – « T30 » pour la corde 4, toutes les frettes, toutes les guitares

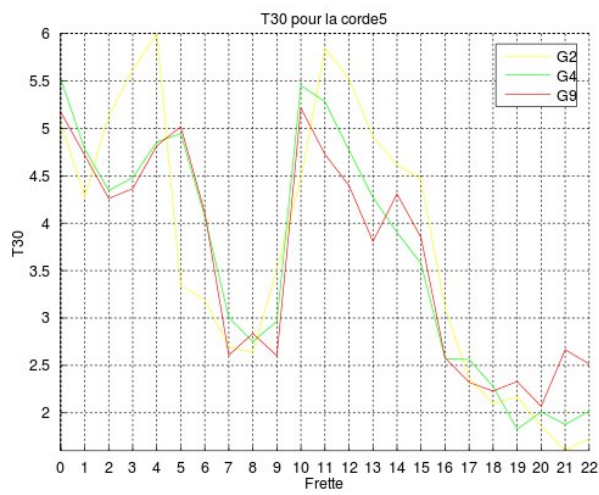


FIGURE 65 – « T30 » pour la corde 5, toutes les frettes, toutes les guitares

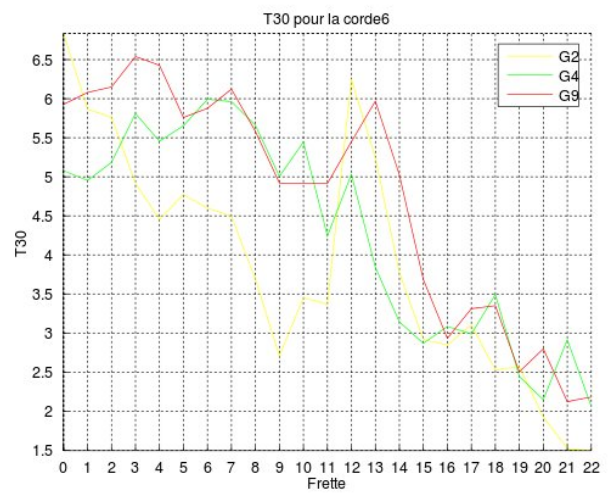


FIGURE 66 – « T30 » pour la corde 6, toutes les frettes, toutes les guitares

## J Fragments chromatiques à jouer par les musiciens

### Deux gammes "chromatiques"

#### 1 - A partir de la 3ème case

Tempo ♩ = 60

8

T  
A  
B

3 4 5 6 3 4 5 6 3 4 5 6 3 4 5 6 3 4 5 6 3 4 5 6

#### 2 - A partir de la 12ème case

Tempo ♩ = 60

7

8


7

12 13 14 15 12 13 14 15 12 13 14 15 12 13 14 15 12 13 14 15 12 13 14 15


FIGURE 67 – Fragments chromatiques à jouer par les musiciens

## K Fiches d'évaluation à la fin des tests perceptifs

Evaluation globale de chaque guitare

Guitare  (jaune)	.....
Pourquoi ?	.....

Guitare  (orange)	.....
Pourquoi ?	.....




Guitare  (vert)	.....
Pourquoi ?	.....

FIGURE 68 – Fiche d'évaluation globale et personnelle de chaque guitare

**CRITÈRE :**

Guitare  (jaune)	.....
Pourquoi ?	.....

Guitare  (orange)	.....
Pourquoi ?	.....


Guitare  (vert)	.....
Pourquoi ?	.....

FIGURE 69 – Première fiche (échelles libres) d'évaluation d'un critère choisi

**CRITÈRE :**

**Guitare** (jaune)

Contribution pas du tout

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Contribution beaucoup

Commentaires

---

**Guitare** (orange)

Contribution pas du tout

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Contribution beaucoup

Commentaires

---

**Guitare** (vert)

Contribution pas du tout

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 Contribution beaucoup

Commentaires

FIGURE 70 – Deuxième fiche d'évaluation d'un critère choisi

**CRITÈRE :**

**Guitare** (jaune)

J'aime pas

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 J'aime

Commentaires

---

**Guitare** (orange)

J'aime pas

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 J'aime

Commentaires

---

**Guitare** (vert)

J'aime pas

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 J'aime

Commentaires

FIGURE 71 – Troisième fiche d'évaluation d'un critère choisi



## Références

- [Bar10a] Nicolas BARASCUD : Synthèse fréquentielle de sons de guitare pour l'aide à la facture. Mémoire de D.E.A., UPMC, 2010.
- [Bar10b] Diego BARESCHE : Analyse vibroacoustique d'éléments de lutherie de guitares électriques. Mémoire de D.E.A., UPMC, 2010.
- [BM86] Tomira BOEHM et Kacper MIKLASZEWSKI : Estimation of guitar sound quality. *Archives of Acoustics*, 1986.
- [CCFDed] Delphine CHADEFaux, Jean-Loïc Le CARROU, Benoît FABRE et Laurent DAUDET : Experimentally-based description of harp plucking. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2011, accepted.
- [CFMN10] Jean-Loïc Le CARROU, Joël FRELAT, Antonin MANCEL et Benoît NAVARRET : Guitare électrique : quel rôle pour les éléments de lutherie ? In *10ème Congrès Français d'Acoustique*, 2010.
- [CK08] Antoine CHAIGNE et Jean KERGOMARD : *Acoustique des Instruments de Musique*. Belin, Paris, 2008.
- [Esp03] E. ESPOSITO : A comparative study of the vibro-acoustical behaviour of electric guitars produced in different decades. In *Proceedings of the Stockholm Music Acoustics Conference (SMAC 03)*, 2003.
- [ESS02] E. ESPOSITO, C. SANTOLINI et L. SCALISE : Axe work ii : vibro-acoustical study of solid body electric guitars. In *5th International Conference on Vibration Measurements by Laser Techniques, SPIE Vol. 4827*, 2002.
- [Eva11] Gianpaolo EVANGELISTA : Physical model of the string-fret interaction. In *International Conference on Digital Audio Effects (DAFx11)*, 2011.
- [Fle05] Helmut FLEISCHER : Vibration of an electric bass guitar. *Acta Acustica united with Acustica*, 2005.
- [Fuj09] Yo FUJISO : Vibroacoustical study of the solid-body electric guitar. Mémoire de D.E.A., Chalmers University of Technology Göteborg, 2009.
- [FZ98] Helmut FLEISCHER et Tilmann ZWICKER : Mechanical vibrations of electric guitars. *Acta Acustica united with Acustica*, 1998.
- [FZ99] Helmut FLEISCHER et Tilmann ZWICKER : Investigating dead spots of electric guitars. *Acta Acustica united with Acustica*, 1999.
- [Gai09] Pascal GAILLARD : *Le sentir et le dire, concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives*, chapitre 7. l'Harmattan, Paris, 2009. Sous la direction de Danièle Dubois.
- [GDGD09] Agnès GIBOREAU, Catherine DACREMONT, Sylvie GUERRAND et Danièle DUBOIS : *Le sentir et le dire, concepts et méthodes en psychologie et linguistique cognitives*, chapitre 8. l'Harmattan, Paris, 2009. Sous la direction de Danièle Dubois.
- [ITE11] ITEM : Site de l'institut technologique européen des métiers de la musique (itemm), 2011. <http://itemm.fr/site2/index.php>, consulté le 9 juillet 2011.
- [KMS94] J. KRIMPHOFF, S. McADAMS et S. WINSBERG : Caractérisation du timbre des sons complexes. ii. analyses acoustiques et quantification psychophysique. *Journal de physique*, 1994.
- [LL08] Guy LEMARQUAND et Valérie LEMARQUAND : Modélisation et fonctionnement des microphones de guitares électriques. *Musique & Technique*, 2008.
- [Lot08] Pierrick LOTTON : Sonorité des microphones de guitare. *Musique & Technique*, 2008.
- [Mot07] R.M. MOTTOLA : Sustain and electric guitar neck joint type. *American Lutherie*, 2007.

- [Nav06] Benoît NAVARRET : Etude de l'influence des éléments de lutherie de la guitare électrique "solid body" sur le son perçu. Mémoire de D.E.A., CNSMDP, 2006.
- [Nav10] Benoît NAVARRET : Etude de la qualité sonore de la guitare électrique solid body. *Musique & Technique*, 2010.
- [Pir] Jean PIRANDA : Analyse modale expérimentale. *Techniques de l'Ingénieur*.
- [Que66] Daniel QUEEN : From boom boxes to beatles, baez and boccherini. the electric guitar at the crossroads. *In 31st Convention of the Audio Engineering Society*, 1966.
- [Sch67] M.R. SCHROEDER : New method of measuring reverberation time. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1967.
- [VC93] Claude VALETTE et Christian CUESTA : *Mécanique de la Corde vibrante*. Hermès, Paris, 1993.
- [vis11] Le Dictionnaire VISUEL : Le dictionnaire visuel, 2011. <http://www.ikonet.com/fr/ledictionnairevisuel/arts-et-architecture/musique/instruments-a-cordes/guitare-electrique.php> , consulté le 3 août 2011.
- [Wik11] WIKIPEDIA : Article « electric guitar », section « guitar necks », 2011. [http://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_guitar#Guitar\\_necks](http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_guitar#Guitar_necks).
- [Woo04a] Jim WOODHOUSE : On the synthesis of guitar plucks. *Acta Acustica united with Acustica*, 2004.
- [Woo04b] Jim WOODHOUSE : Plucked guitar transients : Comparison of measurements and synthesis. *Acta Acustica united with Acustica*, 2004.
- [Wri96] Howard WRIGHT : *The Acoustics and Psychoacoustics of the Guitar*. Thèse de doctorat, University of Wales, 1996.

## Résumé

L'étude effectuée pendant ce stage a pour objet la guitare électrique *solid-body*. Du point de vue mécanique, la guitare électrique *solid-body* peut être vue comme des cordes connectées à un manche, via une frette ou un sillet ; et à un corps fait en bois de 3 à 5 cm d'épaisseur, via le chevalet. Le son produit par l'instrument est obtenu par l'amplification de la captation de l'oscillation des cordes par un transducteur électromagnétique, appelé *pickup*. Le son de l'instrument a donc *a priori* deux causes : le système amplificateur et le comportement vibro-acoustique de la structure mécanique constituée par la guitare électrique. L'objectif de ce stage est de quantifier à la fois mécaniquement et perceptivement l'influence d'un élément de lutherie.

Pour cela, une série de neuf guitares a été spécialement construite à l'ITEMM [ITE11]. Ces guitares sont strictement identiques, à un élément de lutherie près, le mode de jonction entre le corps et le manche : trois guitares sont à manche vissé, trois à manche collé et trois à manche traversant. Les guitares ont d'abord été mesurées par des méthodes de vibro-acoustique (analyse modale et mesure de conductance au niveau des frettes et du chevalet) afin de caractériser leur comportement vibratoire. Elles ont ensuite été testées par vingt-deux guitaristes expérimentés lors d'entretiens semi-dirigés.

Les différences obtenues au niveau vibratoire sont très subtiles bien que les jugements des musiciens sur les guitares paraissent plus tranchés et variés. On montre que la relation proposée par [FZ99] entre *sustain* et conductance colocalisée sur le manche n'est pas systématiquement vérifiée. Au niveau des indicateurs physiques à corrélérer avec les indicateurs perceptifs, les premiers résultats semblent montrer que le « temps d'attaque » des notes de la guitare électrique est mieux apprécié si celui-ci est homogène sur toute la tessiture de l'instrument.

## Abstract

The study which was carried out during this internship deals with the "solid-body" electric guitar. From a mechanical point of view, the electric guitar can be seen as strings connected with a neck through a fret or a nut ; and connected with a body made of wood (depth 3 to 5 cm) through the bridge. The sound produced by the instrument is obtained through the amplification of the recording of the strings motion by an electromagnetic sensor called pickup. There are therefore two causes for the sound produced by the instrument : the amplification system and the vibrational behaviour of the mechanical structure called in our case "the guitar". The aim of this internship is to quantify mechanically and perceptually the influence of a guitar making parameter.

A series of nine guitars was made at ITEM [ITE11] specially for this study. These guitars are strictly identical, but differ only in a single guitar making parameter, the way the neck is fixed to the body : three guitars have a screwed neck, three have a glued neck and three have a neck-through construction. The guitars were first studied with vibro-acoustical methods (modal analysis and conductance measurements on the frets and on the bridge) in order to characterize their vibrational behaviour. Then they were tested by twenty-two expert guitarists during half-directed interviews.

The differences obtained in the vibrational behaviours are very subtle, although the musicians' opinions seem to be more varied. We show here that the relationship ([FZ99]) between sustain and conductance on the neck is not always true. The first results in the comparison between physical and perceptual indicators seem to show that the « attack time » of a guitar is more appreciated if it is homogeneous on the whole range of the instrument.