



HAL
open science

Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique

Paul Cambourian

► **To cite this version:**

Paul Cambourian. Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique. Acoustique [physics.class-ph]. Université de Lille, 2022. Français. NNT : 2022ULILN033 . tel-04080676

HAL Id: tel-04080676

<https://theses.hal.science/tel-04080676>

Submitted on 25 Apr 2023

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

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

Université de Lille

École doctorale **ENGSYS-632 Lille**

Unité de recherche **Junia/ISEN Lille (IEMN UMR 8520) - Université Catholique de Lille**

Thèse présentée par **Paul Cambourian**

Soutenue le **15 décembre 2022**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Lille

Discipline **Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications**

Spécialité **Acoustique**

Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique

Thèse dirigée par Jérôme VASSEUR directeur
Arthur PATÉ co-encadrant

Composition du jury

<i>Rapporteur · e · s</i>	Nicolas DAUCHEZ	Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval	Président du jury
	Jean-François PETIOT	Professeur des Universités au École Centrale de Nantes, LS2N	
<i>Examineur · rice · s</i>	Claudia FRITZ	Chargée de recherche HDR au CNRS, Sorbonne Université, d'Alembert	
	Henri BOUTIN	Maître de conférences à Sorbonne Université, STMS	
<i>Invité · e · s</i>	Caroline CANCE	Maîtresse de conférences à l'Université d'Orléans, LLL	
	Bertrand VERINE	Maître de conférences honoraire à l'Université Paul Valéry Montpellier 3, Praxiling	
<i>Directeurs de thèse</i>	Jérôme VASSEUR	Professeur des Universités à l'Université de Lille/INSPE, IEMN	
	Arthur PATÉ	Enseignant-chercheur à Junia/ISEN Lille, IEMN	

COLOPHON

Mémoire de thèse intitulé « Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique », écrit par Paul CAMBOURIAN, achevé le 15 mars 2023, composé au moyen du système de préparation de document \LaTeX et de la classe yathesis dédiée aux thèses préparées en France.

Université de Lille

École doctorale **ENGSYS-632 Lille**

Unité de recherche **Junia/ISEN Lille (IEMN UMR 8520) - Université Catholique de Lille**

Thèse présentée par **Paul Cambourian**

Soutenue le **15 décembre 2022**

En vue de l'obtention du grade de docteur de l'Université de Lille

Discipline **Micro et Nanotechnologies, Acoustique et Télécommunications**

Spécialité **Acoustique**

Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique

Thèse dirigée par Jérôme VASSEUR directeur
Arthur PATÉ co-encadrant

Composition du jury

<i>Rapporteur · e · s</i>	Nicolas DAUCHEZ	Professeur des Universités à l'Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval	Président du jury
	Jean-François PETIOT	Professeur des Universités au École Centrale de Nantes, LS2N	
<i>Examineur · rice · s</i>	Claudia FRITZ	Chargée de recherche HDR au CNRS, Sorbonne Université, d'Alembert	
	Henri BOUTIN	Maître de conférences à Sorbonne Université, STMS	
<i>Invité · e · s</i>	Caroline CANCE	Maîtresse de conférences à l'Université d'Orléans, LLL	
	Bertrand VERINE	Maître de conférences honoraire à l'Université Paul Valéry Montpellier 3, Praxiling	
<i>Directeurs de thèse</i>	Jérôme VASSEUR	Professeur des Universités à l'Université de Lille/INSPE, IEMN	
	Arthur PATÉ	Enseignant-chercheur à Junia/ISEN Lille, IEMN	

Université de LilleDoctoral School **ENGSYS-632 Lille**University Department **Junia/ISEN Lille (IEMN UMR 8520) - Université Catholique de Lille**Thesis defended by **Paul Cambourian**Defended on **December 15, 2022**

In order to become Doctor from Université de Lille

Academic Field **Micro and Nanotechnologies, Acoustics and Telecommunications**Speciality **Acoustics**

Characterization and perception of vibrotactile feedback: the case of the electric guitar

Thesis supervised by Jérôme VASSEUR Supervisor
Arthur PATÉ Co-Monitor

Committee members

<i>Referees</i>	Nicolas DAUCHEZ	University Professor at Université de Technologie de Compiègne, Laboratoire Roberval	Committee President
	Jean-François PETIOT	University Professor at École Centrale de Nantes, LS2N	
<i>Examiners</i>	Claudia FRITZ	HDR Junior Researcher at CNRS, Sorbonne Université, d'Alembert	
	Henri BOUTIN	Associate Professor at Sorbonne Université, STMS	
<i>Guests</i>	Caroline CANCE	Associate Professor at Université d'Orléans, LLL	
	Bertrand VERINE	Honorary Associate Professor at Université Paul Valéry Montpellier 3, Praxiling	
<i>Supervisors</i>	Jérôme VASSEUR	University Professor at Université de Lille/INSPE, IEMN	
	Arthur PATÉ	Teacher-researcher at Junia/ISEN Lille, IEMN	

A ma mère

Remerciements

Avant toute chose, je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour l'attention apportée à mes travaux de recherche : merci à Nicolas Dauchez et à Jean-François Petiot d'avoir accepté de rapporter cette thèse. Merci aux examinateurs, Claudia Fritz et Henrin Boutin, ainsi que les invités au jury Caroline Cance et Bertrand Verine, pour l'ensemble des questions, suggestions et remarques.

Je souhaite ensuite remercier les deux personnes m'ayant permis de me lancer dans cette belle aventure de la thèse, et d'en venir à bout après trois ans d'apprentissage, de questions, de découvertes, de protocoles expérimentaux, etc. Merci à Jérôme Vasseur d'avoir pris la responsabilité d'être directeur de cette thèse, malgré nos différences majeures de thématiques, ainsi que l'aide apportée pour la synthèse. Merci à Arthur Paté, encadrant et initiateur de ce beau projet de thèse, pour sa disponibilité, sa bienveillance, son extrême compréhension et tout l'apport scientifique intégré à l'analyse de la perception des musiciens. Merci à eux de m'avoir soutenu dans toute cette aventure. Ces remerciements restent une pâle description de l'aide apportée quand je pense à tout le bien que j'aurais à dire encore.

Merci à tous les membres du laboratoire et de l'équipe d'acoustique, en particulier les collègues doctorants Arthur, Ricardo, Sarah et Quentin avec qui nous avons beaucoup échangé durant la thèse.

Cette thèse m'a permis de collaborer avec de nombreux autres chercheurs, ce dans beaucoup de domaine. Merci à tous ces chercheurs qui ont accompagné mon travail de thèse, à savoir Caroline Cance (linguistique), Benoît Navarret (musicologie), Florent Berthaut (informatique), Simon Benacchio (mécanique), Karin Sahmer (statistiques). Cela a rendu l'expérience de thèse extrêmement riche.

Merci à Oscar Gal et Boris Légal, que j'ai encadrés lors de stages en lien direct avec cette thèse. Les apports d'Oscar en mécanique m'ont permis de prendre le temps en parallèle de rédiger mon premier article (en linguistique), et Boris a apporté ses compétences en informatique pendant que je m'occupais de signaux vibratoires.

Une grande partie des résultats de cette thèse n'aurait jamais vu le jour sans la présence de guitaristes pour les expériences. Merci à tous ceux qui sont venus participer à une expérience (ou plusieurs!), Florian Allein, Jean-Pierre Auneau, Maxime Baelde, David Bausseron, Gabriel Chênevert, Quentin Consigny, Hana Delport, Matthias Deram, Arnaud Françoise, Victor Gaya, Julien Lebrun, Souheil Maatoug, Luca Malacarne, Pascal Mosbah, Nathan Ouvrai, Arthur Paté, Clément Pernin, Geoffrey Pot, Pauline Ternisien, Nicolas Urai.

J'en arrive aux derniers remerciements, ô combien importants, ceux de la famille et des proches. Je vais particulièrement remercier mon très cher père pour les échanges nocturnes au moment de la rédaction de cette thèse, ainsi qu'à mes sœurs pour leur profond soutien. Cette énumération se clôture alors avec mes remerciements à Shirley (avec qui je me suis marié pendant la thèse!) pour ses enthousiastes encouragements dans les moments les plus difficiles.

Table des matières

Remerciements	ix
Table des matières	xi
1 Introduction	1
1.1 État de l'art	2
1.1.1 Qualités sonore et vibratoire des instruments de musique	2
1.1.2 Tests perceptifs : vers le jeu libre et la verbalisation libre	3
1.1.3 Retour vibrotactile	5
1.1.4 Retour vibrotactile en acoustique musicale : expression et perception	8
1.1.5 Modification des vibrations	10
1.1.6 Instrument d'étude : la guitare électrique <i>solid body</i>	13
1.2 Positionnement de la thèse	14
1.2.1 Problématique	14
1.2.2 Hypothèses générales	16
1.2.3 Organisation du manuscrit	16
I L'expression verbale du ressenti tactile par les guitaristes : analyse linguistique	17
Avant-propos	19
2 Méthodologie	21
2.1 Objectifs	22
2.1.1 Vocabulaire du toucher	22
2.1.2 Analyse de transcriptions	22
2.1.3 Développement d'une méthode d'analyse de tests perceptifs	22
2.2 Les transcriptions étudiées	23
2.2.1 Expériences avec des guitaristes électriques	23
2.2.2 Les guitares des tests	23
2.2.3 Méthodologie des expériences	25
2.2.4 Utilisation des données pour la thèse	25
2.3 Les mots et catégories de mots	25
2.4 Indicateurs linguistiques étudiés et champ d'observation	26
2.4.1 Rapport au toucher	26
2.4.2 Objet qualifié	27

2.4.3	Implication dans le discours	29
2.5	Conclusion	30
3	Vocabulary to speak about touch	31
3.1	Introduction	32
3.2	Method	34
3.2.1	Perceptual tests data	34
3.2.2	Choice of words and categories	34
3.2.3	Construction of corpus	36
3.2.4	Observed parameters	38
3.3	Analysis	39
3.3.1	Levels of context	39
3.3.2	Guitar and human body parts	41
3.3.3	Linguistic features	44
3.3.4	Synthesis	46
3.4	Results	47
3.4.1	Relationship between word categories and the sense of touch	47
3.4.2	Guitar parts and relationship with touch	48
3.4.3	Relationship between word categories and their qualified object	49
3.4.4	Relationship between word categories and the implication in discourse	49
3.5	Discussion	51
3.6	Conclusion	53
4	Robustesse des résultats de l'analyse linguistique	55
4.1	Introduction	55
4.2	Comparaison des études	56
4.2.1	Différences générales	57
4.2.2	Différences par catégorie de mot	58
4.3	Différences sur les résultats de l'analyse et recommandations	61
4.3.1	Rapport au toucher	61
4.3.2	Objet qualifié	63
4.3.3	Implication dans le discours	65
4.4	Conclusion	69
4.4.1	Rapport au toucher	69
4.4.2	Objet qualifié	69
4.4.3	Implication dans le discours	70
	Conclusion et perspectives de l'analyse linguistique	71
II	Modification et perception du retour vibrotactile de la guitare électrique	75
	Avant-propos	77
5	Influence du contenu fréquentiel du retour vibrotactile	79
5.1	Introduction	79
5.2	Méthodologie de l'expérience	81
5.2.1	Matériel	81
5.2.2	Déroulé	82

5.3	Résultats	88
5.3.1	Scores des filtres	88
5.3.2	Différences significatives par facteur	91
5.3.3	Critères d'évaluation	94
5.3.4	Zones du ressenti	94
5.4	Conclusion	95
5.4.1	Limites	97
5.4.2	Perspectives	97
6	Réinjections vibratoires à partir de différentes sources	99
6.1	Introduction	99
6.2	Méthode	101
6.2.1	Montage expérimental	101
6.2.2	Mesures	102
6.2.3	Normalisation de signaux vibratoires	103
6.2.4	Évaluation des signaux	103
6.3	Résultats	105
6.3.1	Facteurs et interactions	105
6.3.2	Taux de bonnes réponses	107
6.4	Conclusion	111
7	Modification des vibrations en situation de jeu	113
7.1	Expérience	115
7.1.1	Configuration	115
7.1.2	Modification des retours sensoriels	115
7.1.3	Tâche des participants	117
7.2	Analyse	118
7.3	Résultats	119
7.3.1	Identification du retour vibrotactile	119
7.3.2	Utilisation de l'interface	120
7.3.3	Verbalisations	121
7.4	Conclusion	123
	Conclusion et perspectives de l'étude du ressenti des vibrations	125
III	Conclusion générale	129
8	Conclusion	131
	Principaux résultats	132
	Perspectives : analyse de verbalisations	134
	Perspectives : perception et modification des vibrations	135
	Bibliographie	139
	Liste des tableaux	151
	Liste des figures	157

Annexes	160
A Les éléments de guitare dans l'étude linguistique	163
B Nombre d'occurrences par catégorie et par participant	167
C Occurrences de toucher	169
D Excitateur électrodynamique	171
E Test d'une méthode de contrôle actif modal	177
F Méthodologie de tests vibratoires	181
F.1 Mesures expérimentales	182
F.2 Mesures préliminaires	182
F.2.1 Analyse modale	182
F.2.2 Mesures en situation de jeu	182
F.3 Génération des vibrations	184
F.3.1 Réinjection directe du signal d'accélération	184
F.3.2 Fonction de transfert	185
F.4 Conclusion	187
G Comparaison de la carte son et de la carte d'acquisition	193
H Résultats des tests post-hoc de l'ANOVA du chapitre 5	195
I Résultats des test binomiaux du chapitre 6	199
Résumé	201

Introduction

Sommaire du présent chapitre

1.1 État de l'art	2
1.1.1 Qualités sonore et vibratoire des instruments de musique	2
1.1.2 Tests perceptifs : vers le jeu libre et la verbalisation libre	3
1.1.3 Retour vibrotactile	5
1.1.4 Retour vibrotactile en acoustique musicale : expression et perception	8
1.1.5 Modification des vibrations	10
1.1.6 Instrument d'étude : la guitare électrique <i>solid body</i>	13
1.2 Positionnement de la thèse	14
1.2.1 Problématique	14
1.2.2 Hypothèses générales	16
1.2.3 Organisation du manuscrit	16

Au sein de l'Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (UMR 8520), dans l'équipe d'acoustique rattachée à Junia où un axe de recherche est consacré à la guitare électrique, j'ai choisi d'étudier le rapport du guitariste à son instrument. La guitare électrique, par ses qualités sonores et vibratoires, prodigue au musicien un retour multisensoriel. Parmi les éléments qui constituent ce retour, l'ensemble des vibrations de l'instrument perçues par le musicien est appelé le « retour vibrotactile ».

Dans le domaine de l'acoustique musicale, bien des chercheurs ont apporté une contribution, tant en ce qui concerne la guitare électrique, qui est l'objet de mon étude, qu'en ce qui concerne plus généralement l'ensemble des instruments de musique. Ceci étant, dans le domaine de l'acoustique musicale, encore peu de chercheurs se sont intéressés au retour vibrotactile des instruments de musique, qui plus est dans le cas de la guitare électrique.

Après avoir décrit l'état actuel de ces recherches, je m'attache dans ce travail, dans un premier temps, à une analyse linguistique du ressenti des guitaristes électriques pour me consacrer dans un deuxième temps à l'analyse de la perception des vibrations de la guitare électrique.

1.1 État de l’art

1.1.1 Qualités sonore et vibratoire des instruments de musique

1.1.1.1 Qualité sonore

Dans le domaine de l’acoustique musicale, la qualité des instruments de musique a retenu particulièrement l’attention des chercheurs. Pinard *et al.* [PLV03] ont ainsi étudié les anches de clarinette, en faisant le lien entre le comportement vibratoire spécifique à chaque anche de la clarinette et la qualité sonore de l’instrument. Barthet *et al.* [Bar+10] ont montré l’influence du geste sur la perception sonore de ce même instrument. Ils ont identifié que le timbre pouvait être associé au temps d’attaque, au centroïde spectral et au rapport des amplitudes entre les harmoniques paires et les harmoniques impaires. Fritz *et al.* [FMD10] ont étudié le violon avec une analyse du discours des violonistes en situation de jeu, dans le but de comprendre l’évaluation de la qualité du violon par les musiciens.

La guitare électrique, elle, a été étudiée par Fleischer [FZ99], avec un regard particulier sur les notes pour lesquelles la durée de vibration de la corde est nettement plus courte que pour les autres notes à proximité¹ (*dead spots*, autrement appelé « notes mortes » en français). Les *dead spot* de la guitare électrique affectent la qualité de l’instrument. Les éléments de lutherie comme la touche jouent un rôle important dans le comportement vibratoire de la guitare électrique et exercent une influence décisive sur ces *dead spots*. Paté *et al.* [PLF13] ont mis en lumière les différences induites par des variations de l’essence du bois de la touche (ébène ou palissandre) sur le placement des *dead spots* et la qualité sonore de la guitare électrique. Ces deux études des *dead spots* de la guitare électrique s’intéressent exclusivement au comportement mécanique et vibratoire, sans s’intéresser ni au lien que l’on peut établir entre la perception du son et la perception des vibrations, ni à la perception des vibrations en tant que telle. Le comportement mécanique de l’instrument et ses vibrations sont mesurés sans que les chercheurs se préoccupent de la perception desdites vibrations.

Un aspect de la qualité sonore des instruments retenu par les chercheurs concerne la perception auditive du timbre. Un des objectifs des travaux sur le timbre des instruments a été d’identifier les mots qui permettent aux musiciens de distinguer les sons des instruments. Les travaux de Traube [Tra04] ont porté sur le timbre de la guitare classique et les liens avec les paramètres physiques du son. La description du timbre est faite par les musiciens à partir d’une liste proposée par les chercheurs. Les travaux de Lavoie [Lav13] ont porté sur le vocabulaire du timbre de ce même instrument et les stratégies d’enseignement de la production sonore appliquées à la guitare classique. Bernays et Traube [BT11] se sont intéressés à l’expression du timbre du piano et ont identifié cinq mots regroupant toutes les descriptions du timbre des pianistes : *bright* (« brillant »²), *dry* (« sec »), *dark* (« sombre »), *round* (« rond ») et *velvety* (« velouté »). Dans cette étude, Bernays et Traube ont demandé aux pianistes de quantifier leur familiarité avec les mots d’une liste de 14 mots proposés. Wallmark et Kendall [WK18] ont fait dans leur article un bilan des recherches sur le vocabulaire du timbre, en listant les mots identifiés comme pertinents pour la description du timbre, en relevant des termes tels que « brillant », « clair », « chaleureux », « plaisant », « riche », « nasal », « strident », « rugueux ». Ces études montrent tout l’intérêt des chercheurs pour le lexique du timbre et de la perception sonore.

1. Cette décroissance rapide au niveau des *dead spots* (notes mortes) a été montrée par Elie [Eli12, page 119].

2. Les mots en français ici sont une proposition de traduction à partir des mots anglais de l’article.

1.1.1.2 La pratique instrumentale : une expérience multisensorielle

Le son de l'instrument est certes perçu, mais l'instrument, par sa vibration et sa résonance, prodigue au musicien un retour, appelé retour vibrotactile. La pratique d'un instrument de musique est ainsi une expérience multisensorielle, car elle fait intervenir, entre autres, le sens de l'ouïe et le sens du toucher³. Des chercheurs se sont ainsi intéressés à la perception du retour vibrotactile de certains instruments de musique, comme le violon [SJF18; Wol+14], le piano [FGT18; GA03; SJF18] ou le clavecin [Pat+17]. Dans une étude sur le rôle du retour vibrotactile dans la perception des violonistes, Wollman *et al.* ont montré l'importance dudit retour en séparant la contribution de modalité tactile de la contribution de la modalité sonore par masquage⁴ [Wol+14]. D'après les travaux de Wollman *et al.* [WFP14], dans une situation d'écoute active avec l'ajout d'un retour vibrotactile, les violonistes jugent un même son comme étant plus fort et plus puissant en présence de ce retour qu'en son absence. Paté *et al.* ont montré que les clavecinistes perçoivent le son plus fort quand le toucher d'une note est plus dur, plus lourd [Pat+17]. Ces travaux montrent l'influence que peut avoir le toucher sur la perception du son.

Pour aller plus loin au sujet de l'importance du retour vibrotactile dans la pratique d'un instrument de musique, une expérience sur la perception multisensorielle de la qualité du piano a été menée par Galembo et Askenfelt [GA03]. Au cours de cette expérience, des pianistes ont évalué quatre pianos à queue de concert dans des conditions variables, l'une d'entre elles ne concernant que le sens du toucher. À partir du seul sens du toucher (le retour audio et le retour visuel étant masqués), les pianistes ont été capables d'identifier les différents instruments. Wollman *et al.* [Wol+14] ont de la même manière observé lors d'expériences que, avec seulement le sens du toucher (le retour audio était masqué), les violonistes étaient capables de juger de l'« intensité », de la « dynamique », de la « réponse », de la « richesse » et de la « palette sonore » d'un violon. Le sens du toucher, par le retour vibrotactile de l'instrument, joue donc un rôle important dans la perception du musicien.

1.1.2 Tests perceptifs : vers le jeu libre et la verbalisation libre

1.1.2.1 Psychophysique

Dans le domaine de la psychophysique, la physique (dans le cas présent, l'acoustique) est considérée comme point de départ de l'étude de la perception des instruments de musique. Goebel *et al.* [GBF14] ont étudié la perception de la qualité du son du piano, avec comme point de départ la vitesse de frappe des marteaux sur les cordes. Les auteurs ont montré que des sons produits à partir d'une vitesse de marteau identique, mais une forme de toucher différente, étaient différenciables par les musiciens. Placido *et al.* [PMS11] se sont intéressés aux différences physiques entre deux trompettes : ils ont montré que des différences acoustiques n'étaient pas forcément perceptibles. Ainsi, la modification de paramètres physiques a été testée auprès des

3. En plus du sens de l'ouïe et du sens du toucher, la pratique d'un instrument de musique fait également intervenir les autres sens, notamment le sens de la vue : les veines du bois, la couleur du bois, la couleur du cuivre, la courbure de la table d'un instrument, la forme d'une guitare, etc. Ce sens peut influencer la perception des musiciens, associant par exemple certains aspects visuels à des *a priori* sur le son des instruments. L'étude du retour visuel des instruments de musique sort du cadre de ce travail.

4. Le masquage, dans ce contexte, consiste à isoler la modalité à étudier, en empêchant l'utilisation des autres modalités. Par exemple, Wollman *et al.* ont « masqué » le retour vibrotactile des violonistes en faisant vibrer artificiellement la main gauche des violonistes (au moyen de bagues vibrantes). Dans ces conditions, ces derniers ne pouvaient plus se baser sur le ressenti tactile, mais seulement sur le retour sonore. Pour masquer le retour audio (et étudier le retour tactile), il peut être proposé aux participants de mettre des bouchons d'oreille ou un casque anti-bruit ; on peut également leur faire écouter du bruit large-bande, suffisamment fort pour masquer le son produit par l'instrument.

musiciens, en supposant qu'un lien direct existe entre ces paramètres et la psychologie des musiciens. Or, la description sur la base des paramètres physiques peut ne correspondre à aucune réalité psychologique. C'est ce qu'a écrit Gibson [Gib60, p.701] :

“Physical science portrays a sterile world. The variables of physics make uninteresting stimuli. Why is this true? I think it is because psychologists take for stimuli only the variables of physics as they stand in the textbooks. We have simply picked the wrong variables. It is our own fault. After all, physicists are not primarily concerned with stimuli. They have enough to do to study physical energies without worrying about stimulus energies. I think that we will have to develop the needed discipline on a do-it-yourself principle. It might be called ecological physics, with branches in optics, acoustics, dynamics, and biochemistry.”

Il a décrit dans son article le problème du choix arbitraire de variables physiques pour les questions de perception, car elles n'ont *a priori* pas de sens pour les participants, même si ça pourrait être le cas. Ce problème a été décrit par Windsor [Win17] dans le cas de la flûte traversière. La différence entre l'alignement et le décalage d'une des clés a une conséquence biomécanique importante, mais pas d'impact acoustique évident. Au contraire, de petits changements dans la position des trous de tonalité le long de la flûte n'ont presque aucun impact biomécanique, mais modifient sensiblement l'accord de la flûte.

D'après Gibson [Gib60], les conditions de laboratoire imposent une condition d'expérience inhabituelle aux instrumentistes, et les réponses des musiciens sont fortement influencées par les conditions de l'expérience. Cela suggère d'identifier ce qui est pertinent pour les participants dans leur pratique, afin de réaliser ensuite des études physiques et acoustiques dans des conditions acceptables sans problème par les musiciens qui y participeront.

1.1.2.2 Écologie des tests perceptifs

De plus, Gibson [Gib60, p.701] incitait implicitement à la pluridisciplinarité et évoque la possibilité d'une physique « écologique ». La discussion de la notion d'« écologie » des expériences a commencé en 1943 avec les premières explications du concept d'écologie dans le domaine de la psychologie par Lewin [Lew43] :

“Theoretically, we can characterize this task [predict in what situation an individual will find himself as a result of a certain action] as discovering what part of the physical or social world will determine during a given period the 'boundary zone' of the life space. This task is worth the interest of the psychologists. I would suggest calling it 'psychological ecology'.”

Lewin prévoyait d'appeler psychologie écologique un concept permettant de faire le lien entre la physique et la réalité sociale et psychologique. Les travaux de Brunswik [Bru56] détaillent les fondements de cette approche, qui a pour principe l'étude des participants dans leur environnement. Il faut comprendre en effet que les expériences en laboratoire font sortir les participants de leur environnement, mais que cela doit être compensé par les conditions de l'expérience, qui doivent être au plus proche de l'environnement habituel des participants.

Plus récemment, des chercheurs ont largement discuté de l'intérêt de mener des expériences en conditions écologiques valides, comme Guastavino [Gua09] et Neuhoff [Neu04].

1.1.2.3 Situation de jeu

D'après Saitis *et al.* [Sai+12], les musiciens parlent, lors des tests perceptifs, plus spontanément du son des instruments et du sens de l'ouïe plutôt que des autres sens. Si le champ

lexical du son est privilégié, cela peut être dû à la situation de test d'écoute qui ne prend pas en compte l'expérience de jeu des musiciens [Sai+12, page 4003] :

“By playing, violinists can experience a wider range of performance effects than the very short phrases or single notes often used in listening tests, and in this way assess any particular attribute of the instrument based on multi-modal sensory data (i.e., based on auditory and tactile feedback).”

En effet, les chercheurs ont le plus souvent effectué des tests d'écoute sans s'intéresser à la perception du musicien en train de jouer. Fritz et Dubois ont passé en revue la méthodologie d'évaluation perceptive des instruments de musique [FD15] et ont mis en évidence l'intérêt des tests en situation de jeu combinés à la production de données verbales. De plus, le contexte de jeu libre en situation habituelle de jeu favorise l'écologie des tests, comme identifié par Baumann et Halloran [BH04]. Les participants à l'expérience devaient écouter de la musique et changer de musique selon les recommandations proposées par le dispositif expérimental fourni. Baumann et Halloran ont montré que les choix de musiques à écouter étaient fortement dépendants du contexte d'écoute, en comparant la situation de laboratoire avec la situation que Baumann et Halloran appellent *in the wild*⁵. Cette étude a révélé que la perception de la similitude musicale pouvait être influencée par le contexte (social, géographique, etc.).

1.1.2.4 Perception située

En conséquence, dans l'approche choisie ici, il a été donné aux participants aux expériences un maximum de liberté (sur le jeu et la verbalisation) et un cadre de jeu le plus habituel possible. Mon travail s'inscrit ainsi dans la démarche dite de perception située. La perception située, telle que décrite par Brown [BCD89] ou par Clancey [Cla97], repose sur le fait que la perception se construit en action [Cla97, p. 1-2] :

“Every human thought and action is adapted to the environment, that is, situated, because what people perceive, how they conceive of their activity, and what they physically do develop together.”

Le savoir n'est pas séparable de l'action, n'est pas séparable du fait d'agir ou d'être en mouvement. S'inscrivant dans cette démarche de perception située, qui implique que la perception et les comportements soient observés *in situ* et que les musiciens soient interrogés sur leur ressenti en situation de jeu, les travaux de Dubois [Dub09] ont détaillé les méthodes associées à cette démarche. Fritz *et al.* [FMD10] ont souligné les différences dans l'évaluation du son du violon entre la situation d'écoute et la situation de jeu. Clarke a fait un lien direct entre la perception située et la validité écologique des expériences [Cla05, chap. 1].

1.1.3 Retour vibrotactile

1.1.3.1 Le sens du toucher

Les sensations sur la peau, générées par certaines cellules sensibles aux déformations mécaniques de la peau, sont à la base de la perception du retour vibrotactile. En cela, le sens du toucher est un sens proximal. Le fonctionnement du système somatosensoriel est expliqué en détail dans un livre de Gescheider, Verrillo et Wright [GVW10], qui ont porté une attention particulière aux mécano-récepteurs du corps humain et à leur influence dans la perception.

Les travaux de Verrillo [VFS69; Ver84; Ver92] font autorité dans l'étude des sensations vibrotactiles et sont systématiquement cités pour l'étude des seuils de perception en amplitude

5. Initiée par Hutchins [Hut08], cette situation dite *in the wild* signifie que l'étude est faite dans le contexte naturel d'écoute, les participants écoutant de la musique dans les lieux où ils ont l'habitude d'en écouter.

des stimuli vibrotactiles en fonction de la fréquence [Ver84; Ver92], ou pour la perception de l'amplitude des vibrations [VFS69]. Ces travaux ont permis de présenter une courbe de sensibilité aux vibrations (mesurées à partir du déplacement) en fonction de la fréquence, en forme de « U » comme illustré par la figure 1.1, avec des fréquences autour de 250 Hz comme zone de sensibilité maximum. Ces résultats ont été repris récemment par Merchel et Altinsoy [MA20], qui en ont fait le bilan, afin de comparer les connaissances sur le sens du toucher et de l'ouïe. Le bilan qu'ils ont dressé des connaissances sur le sens du toucher est synthétisé dans le tableau 1.1.

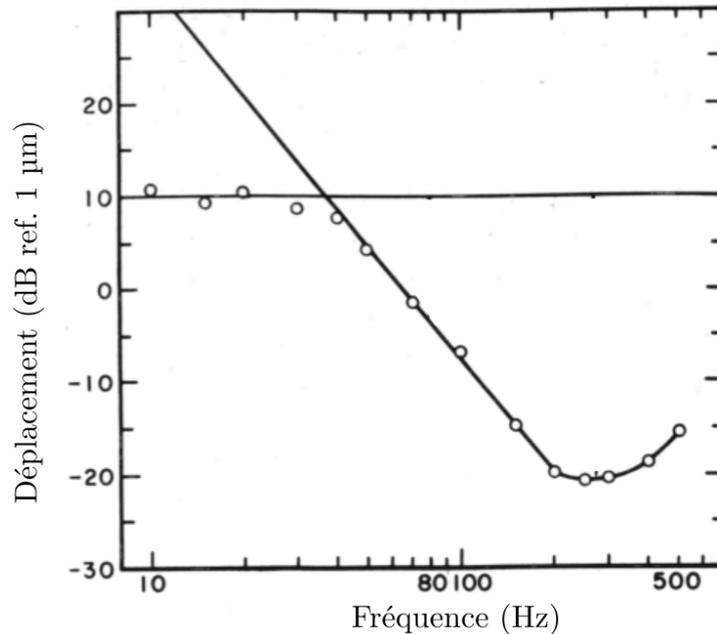


FIGURE 1.1 – Courbe du seuil de perception des vibrations en fonction de la fréquence du signal vibratoire, présentée par Verrillo [Ver84, page 229].

Fréquences perceptibles	< 1 kHz
Pic de sensibilité	250 Hz
Seuil différentiel (JND)	
Amplitude	0,4 dB < JND < 2,3 dB
Fréquence	5 Hz < JND < 100 Hz
Temps	8 ms < JND < 12 ms

TABLEAU 1.1 – Quelques résultats sur les capacités humaines de perception vibrotactile, selon le bilan dressé par Merchel et Altinsoy [MA20]. Le JND (*Just Noticeable Difference*), autrement appelé « seuil de discrimination », est défini comme le plus petit changement dans un stimulus pouvant être détecté par un individu.

1.1.3.2 Timbre vibrotactile

Le retour vibrotactile des instruments de musique est un signal qui peut être qualifié de complexe par son contenu fréquentiel, au même titre que le retour sonore. Il est tentant de relier la forme d'onde d'un signal vibrotactile à la notion de timbre, tel qu'il est étudié en perception sonore. Certains travaux vont jusqu'à affirmer qu'il est possible de distinguer le « timbre vibrotactile » des instruments, c'est-à-dire de remarquer une différence entre des signaux complexes de même fréquence fondamentale en comparant les signaux d'instruments [RAF12] ou des signaux de synthèse [YMW15].

Russo *et al.* ont comparé trois instruments (le piano, le violoncelle et le trombone) en envoyant directement des signaux vibratoires dans le dos des musiciens [RAF12], avec un masquage de la perception sonore. Les signaux vibratoires présentés étaient basés sur des signaux issus d'enregistrements audio (et non pas vibratoires), de même fréquence fondamentale, de même durée et de même amplitude. Pour chaque évaluation, deux signaux étaient présentés aux musiciens, qui devaient juger s'il s'agissait de signaux identiques ou différents. Russo *et al.* ont montré que, dans ces conditions, les musiciens ont su différencier les instruments.

Young *et al.* se sont, eux, intéressés à trois types de signaux purement synthétiques : sinusoidal pure, dents de scie ou créneau [YMW15]. Les stimuli, correspondant à trois vibrations différentes, sont envoyés sur la main, au-dessus de la première phalange des cinq doigts. Les stimuli avaient une fréquence fondamentale identique (160 Hz) et des amplitudes normalisées, selon une précédente étude de Young *et al.* [YMW13] sur les seuils de perception des différents signaux. Ils ont montré qu'il était tout à fait possible de distinguer les trois types de signaux à cette fréquence de 160 Hz.

Ces études ont permis de montrer la capacité des participants à distinguer des signaux de même fréquence fondamentale, de même durée et de même amplitude, et donc d'identifier des caractéristiques liées au « timbre vibrotactile ». Cependant, une limite de ces travaux est que les signaux ne correspondent pas à des stimuli d'origine vibratoire. De plus, il n'est pas fait mention du rôle précis du contenu fréquentiel dans l'identification des signaux vibratoires complexes. De fait, la présence de certaines fréquences spécifiques autour du pic de sensibilité (250 Hz) pourrait être déterminante.

1.1.3.3 Applications connues

Les questions sur la perception des vibrations ont fait l'objet de nombreuses recherches, car le retour vibrotactile peut être utilisé pour beaucoup d'applications. Beaucoup d'articles en font le bilan. Choi et Kuchenbecker [CK13] se sont concentrés sur les différents types d'actionneurs utilisés pour générer des vibrations et les différentes applications d'utilisation de ces actionneurs. Giri *et al.* [GMZ21] se sont particulièrement intéressés aux applications médicales du retour vibrotactile pour la micromanipulation, le rendu tactile en réalité virtuelle ou la téléopération. Hayward *et al.* [Hay+04] ont présenté les différents domaines d'application du retour vibrotactile comme la création artistique, l'aide à la navigation dans les véhicules, l'entraînement chirurgical.

Écran tactile Une des applications devenue courante et sujette à de nombreuses études concerne le retour haptique pour les écrans tactiles, ainsi nommés pour la possible interaction directe de l'utilisateur avec l'écran (ordinateur, tablette, téléphone, etc.).

Il est aujourd'hui question d'un retour haptique de cet écran vers l'utilisateur pour la sensation des textures. Basdogan [Bas+20] a publié récemment un article sur la technologie utilisée pour les surfaces haptiques (conversion de surfaces tactiles « passives » – inertes –, comme les écrans de téléphone, en surfaces « actives ») et les applications potentielles des dites surfaces haptiques.

Réalité virtuelle Dans le domaine de la réalité virtuelle, il est envisagé d'utiliser le retour vibrotactile comme un outil, en créant des stimuli vibratoires. L'objectif de la création d'un retour vibrotactile est notamment de rendre les expériences virtuelles plus « immersives » [BP12 ; Pen+20 ; VL19], ou plus « réalistes » [Gra+19], mais également pour enrichir les situations d'écoute [TWW20 ; Wes+19]. Grant *et al.* [Gra+19] ont montré que l'ajout d'un retour haptique améliorerait le niveau de réalisme de l'expérience virtuelle. Leurs résultats ont été obtenus en conditions dites de « low-fidelity », car le retour haptique était constitué d'une simple vibration dont le stimulus est généré par des moteurs délivrant une fréquence unique. Ces moteurs ne sont pas adaptés pour générer des signaux complexes comme le retour vibrotactile d'un instrument de musique, mais il est intéressant de constater que des résultats encourageants sont obtenus dans des conditions de « low-fidelity ».

1.1.3.4 Le toucher comme sens de substitution

Le sens du toucher peut être utilisé pour se substituer à d'autres sens. L'exemple le plus connu est l'alphabet Braille pour compenser une déficience visuelle. Cet alphabet est tactile, mais ne délivre pas de vibration, il n'est donc pas vibrotactile. Ceci étant, un dispositif vibrant a été commercialisé à partir des travaux de Goldish et Taylor [GT74], baptisé « Optacon » (*Optical to TActile CONverter*), utilisé comme aide à lecture pour les personnes non voyantes. Le signal d'une caméra placée sur un livre était ensuite transmis à une matrice d'excitateurs placés sous l'index et vibrant à 230 Hz. Nicolau *et al.* [Nic+13] ont proposé un dispositif de lecture vibrotactile qui exploite les connaissances en braille des utilisateurs pour lire des informations textuelles. Le dispositif était composé de six actionneurs commandés à 200 Hz, utilisés pour coder une cellule braille et communiquer des caractères uniques.

Pour la substitution du toucher à une déficience auditive, des travaux ont porté sur la transmission de vibrations aux sourds. Dans les travaux de Petry *et al.* [PIN16], la transmission de vibrations est utilisée pour l'apprentissage d'un instrument ; dans les travaux de Paté *et al.* [Pat+22], elle est utilisée pour favoriser la participation des malentendants à des concerts. Ces deux études ont l'avantage de proposer un système portable pour le retour vibrotactile. D'autres travaux étudient l'utilisation du sens du toucher pour transmettre les informations sonores au corps à l'aide de vibrations [Kar+10 ; Nan+09] : y sont présentées des « chaises haptiques ». Un article de Yao *et al.* a présenté des chaussures spécialement conçues pour les danseurs malentendants [Yao+10], le rythme et le tempo étant communiqués et perçus par l'interaction vibrotactile.

1.1.3.5 Langage tactile

Le retour vibrotactile peut être utilisé comme sens de substitution, voire comme moyen de communication en espaces virtuels [Bas+00]. En musique, cela fait même l'objet de recherches pour la conception d'un langage musical tactile comme le propose Briceno [Bri21]. Giordano *et al.* [GSW18] ou West *et al.* [Wes+19] cherchent quant à eux à créer des partitions portables et le moyen de communiquer les informations desdites partitions. Ces réflexions vont jusqu'à la création d'un langage de composition tactile, c'est ce que proposent Gunther et O'Modhain [GO03].

1.1.4 Retour vibrotactile en acoustique musicale : expression et perception

Fritz et Dubois [FD15] ont mis en évidence l'intérêt des tests en situation de jeu combinés à la production de données verbales. Or, les mots étudiés ou observés en acoustique musicale,

même dans les tâches de jeu [Nav13; Pat14; Pat+15; Sai+12; Wol+14], se concentrent dans une large mesure sur la perception des termes sonores (« richesse », « clarté », « couleur », « aigu », « équilibre », « chaleur », « basses », « timbre », « sonorité », « sustain », etc.).

1.1.4.1 Expression du retour vibrotactile

Comme vu précédemment en section 1.1.1.1 (p. 2), le lexique du timbre est très fourni et fortement étudié dans la littérature. Qu'en est-il des mots pour parler du sens du toucher ? Verine a récemment dédié un livre complet à l'expression du sens du toucher en français [Ver21], montrant ainsi qu'il existe un riche vocabulaire pour décrire ce sens. Le vocabulaire de la perception des vibrations y est abordé [Ver21, chap. 8]. En revanche, le vocabulaire associé au retour vibrotactile des instruments de musique n'y est pas vraiment abordé.

Parmi les études du retour vibrotactile des instruments de musique, on peut citer les travaux de Fritz *et al.* [FMD10; Fri+12], Saitis *et al.* [Sai+12; Sai+17; SJF18] et Wollman *et al.* [Wol+14] sur le violon. Dans le cas de l'étude du violon, Fritz *et al.* [FMD10] ont distingué deux dimensions dans l'évaluation du violon par les musiciens :

- le son émis par le violon ;
- le violon en tant que tel.

Ces dimensions font donc apparaître une distinction entre le son de l'instrument (le violon) et l'instrument lui-même, par l'étude du discours des musiciens. Saitis *et al.* [Sai+12] ont ajouté une troisième dimension :

- l'interaction musicien-instrument.

Dans le vocabulaire associé à cette interaction apparaissent par exemple les mots suivants : « facilité de jeu », « réponse », « jouabilité », « ressenti », « confort » et « flexibilité ». L'interaction se définit comme une « action réciproque »⁶. Cette définition, appliquée à l'interaction musicien-instrument, souligne alors le rapport du musicien à l'instrument quand il joue de cet instrument (action du musicien) et réagit au son et aux vibrations produits (réaction de l'instrument). De même, l'instrument émet un son (action de l'instrument), pour lequel le musicien va adapter son geste (réaction du musicien).

Le lien entre l'interaction musicien-instrument et le retour vibrotactile n'est pas directement présenté dans ces travaux. C'est dans son travail sur le retour vibrotactile du violon que Wollman [Wol+14] a ajouté un terme spécifique à l'information tactile : *Liveliness* (« vivacité »). Au sujet de la guitare électrique, Navarret [Nav13] et Paté *et al.* [Pat14; Pat+15] ont catégorisé les mots importants du discours des guitaristes électriques selon qu'ils se rapportent au son, à l'instrument, voire à l'interaction entre le musicien et son instrument. Leurs objectifs étaient d'étudier l'influence exercée par des modifications d'éléments de lutherie sur la perception sonore des guitaristes.

Dans ces travaux sur le violon et la guitare électrique, les mots ne décrivant pas le son émis par l'instrument sont liés soit à l'instrument lui-même, soit à l'interaction entre le musicien et l'instrument. Dans ces cas (description de l'instrument ou de l'interaction musicien-instrument) où les musiciens ne parlent pas de son, à quel autre sens font-ils référence ? Le toucher pourrait être le sens désigné quand les musiciens décrivent l'interaction entre le musicien et son instrument, même si cela n'a pas été montré dans les études précitées.

6. Paul Robert, *Le Petit Robert, dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, Montréal, Paris, 2011, p. 1351, 2^e colonne.

1.1.4.2 Expression de l'interaction musicien-instrument

Pour décrire l'interaction musicien-instrument, les auteurs des études précédemment citées [Fri+12; Nav13; Pat+15; Pat14; Sai+12; Sai+17; SJF18; Wol+14] ont identifié un nombre considérable de mots (voir tableau 1.2, p.11). Le vocabulaire présenté n'établit pas de lien direct avec le sens du toucher, mais pourrait servir de base à l'étude de la perception du sens du toucher.

Derrière le concept d'interaction musicien-instrument se trouve la capacité des musiciens à maîtriser des gestes permettant de contrôler la production sonore. Dans les études contenant des verbalisations de ce qui pourrait être l'interaction musicien-instrument, il est parfois plutôt précisé « musicien et instrument ».

1.1.4.3 Perception du retour vibrotactile sur les instruments classiques : séparation des modalités

Lorsqu'ils ont étudié les modalités sensorielles en acoustique musicale, les chercheurs ont sélectionné une modalité à la fois en masquant les autres lors de leurs expériences. C'est ainsi que Russo *et al.* [RAF12], Wollman *et al.* [Wol+14] et Young *et al.* [YMW15] ont imposé un masquage auditif aux musiciens participants. Ces derniers devaient porter un casque audio dans lequel était diffusé un bruit blanc, pour éviter que les signaux vibratoires étudiés soient entendus [RAF12; YMW15] ou pour s'assurer que les violonistes n'entendaient pas le son de leur instrument pendant qu'ils jouaient [Wol+14]. La technique de masquage se base sur la saturation du sens à masquer, en ajoutant du bruit pour empêcher le musicien d'entendre le son. La même démarche est utilisée pour le masquage tactile. Vardar *et al.* [VGB18] ont abordé les seuils de perception tactile en conditions d'expérience avec ou sans masquage, pour des applications aux écrans tactiles. Le signal pour le masquage proposé est un bruit blanc filtré autour de la fréquence des signaux de tests à 125 Hz (bande passante de 75 Hz à 200 Hz). Zook *et al.* [ZFO21] se sont intéressés aux effets du masquage tactile sur la perception des signaux d'étirement et de compression de la peau. Dans leurs études sur le violon, Wollman *et al.* [Wol+14] ont proposé de découpler modalité auditive et modalité vibratoire. Ils ont imposé aux violonistes un système de bague vibrante, produisant un signal empêchant les musiciens de ressentir le retour vibrotactile de leur instrument. Afin de découpler les modalités, ces chercheurs ont dû créer des situations relativement inhabituelles pour les musiciens.

Le masquage permet de s'intéresser à une modalité indépendamment des autres, au détriment des conditions écologiques. La difficulté du découplage des modalités pour les instruments de musique réside notamment dans le fait que le son est émis à partir des vibrations du corps de l'instrument. Or, les instruments amplifiés permettent par nature une séparation spatiale entre la modalité auditive (amplificateur) et la modalité vibratoire (instrument), comme c'est le cas pour la guitare électrique.

1.1.5 Modification des vibrations

Pour l'étude du retour vibrotactile des instruments de musique, une alternative au masquage envisagée par les chercheurs a été de modifier le retour de l'instrument.

1.1.5.1 Contrôle des vibrations pour la perception sonore

Dans un premier temps, les modifications des vibrations des instruments de musique ont eu pour but de contrôler le son des instruments, ainsi les travaux de Benacchio *et al.* [Ben+16] sur la guitare acoustique et de Boutin *et al.* [BBP15] sur les lames de xylophone. Les techniques

Référence	Catégorie	Mots employés (traduits en français le cas échéant)
[Fri+12]	Facilité de jeu	<i>vivant, équilibré, propre, clair, fermé, mort, terne, égal, libre, plein, lourd, intéressant, vif, ouvert, résonnant, réactif, riche, sonore, déséquilibré, inégal, insensible, chaleureux, faible</i>
[Sai+12]	Interaction Instrument	<i>facile de jeu, réponse, jouabilité, ressenti, confort, flexibilité</i> <i>poids, forme, balance, réponse</i>
[Wol+14]	Tactile	<i>vivacité</i>
[Sai+17]	Réponse	<i>facile à jouer, réactif, large gamme dynamique, léger, confortable, rapide, jouabilité, flexible, capacité à créer différents timbres, polyvalent, action faible, prévisible, maniable, liberté, solidité, amorti, pratique à manipuler, assez de place pour contrôle, réflexe, bien ajusté, petit, touche agréable, bon chevalet, sentir un contact sain de l'archet sur la corde, répondre au quart de tour, donner beaucoup en retour, prendre beaucoup de poids de l'archet, pour tenir tête à ce que le joueur donne dur à jouer, lourd, inconfortable, plus d'effort, difficile à jouer, lent, manque d'accordage, volumineux, gros, maladroit, rigide, trop léger, vibrato laborieux, grand manche, pour se battre avec l'instrument [pour produire le son désiré]</i>
	Équilibre	<i>égal, équilibré, égal, cohérent, stable, l'équilibre entre les cordes, relation entre les cordes, focalisé, les cordes s'harmonisent le mieux, différentiels de cordes, égal, inégal, ne pas se sentir aussi bien sur les cordes graves</i>
	Intérêt	<i>beau, bien, qualité, couleur, intéressant, sympa, unique, agréable, timbre, agréable à jouer, génial, plaisant, inspirer, basique, naturel, avoir du caractère, parfait, rare, complet, fascination, satisfaction, préférence, attrayant, amusant à jouer, pour se sentir bien, un son que je recherche irritant, désagréable, sans intérêt, ennuyeux, envahissant, générique, impersonnel, ne pas aimer, le son est comme un enregistrement de mauvaise qualité</i>
[SJF18]		<i>réponse, jouabilité, résonance, intensité, balance, projection</i>
[Pat+15]	Attaque	<i>attaque, dynamique, réponse, répondre, expressivité, impact, vivant, doux, mou</i>
[Pat14]		<i>confort, sensibilité à la dynamique, toucher, évaluation poids, manche, jouabilité, résonance, masse, réglage du manche, poids, réponse aux doigts sur le manche (main gauche, main droite), hauteur du sillet de tête, lutherie, objet, physique, facilité de jeu</i>
[Nav13]	Attaque	<i>aigu, aiguisé, attaque, attaque franche, attaquer, quantité d'aigus, chante, chewing-gum, claquer, complicité, costaud, ne déborde pas, densité de matière, dur, plus d'énergie, dynamique des attaques, enveloppe plus resserrée, finesse, flûté, froid, incisif, intonation, mordant, mou, percutant, percuter, personnalité, précis, présence, raide, réagit assez vite, répondant, réponse, qui va ressortir, sec, tonique, tranchant</i>
	Confort	<i>conduction, confort, ergonomie, facile à jouer, intonation, jouabilité, justesse, réglage, sensations, toucher</i>

TABLEAU 1.2 – Mots identifiés dans les études des instruments de musique (références dans la première colonne) comme n'étant pas associés au son émis par l'instrument. La classification par catégorie définie le cas échéant par les auteurs figure dans la deuxième colonne. Les mots de ce tableau sont traduits des mots présentés dans les articles lorsque ceux-ci étaient en anglais.

utilisées dans ces travaux sont des techniques de contrôle actif modal⁷. Ces techniques permettent d’injecter un signal vibratoire, au moyen d’un capteur et d’un actionneur, dont l’objectif est de contrôler les paramètres modaux d’un mode de résonance en particulier.

1.1.5.2 Rôle des modifications du retour vibrotactile pour la perception

En intégrant capteurs et actionneurs dans un violon, Flückiger *et al.* [FGT19] ont montré que les conditions de vibration affectaient le jugement des musiciens sur la qualité de l’instrument en ce qui concerne le son et la jouabilité. Une autre manière de montrer l’importance du retour vibrotactile dans la perception des pianistes a été testée par Flückiger *et al.* [FGT18] : les expérimentateurs ont amplifié le retour vibrotactile au niveau d’une touche, les pianistes percevant alors des différences sonores. Une fois encore, ces études montraient l’influence du retour vibrotactile sur la perception sonore sans directement s’intéresser à l’influence de ce retour sur le geste des musiciens.

1.1.5.3 Les instruments augmentés

Le retour (sonore ou vibrotactile) des instruments peut être modifié pour des applications artistiques à l’aide d’actionneurs, créant ainsi des instruments augmentés. Un instrument de musique augmenté peut être, selon Lähdeoja [Läh10, page 21], considéré comme « le résultat d’une hybridation entre lutherie acoustique, électromécanique et numérique, constituant un outil d’expression musicale opérant dans un contexte *live*. Dans son emploi courant actuel, ce terme est utilisé spécifiquement pour nommer un instrument de musique acoustique ou électro-acoustique qui s’étend vers les domaines technologiques analogiques et numériques ». En cela, la guitare électrique peut être considérée comme un instrument augmenté par la présence de l’amplificateur d’une part, et par l’utilisation d’autre part de – nombreuses – pédales d’effet.

Overholt *et al.* [OBH11] ont présenté le développement de plusieurs instruments : le tambour haptique, la guitare à résonance de rétroaction, le piano à préparation électromagnétique et le violon harmonique. McPherson [McP10] a développé un système électromagnétique permettant d’exciter les cordes de piano comme un archet de violon pourrait le faire, un procédé directement inspiré d’un dispositif pour la guitare électrique, l’*EBow* [Hee78]. Arslan *et al.* [Ars+22] ont proposé une interface de réalité augmentée associée à des actionneurs placés sur des instruments de musique. Un actionneur a été placé dans une guitare pour faire sonner les cordes d’une nouvelle manière, inscrivant les travaux des auteurs dans le domaine des instruments augmentés. Le système ainsi créé a été intégré à un processus de création musicale basée sur l’improvisation.

1.1.5.4 Les instruments numériques avec retour vibrotactile

Le sens du toucher est si important pour un musicien jouant d’un instrument que les nouvelles interfaces pour la musique, bien qu’elles soient souvent virtuelles ou dématérialisées, ont dû inclure un retour vibratoire pour procurer des sensations plus réalistes [BS09 ; BSO08 ; Hay13 ; MW06 ; SM14].

Marshall et Wanderley [MW06] ont étudié les dispositifs pouvant être utilisés dans la création de retour vibrotactile et présenté des instruments numériques qui utilisent ces dispositifs. Berdahl *et al.* [BS09] ont proposé une méthode de construction d’instruments de musique haptiques, sur la base de lois physiques, et ont montré que leur système améliorerait la qualité de l’interaction

7. Le contrôle actif modal relève du domaine du contrôle actif des vibrations, comme largement présenté par Fuller *et al.* [FEN96]. Les objectifs du contrôle des vibrations sont résumés par Benacchio [Ben14] : éviter l’endommagement des structures soumises à des vibrations parasites ; améliorer le confort des personnes soumises au bruit ; améliorer la précision de certains outils en éliminant le bruit (perturbant la qualité des outils en question).

du musicien avec l'instrument virtuel. Hayes [Hay13] a travaillé sur l'augmentation d'un piano avec un retour haptique placé sur le musicien : des actionneurs ont été placés sur les mains de l'interprète à l'aide d'un gant (mitaine) fin et léger. Le système de rétroaction créé a permis à l'interprète et à l'instrument d'être plus étroitement liés, ce qui influence considérablement les résultats musicaux, non seulement dans la situation de performance, mais aussi dans le processus de création.

1.1.6 Instrument d'étude : la guitare électrique *solid body*

1.1.6.1 Choix de la guitare électrique

La guitare électrique *solid body* a été choisie pour ce travail, en raison de son faible rayonnement acoustique [FZ98 ; Läh+10]. De plus, l'émission du son (amplificateur) est spatialement séparée de l'émission des vibrations (corps de la guitare). En comparaison avec les instruments acoustiques, ce meilleur découplage des modalités sonores et vibratoires doit permettre de focaliser plus facilement les tests perceptifs sur la perception vibratoire.

1.1.6.2 Organologie

La spécificité de la guitare électrique dite *solid body* réside en l'absence de caisse de résonance, le corps de la guitare est plein (et non creux comme est celui de la guitare acoustique ou de la guitare électrique *hollow body*). Précisément étudiée d'un point de vue organologique par Navarret [Nav13], elle est considérée par Lähdeoja [Läh10] comme un instrument augmenté.

1.1.6.3 Électronique

Cet instrument a fait l'objet de nombreuses recherches sur les micros (voir figure 1.2), autrement appelés *pickups*, qui y sont installés [HM09 ; LL07 ; LLB14 ; Nov+16], avec un regard particulier sur le signal transmis à l'amplificateur et finalement un regard sur le son.

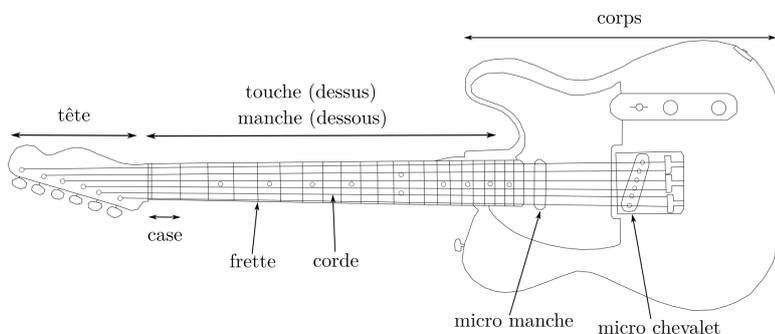


FIGURE 1.2 – Schéma d'une guitare électrique *solid body*, sur le modèle de guitare *Telecaster* de *Fender*, et dénomination des parties utiles à la compréhension des différents chapitres de cette thèse.

1.1.6.4 Mécanique

Les propriétés mécaniques de la guitare électrique ont été étudiées dans les travaux de Fleischer *et al.* [FZ99 ; FZ98]. Ils ont mis en évidence l'influence exercée par le comportement

mécanique de la guitare sur la présence de *dead spots* (voir p. 2). Sur la base de ce comportement, Paté *et al.* [PLF14] ont établi un modèle permettant de prévoir le temps de décroissance des notes et d’identifier les *dead spots*. Le Carrou *et al.* [LCP14; LPC19] ont mesuré l’influence du guitariste sur les propriétés vibratoires de la guitare électrique, montrant que la présence du guitariste augmentait l’amortissement de certains modes de la guitare. À noter que ces études ne font pas de lien direct entre les propriétés mécaniques de la guitare électrique et la perception des vibrations de cet instrument. Ahvenainen [Ahv19] a classé les essences de bois utilisées pour la guitare électrique selon leur densité : faible (pour le corps de la guitare), moyenne (pour le corps et le manche) et forte (pour la touche). Il a étudié leurs propriétés mécaniques et anatomiques et a identifié des paramètres à prendre en compte (densité et module élastique) pour vérifier qu’une essence de bois est adaptée ou non à la guitare électrique.

1.1.6.5 Perception des éléments de lutherie

Des travaux ont été menés sur la perception des guitaristes électriques en fonction de variations dans la jonction corps-manche par Navarret [Nav13], et en fonction de variations dans le matériau utilisé pour la touche par Paté [Pat14]. Dans ces deux études, des guitaristes ont participé à des expériences en situation de jeu libre et de verbalisation libre. Navarret et Paté ont cherché à faire le lien entre ces variations et la perception sonore, il n’a donc pas été question de perception vibrotactile dans leurs travaux.

1.2 Positionnement de la thèse

1.2.0.1 Thématiques de travail

De cette introduction, trois thématiques se dégagent :

- Expression du retour vibrotactile (comment les guitaristes s’expriment sur le sens du toucher en situation de jeu) ;
- Perception des vibrations (comment les musiciens ressentent les vibrations et comprennent les signaux vibratoires) ;
- Modification des vibrations (comment les guitaristes réagissent aux modifications des vibrations).

J’ai choisi de les aborder en observant les comportements des guitaristes et de leur instrument, en l’occurrence la guitare *solid body*, et en questionnant fondamentalement le lien entre le guitariste et son instrument. La figure 1.3, inspirée de Lähdeoja [Läh10] et de Paté [Pat14], illustre ce questionnement. Dans le cadre de ce travail, la modification sonore, déjà présente et contrôlée par les guitaristes, est associée à la modification vibratoire.

1.2.1 Problématique

La problématique de la présente thèse est la compréhension du ressenti vibrotactile des guitaristes électriques *solid body*, par les mots et par les gestes.

Pour répondre à cette large problématique, des études linguistiques, physiques et psycho-acoustiques sont conjointement menées. Plus précisément, les questions suivantes sont abordées :

- **Comment les guitaristes parlent-ils du sens du toucher en situation de jeu ?**

Les guitaristes, plus généralement les musiciens, ainsi que les acousticiens, attachent une importance particulière aux aspects sonores. Si les musiciens s’expriment spontanément sur leur

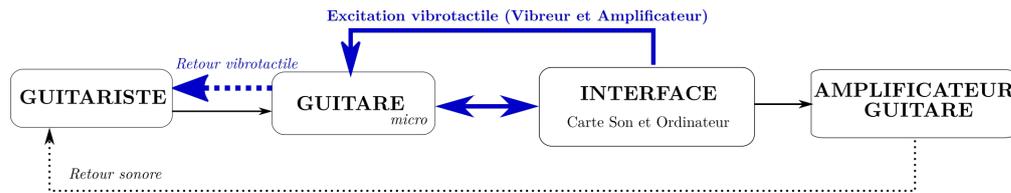


FIGURE 1.3 – Schéma simplifié de la chaîne électro-acoustique de la guitare électrique, inspirée de Lähdeoja [Läh10] et de Paté [Pat14], avec l’ajout de la modification vibratoire envisagée pour ce travail de thèse (en bleu). L’interface (carte son et ordinateur) n’est pas utilisée dans le cas habituel d’utilisation de la guitare électrique (où la guitare est directement branchée à l’amplificateur).

perception du son, qu’en est-il pour la perception des vibrations ? Comme j’ai essayé de le montrer dans ce chapitre d’introduction, les musiciens sont sensibles au retour vibrotactile de leur instrument. Les différences de retour vibrotactile sont exprimées par les musiciens (et les chercheurs) en fonction de leur perception sonore.

Est-ce que les musiciens s’expriment directement sur le sens du toucher et le retour vibrotactile ? Si oui, comment en parlent-ils ? Peut-on identifier des critères ou des mots permettant aux musiciens de décrire le sens du toucher et leur perception des vibrations ?

Je montrerai que les guitaristes s’expriment spontanément sur le sens du toucher, et que certains mots permettent particulièrement aux musiciens de parler du retour vibrotactile.

- **Quelles informations fréquentielles sont perçues par les guitaristes ?**

Les guitaristes électriques sont sensibles aux vibrations de leur instrument, à des stimuli présentant un spectre complexe. Il a été montré (p. 3-4 de ce chapitre d’introduction) que les musiciens pouvaient distinguer des stimuli vibratoires avec une quantité variable de composantes fréquentielles. En supposant qu’une partie des stimuli vibratoires puisse ne pas être utile à la perception des guitaristes, quelles composantes fréquentielles du retour vibrotactile le sont-elles ? Peut-on alors réduire le contenu fréquentiel du signal sans en affecter la perception ?

Nous verrons que le retour vibrotactile peut être simplifié sans altérer les sensations des guitaristes.

- **Est-ce que la modification des vibrations est compatible avec les conditions écologiques ? Quel contrôle des vibrations peut-on laisser aux guitaristes ?**

Les études citées dans ce chapitre d’introduction (p. 9) sur le retour vibrotactile en situation de jeu ont été effectuées soit en masquant la modalité sonore, soit en étudiant l’influence de ce retour sur la perception du son. En cas de modification des vibrations, est-ce que les musiciens discuteront de l’influence de ces modifications sur leurs sensations tactiles ?

Peut-on envisager d’ajouter des vibrations pendant le jeu du guitariste ? Comment les guitaristes vont-ils réagir aux modifications des vibrations ?

Nous observerons, en conditions écologiques, que l’ajout d’un retour vibrotactile offre de nouveaux moyens d’expression à l’instrument, et qu’il peut être utilisé pour augmenter la concentration des guitaristes lors d’expérience en laboratoire et leur donner en ces circonstances des sensations équivalentes à celles qu’ils éprouvent en situation de concert.

1.2.2 Hypothèses générales

Chaque étape de ce travail est centrée sur le musicien, son expérience de la guitare et sa perception du retour vibrotactile. Tous les résultats obtenus sont directement et concrètement liés à l'expérience des musiciens. Des hypothèses sont formulées pour ce travail :

Interaction musicien-instrument L'interaction musicien-instrument est élargie aux descriptions conjointes du musicien et de l'instrument. Cette hypothèse a l'avantage de simplifier les analyses et de catégoriser rapidement l'objet décrit dans le discours des musiciens. De plus, les mots identifiés dans le tableau 1.2 (p. 11) et décrivant autre chose que le son émis par l'instrument sont parfois identifiés par les auteurs des études citées comme relevant à la fois du musicien et de l'instrument (plutôt que de l'interaction musicien-instrument).

Guitaristes électriques Il est supposé que, par leur habitude des modifications sonores, les guitaristes électriques sont parmi les plus à même de manipuler des signaux « étranges » ou inhabituels.

Reproduction des vibrations Il est supposé que la reproduction exacte des vibrations nécessite à la fois la mesure des vibrations avec un capteur (piézoélectrique, de type accéléromètre) et la mesure de la fonction de transfert entre l'excitateur (électrodynamique) et le capteur.

1.2.3 Organisation du manuscrit

La suite du manuscrit s'articule en deux parties principales, chacune composée de plusieurs chapitres.

Dans la partie I, une méthodologie d'analyse de verbalisations est proposée et développée (chapitre 2). Pour analyser la perception du retour vibrotactile, le discours sur le sens du toucher est étudié à l'aide d'outils linguistiques. Des mots pouvant être liés au toucher, en tant que descripteurs de l'interaction musicien-instrument, ont été recherchés dans des transcriptions de tests perceptifs réalisés avec des guitaristes électriques. Ces mots sont « confort », « dynamique », « réponse », « ressenti », « toucher » et « vibration ». La méthode ainsi développée est appliquée au discours des musiciens lors d'expériences s'inscrivant dans les principes de l'approche écologique et de perception située (chapitre 3). Les résultats obtenus sont discutés chapitre 4, dans le but de faire des recommandations aux chercheurs qui voudraient mener une expérience avec des musiciens en situation de jeu focalisée sur le sens du toucher.

La partie II est consacrée à la perception du retour vibrotactile de l'instrument par les musiciens et à la modification de ce retour. La modification du retour vibrotactile est basée sur son augmentation, en reproduisant le signal vibratoire d'origine. Au chapitre 5, l'expérience réalisée avec des guitaristes permet d'analyser à quelles composantes fréquentielles le signal vibratoire peut être réduit sans affecter la perception des guitaristes. Pour effectuer une modification tout en conservant des conditions écologiques, il est montré au chapitre 6 que le signal peut être récupéré à partir du micro de la guitare (plutôt que mesuré avec un accéléromètre). Enfin, une guitare a été augmentée en vibration au chapitre 7. Dans cette expérience, les guitaristes ont pu contrôler le retour vibratoire de l'instrument, comme ils ont l'habitude de contrôler le son avec amplificateurs et pédales d'effet.

Pour finir, la partie III conclut le manuscrit et rappelle les principaux résultats obtenus, ainsi que les limites et perspectives de ce travail.

Première partie

**L'expression verbale du ressenti
tactile par les guitaristes :
analyse linguistique**

Avant-propos

Ce travail de thèse est consacré aux vibrations de la guitare électrique et à la perception de ces vibrations. Dans l'introduction (chapitre 1), il a été vu que le vocabulaire du toucher, en situation de jeu instrumental, n'a pas été identifié aussi largement et précisément que le vocabulaire du son. Il est alors choisi pour ce travail d'étudier si les guitaristes parlent spontanément du toucher⁸ en situation habituelle de jeu. Ainsi, plusieurs hypothèses sont étudiées et vérifiées :

- les guitaristes s'expriment spontanément sur le sens du toucher ;
- dans le discours des guitaristes, les descriptions de l'interaction musicien-instrument sont adaptées pour parler du toucher ;
- la situation de « jeu libre » avec « verbalisation libre » permet aux guitaristes de s'exprimer directement sur leur ressenti.

Dans cette partie, une analyse linguistique est développée dans le cadre du domaine de l'acoustique musicale et plus particulièrement dans le cas de la guitare électrique. Cette analyse est basée sur des transcriptions de verbalisations de guitaristes électriques en train de jouer (en situation de jeu) lors de tests perceptifs. De telles transcriptions, issues de deux études réalisées dans le cadre des thèses de Benoît Navarret [Nav13] et d'Arthur Paté [Pat14], sont examinées dans cette partie. À partir de ces deux études, un corpus d'énoncés a été constitué. Le travail sur ce corpus porte spécifiquement sur l'étude du sens du toucher dans le cas de verbalisations libres. Cette partie se divise en plusieurs chapitres.

L'ensemble du chapitre 2 est consacré à la mise en place d'une méthode d'analyse du discours des musiciens et l'étude du lien entre ce discours et le sens du toucher. Pour cela, l'analyse de trois indicateurs est proposée. Le premier de ces indicateurs est le « rapport au toucher », pour identifier le lien entre l'expression du ressenti et le sens du toucher dans le discours des musiciens. L'analyse permet de déterminer si la phrase employée par le musicien fait référence au sens du toucher. Le deuxième indicateur étudié est l'« objet qualifié », pour comprendre ce que le musicien décrit dans une phrase, et de quoi il parle précisément. Cet indicateur permet d'identifier si le musicien décrit plutôt la guitare, s'il se décrit lui-même en situation de jeu, ou bien si une description conjointe de la guitare et du musicien est exprimée (ce qui sera appelé « interaction musicien-instrument » par la suite). Le troisième indicateur étudié est « l'implication dans le discours » et la façon dont le musicien s'implique dans le discours. Avec cet indicateur, il est observé si le musicien parle de ce qu'il ressent à l'instant présent, s'il fait référence à une expérience passée, ou bien si son discours relève de la doxa⁹. Il s'agit de vérifier si « l'implication dans le

8. Il a été choisi de s'intéresser au toucher au sens large et non spécifiquement le retour vibrotactile, afin de montrer l'importance du toucher dans la perception des musiciens. Le sens du toucher inclut le retour vibrotactile (directement associé à la perception du retour vibratoire de l'instrument, autrement dit à la perception des vibrations), à distinguer du retour vibratoire qui concerne la physique de l'instrument.

9. Le terme de *doxa* sera précisé et détaillé dans le chapitre 2. Le dictionnaire (Paul Robert, *Le Grand Robert de la langue française, dictionnaire alphabétique et analogique de la langue française*, 2^e édition, Tome III, Dictionnaires LE ROBERT, Montréal, Paris, 1990, p. 659, 2^e colonne) en fait la définition suivante : « Ensemble

discours » dans l'ensemble du corpus relève bien de l'expression du ressenti lors du test, car c'est un des enjeux de la perception située avec jeu libre (ce sont les musiciens qui décident ce qu'ils jouent et non les expérimentateurs) et verbalisation libre, et non d'un ressenti lié à une expérience passée ou bien à la doxa.

La constitution du corpus est réalisée par le prisme de six mots supposés permettre de parler du toucher. Ces six mots ont été choisis car, selon la littérature en acoustique musicale, ils ne décrivent pas le son des instruments mais plutôt l'interaction musicien-instrument. L'hypothèse faite pour constituer le corpus dans le chapitre 2 est la suivante : « parler de l'interaction musicien-instrument est une situation qui favorise le discours sur le sens du toucher ». Ladite interaction permettrait notamment de parler du contact physique du musicien avec son instrument.

La méthode ainsi développée dans le chapitre 2 est appliquée au corpus d'énoncés dans le chapitre 3, par l'analyse des trois indicateurs présentés. Les résultats de l'analyse qui en découle sont présentés. Premièrement, l'analyse du « rapport au toucher » montre que la présence d'éléments de guitare ou de parties du corps humain dans les énoncés sont des indices majeurs dans la détection des références au sens du toucher dans le discours. Deuxièmement, l'analyse de l'« objet qualifié » montre que les mots choisis ne sont pas directement des descripteurs de l'interaction musicien-instrument, contrairement aux hypothèses de la littérature en acoustique musicale. Enfin, le travail sur « l'implication dans le discours » permet de confirmer que les conditions expérimentales (situation de jeu libre et verbalisation libre) permettent bien aux musiciens de parler de leur ressenti général pendant le test.

La robustesse (au sens statistique) des résultats obtenus par la méthode d'analyse est discutée dans le chapitre 4. Ce chapitre permet de revenir en détail sur les différences entre les deux études (de Navarret [Nav13] et de Paté [Pat14]) et certains résultats du chapitre 3 sont modérés par l'analyse comparative du chapitre 4.

Des recommandations sont proposées afin d'élaborer un protocole expérimental pour l'analyse de la perception (tactile) avec des musiciens en situation de jeu. Ces recommandations, pour parler du sens du toucher, contiennent :

- l'utilisation des mots « confort », « toucher » et « vibration » ;
- ainsi que l'orientation des questions vers des descriptions de l'instrument ou de l'interaction musicien-instrument.

Méthodologie pour l'analyse linguistique

Sommaire du présent chapitre

2.1 Objectifs	22
2.1.1 Vocabulaire du toucher	22
2.1.2 Analyse de transcriptions	22
2.1.3 Développement d'une méthode d'analyse de tests perceptifs	22
2.2 Les transcriptions étudiées	23
2.2.1 Expériences avec des guitaristes électriques	23
2.2.2 Les guitares des tests	23
2.2.3 Méthodologie des expériences	25
2.2.4 Utilisation des données pour la thèse	25
2.3 Les mots et catégories de mots	25
2.4 Indicateurs linguistiques étudiés et champ d'observation	26
2.4.1 Rapport au toucher	26
2.4.2 Objet qualifié	27
2.4.3 Implication dans le discours	29
2.5 Conclusion	30

L'objet de ce chapitre est de mettre en place une méthode d'analyse portant sur le sens du toucher. Le cadre choisi est la perception située¹, dans une démarche écologique². Les expériences avec des musiciens doivent permettre à ces derniers d'être les plus libres possible et les plus fidèles à leurs habitudes de jeu. Des transcriptions d'expériences sur la guitare électrique avec jeu libre et verbalisation libre ont été étudiées, en cherchant si les guitaristes parlaient du sens du toucher. Les spécificités des deux études utilisées pour l'analyse sont présentées en section 2.2. Sans un

1. La perception (ou cognition) située repose sur le fait que le savoir n'est pas séparable de l'action [BCD89]. La connaissance est située et est un mélange provenant de l'activité, du contexte et de la culture dans lesquels elle est utilisée. Dans le cas de l'acoustique musicale, la perception et les comportements sont observés *in situ*, et les musiciens sont interrogés sur leur ressenti en situation de jeu.

2. Les musiciens jouent dans des conditions au plus proche des conditions habituelles, ce qui correspond à l'environnement dans lequel ils ont pu développer leur expertise. Cela doit permettre de généraliser les résultats obtenus en conditions de laboratoire aux conditions habituelles de jeu, à savoir le cadre d'une séance de travail, d'une répétition ou d'un concert par exemple.

vocabulaire précis pour parler du retour vibrotactile des instruments, le choix s’est porté sur des descripteurs de l’interaction musicien-instrument. Six mots ont été choisis, et sont présentés dans la section 2.3. Ces mots ont été étudiés selon trois indicateurs, comme décrit dans l’avant-propos :

- le « rapport au toucher », définissant si un énoncé parle du sens du toucher ou pas ;
- l’« objet qualifié », définissant ce qui est décrit par le musicien et pour vérifier s’il s’agit bien de l’interaction musicien-instrument ;
- l’« implication dans le discours », précisant si les guitaristes s’expriment par exemple sur leur propre expérience ou parlent bien de la situation actuelle.

La taille du champ d’observation (appelé « contexte » par la suite, distinguant le contexte morpho-syntaxique, la phrase et l’énoncé) est discutée pour chaque indicateur.

2.1 Objectifs

2.1.1 Vocabulaire du toucher

Il existe un vocabulaire précis pour parler du sens du toucher [Ver21]. Cependant, il n’est pas fait mention d’un vocabulaire spécifique au retour vibrotactile (qui peut être considéré comme la sous-catégorie du sens du toucher relative à la perception d’objets vibrants) des instruments de musique³ alors que le vocabulaire de la perception sonore et du timbre en acoustique musicale est bien fixé. Sur la base de travaux sur la perception et le retour vibrotactile [Sai+12], l’objectif est d’identifier des mots décrivant ce retour, auquel les musiciens sont pourtant sensibles. Pour cette analyse en acoustique musicale, il est proposé de baser la recherche sur les termes de l’interaction musicien-instrument, avec le postulat qu’ils permettent de s’exprimer sur le sens du toucher. Ces termes de l’interaction musicien-instrument sont distingués dans la littérature des termes décrivant le son des instruments (voir p. 10 et tableau 1.2 p. 11 pour l’explication et la liste des mots identifiés, puis section 3.2.2 pour le détail du choix des mots). Il est supposé dans ce travail que les mots décrivant l’interaction pourraient davantage faire référence au sens du toucher qu’au son des instruments.

2.1.2 Analyse de transcriptions

Pour identifier le vocabulaire du toucher en situation de jeu, des transcriptions d’expériences menées avec des guitaristes électriques ont été analysées. La pratique instrumentale relevant de la perception multisensorielle, il est supposé dans ce travail que les guitaristes parlent du toucher, et pas seulement du son. De plus, être en situation de jeu permet aux guitaristes (et plus généralement aux musiciens) d’être physiquement actifs (et acteurs) en plus d’être eux-mêmes producteurs du son et de la vibration de l’instrument. Ainsi, les réponses aux questions des expérimentateurs sur le ressenti seront davantage le résultat discursif d’une perception située, et donc d’un vécu personnel par les musiciens.

2.1.3 Développement d’une méthode d’analyse de tests perceptifs

Pour faciliter l’identification du lexique vibrotactile, une méthode est développée pour analyser si les guitaristes font référence au sens du toucher dans des situations avec verbalisation et jeu libres. Le protocole de perception située et verbalisation libre rend l’expérience plus riche et plus complexe. L’expérience est plus riche car les musiciens participant aux expériences peuvent

3. Dans son livre, Verine donne effectivement un lexique spécifique au vibrotactile, mais pas spécifiquement au retour vibrotactile des instruments de musique.

être exhaustifs sur leur ressenti. L'expérience est plus complexe car les musiciens ne sont pas restreints à un nombre de questions précises ou de tâches pré-définies. Il est également possible que le discours des musiciens se détourne des objectifs des expérimentateurs, et qu'aucun lien ne puisse être établi entre les hypothèses de départ (de Navarret et Paté, voir section 2.2) et le discours des musiciens. L'analyse proposée permet d'enrichir les connaissances sur le lexique du sens du toucher.

2.2 Les transcriptions étudiées

2.2.1 Expériences avec des guitaristes électriques

Les données considérées proviennent de transcriptions écrites de deux précédentes études :

- **Nav13**, étude issue des travaux de Navarret [Nav13], où les trois guitares présentées se différencient par le mode de fixation du manche sur le corps, avec un manche collé, un manche vissé ou un manche traversant (voir section 2.2.2).
- **Pat14**, étude issue des travaux de Paté [Pat14], où les quatre guitares présentées se différencient par le matériau de la touche, soit en ébène, soit en palissandre (voir section 2.2.2).

Les deux études ont été menées avec des guitaristes professionnels⁴ parlant couramment le français. Les informations principales des études sont résumées dans le tableau 2.1.

	Nav13	Pat14
Nombre de participants	13	10
Durée moyenne par entretien	1h30	1h30
Niveau des participants	Professionnel	Professionnel
Possibilité de jeu	Jeu libre	Jeu libre
Verbalisation	Libre	Libre
Modèle de guitare (copies)	<i>Gibson Les Paul Junior</i>	<i>Gibson Les Paul Junior</i>
Amplificateur	<i>Fender Blues Junior</i>	<i>Fender Blues Junior</i>
Nombre de guitares	3	4
Différences de lutherie entre les guitares	Jonction corps/manche	Matériau de touche

TABLEAU 2.1 – Présentation générale des deux études : l'étude **Nav13** et l'étude **Pat14**.

2.2.2 Les guitares des tests

Dans les deux études, les guitares sont des copies du modèle *Gibson Les Paul Junior* (figure 2.1), connectées à un amplificateur *Fender Blues Junior*, avec la seule possibilité de changer le volume global. Chaque guitare pouvait être connectée à une pédale d'effet.

Pour chaque étude, les musiciens ont joué sur différentes guitares avec de légères modifications de fabrication par rapport au modèle *Gibson Les Paul Junior*. Les modifications entre les guitares présentées ne sont pas visibles par les guitaristes. Cette affirmation garantit qu'aucune différence visible ne provoquera des réactions basées sur de la doxa, à savoir l'internalisation de

4. Ils sont considérés comme « professionnels » car ils vivent de leurs activités liées à la guitare : concerts, enseignement, etc.



FIGURE 2.1 – Guitare de type *Les Paul Junior*, utilisée pour l'étude **Nav13** [Nav13]

savoirs partagés, démontrés ou non, issus de l'expérience personnelle ou non, et propres à la communauté des guitaristes électriques. Dans l'étude **Nav13**, les guitares se différencient par leur jonction corps/manche. Les différentes possibilités de jonction sont présentées figure 2.2 : manche collé, manche vissé et manche traversant. Trois guitares ont été présentées aux guitaristes (un exemplaire par jonction).

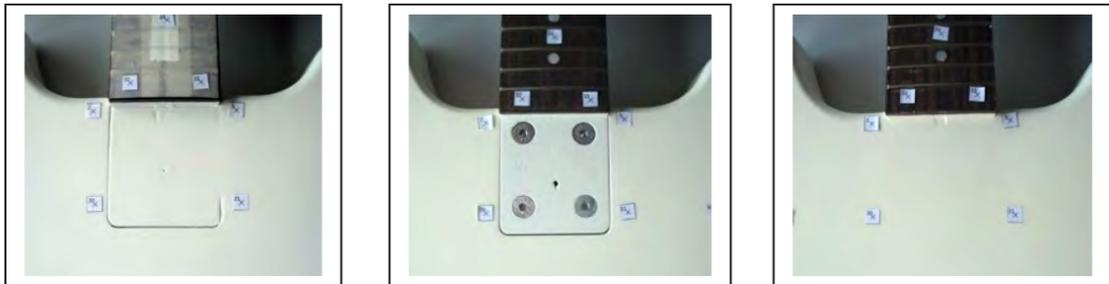


FIGURE 2.2 – Vues de dessus (guitare photographiée de face) des trois jonctions manche/corps caractéristiques de chacun des trois types de guitares fabriqués. Ces photos sont directement issues de la thèse de Benoît Navarret [Nav13]. De gauche à droite : manche collé (cas classique pour la *Gibson Les Paul Junior*), manche vissé et manche traversant.

Dans l'étude **Pat14**, les essences de bois de la touche sont différentes entre les guitares présentées. Les possibilités de matériau sont présentées figure 2.3 : touche en ébène ou touche en palissandre (cas classique pour la *Gibson Les Paul Junior*). Quatre guitares ont été présentées aux guitaristes (deux exemplaires par essence de bois de la touche).



(a) Touche en bois d'ébène

(b) Touche en bois de palissandre

FIGURE 2.3 – Manches avec différents matériaux de touche, (a) représente une touche en bois d'ébène (noire) et (b) une touche en bois de palissandre (marron). Les deux images proviennent du lien suivant : <https://www.bax-shop.fr/blog/guitare/quelle-est-limportance-du-bois-dune-touche-de-guitare/> (consultation le 16 octobre 2022)

2.2.3 Méthodologie des expériences

Les guitaristes de chaque étude ont joué assis, et étaient libres de prendre chacune des guitares présentées, libres de jouer ce qu'ils voulaient et de passer autant de temps que souhaité sur chaque guitare. Aucun médiateur n'a été fourni pour ces études, les guitaristes ayant le leur (sauf pour un d'entre eux jouant avec les doigts). Les études se sont inscrites dans une démarche de perception située [Cla97 ; FMD10 ; Gua03], les musiciens verbalisant leur ressenti en jouant de la guitare.

Il a été demandé aux guitaristes de juger les différentes guitares avec une consigne similaire :

Nav13 : *Nous allons te demander de tester ces guitares comme si tu étais dans un magasin en vue d'un achat ou d'un concert par exemple.*⁵

Pat14 : *Nous allons te demander de tester librement ces guitares comme si tu étais en magasin en vue d'un achat ou d'un concert. Nous te demandons d'exprimer librement ton ressenti sur les guitares. Le test précédent⁶ a fait émerger certains critères comme importants pour les guitaristes, il s'agit de la brillance, du sustain, du confort de jeu, de l'attaque et de l'équilibre. Si ces critères se rapportent à quelque chose qui te parle, tu pourras les utiliser.*

Le contexte de jeu libre en situation habituelle de jeu est favorable à la validité écologique des tests [BH04 ; Gua09 ; Gua+04 ; Neu04]. Cette situation correspond à ce que les guitaristes font quand ils vont dans un magasin de guitare. S'ils ont un modèle de référence en tête, ils peuvent choisir plusieurs guitares et les tester en jouant librement. C'est ce qui a été demandé aux guitaristes pour chaque étude.

2.2.4 Utilisation des données pour la thèse

Les similitudes entre les études (tableau 2.1) et leur démarche expérimentale permettent de regrouper les transcriptions et de considérer une seule étude basée sur les transcriptions de 23 participants. Ce regroupement permet d'avoir davantage de données, les études proposant des verbalisations libres in situ avec guitaristes électriques, par les mêmes expérimentateurs (Navarret et Paté étaient présents avec chaque participant de chaque étude) et certains mêmes participants. Une forte répétabilité de la part des expérimentateurs et de la part des participants est supposée. Ce choix est discuté dans le chapitre 4.

Des énoncés ont été extraits des transcriptions selon les mots présentés dans la section 2.3. Ensuite, ces énoncés ont été analysés selon les indicateurs décrits dans la section 2.4.

2.3 Les mots et catégories de mots

Pour l'analyse, six catégories de mots ont été choisies : CONFORT⁷, DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI, TOUCHER et VIBRATION. Le choix des mots est expliqué dans la section 3.2.2, et une définition de chaque mot est proposée (comme aide à la lecture et à la compréhension). L'hypothèse est que ces catégories doivent être en rapport avec le sens du toucher. Pour chaque catégorie, une recherche semi-automatique sur les radicaux (voir tableau 3.2, *confort*, *dynamique*, *répon*, *ressen*, *touch*, *vibr*) a été effectuée. De toutes les occurrences présentes dans les transcriptions, celles prononcées par les expérimentateurs dans leurs questions ont été retirées. Toutes

5. L'utilisation de l'italique dans cette partie est réservé soit aux citations des expériences en français comme le cas présent, soit à des termes issus de langues étrangères et utilisés dans le corps du texte.

6. Le test en question est celui de l'étude **Nav13**.

7. Les mots choisis ont été transformés en catégories de mots, regroupant le mot et ses déclinaisons (voir section 3.2.2). Les catégories apparaîtront en capitales dans l'ensemble du manuscrit. Les mots employés par les musiciens seront ainsi différenciés des catégories et apparaîtront en italique.

les mentions de la « touche » de la guitare (partie de la guitare, comme illustré en figure 1.2, p. 13) ont également été retirées de la catégorie TOUCHER. Ce choix est délibéré, car les éléments de guitare sont utilisés pour l'analyse des énoncés comportant les mots choisis, et non comme des mots à étudier en soi. Les énoncés avec les occurrences des mots sont extraits des transcriptions pour créer le corpus de travail. Il y a alors 370 occurrences des mots choisis dans le corpus constitué, et donc 370 énoncés. Chaque énoncé est constitué d'une ou plusieurs phrases pour garder un contexte minimal de compréhension de l'emploi du mot étudié.

2.4 Indicateurs linguistiques étudiés et champ d'observation

Les 370 énoncés du corpus ont été analysés selon les trois indicateurs suivants :

- « rapport au toucher ». L'objectif est de vérifier si les énoncés ont pour objet le sens du toucher et la perception (vibro-)tactile. Cette partie de l'analyse doit confirmer que les mots sélectionnés sont utilisés en lien avec le sens du toucher.
- « objet qualifié ». Des mots issus du vocabulaire décrivant l'interaction musicien-instrument (dans la littérature en acoustique musicale) ont été choisis. L'analyse est effectuée car il n'a pas été véritablement montré que ces mots décrivent effectivement l'interaction musicien-instrument.
- « implication dans le discours ». L'objectif est de vérifier si la démarche expérimentale permet aux musiciens d'effectivement s'exprimer sur leur ressenti immédiat ou leur expérience passée, sans utiliser de doxa.

Les différentes possibilités par indicateur sont présentées en français ici, et sont reprises en anglais dans le chapitre 3⁸.

2.4.1 Rapport au toucher

Le rapport au toucher d'un énoncé peut être :

Oui, quand l'énoncé est directement en lien avec le sens du toucher ;

Non, quand il n'est pas question du sens du toucher dans l'énoncé ;

Non défini, quand il n'y a pas assez d'éléments dans l'énoncé pour conclure s'il est question du sens du toucher.

L'hypothèse de départ était de considérer les catégories de mots choisies comme étant liées au sens du toucher (p. 10). Voici un exemple extrait du corpus pour chaque possibilité de « rapport au toucher » :

(TOUCHER, NavP11⁹, Oui¹⁰) *Mes manches préférés sont blancs. **Préféré à quel niveau ?**¹¹ Je ne sais pas en terme de toucher¹², j'aime bien avoir le manche blanc, c'est peut-être une histoire de clarté de jeu ? je ne sais pas. Je préfère les manches en érable.*

8. le chapitre 3 ayant fait l'objet d'une publication au journal Acta Acustica, il a été conservé en anglais dans ce manuscrit.

9. NavP11 fait référence à un des participants. Il a été choisi de faire référence au nom donné pour chaque étude : Nav pour **Nav13** et Pat pour **Pat14**. De P1 à P13, il est fait référence au numéro de participant.

10. Les différentes possibilités pour un indicateur sont mises en valeur par la présente police dans les citations

11. L'utilisation du gras dans les citations est réservé aux questions des chercheurs pendant les expériences.

12. Dans les citations issues des expériences avec les musiciens et pour cette analyse, le mot étudié est souligné.

(CONFORT, NavP6, Non) *En plus vous me coupez la tonalité, quand je descends le potard à 9, je n'ai plus de son. Je n'ai pas mon vibrato flottant, donc, là, ce n'est pas une situation de confort pour moi, c'est clair...*

(RESSENTI, NavP10, Non défini) *C'est une guitare qui a une personnalité, qui a quelque chose. Alors que l'autre, je ne la ressens pas. On peut résumer ça comme ça : celle-là, je ne la sens pas. Les deux autres, je les sens, avec une préférence pour l'orange en fonction de mes goûts personnels. Alors que celle-là, elle est plate, elle n'a pas de personnalité.*

L'ensemble de l'énoncé (une ou plusieurs phrases permettant de garder un contexte minimal de compréhension de l'emploi du mot étudié) a été conservé pour l'analyse de cet indicateur, afin d'avoir le maximum d'éléments à disposition pour conclure.

2.4.2 Objet qualifié

La recherche de l'« objet qualifié » dans les énoncés permet d'identifier ce qui est décrit dans l'énoncé. *A priori*, pendant un test perceptif sur des guitares électriques, il est possible de parler de la guitare, du guitariste ou des deux (cette dernière possibilité étant nommée « interaction » par la suite¹³). Les tests perceptifs portent sur différentes guitares électriques. Cependant, dans l'analyse, il est seulement question de ce qui est directement décrit dans le discours du guitariste. L'objectif est de vérifier précisément ce sur quoi les guitaristes s'expriment dans leur discours. Deux niveaux d'analyse ont été établis, avec les raisons détaillées dans cette section : un niveau restreint autour du contexte morpho-syntaxique (syntaxe) et un niveau global sur l'ensemble de l'énoncé (sémantique), ci-dessous nommés « contexte morpho-syntaxique » et « énoncé »¹⁴ respectivement. Dans le cas de l'« objet qualifié », 5 possibilités sont déclinées :

G. général, quand l'énoncé désigne la guitare sans précision particulière.

G. objet, quand l'énoncé désigne la guitare en tant qu'objet.

G. son, quand l'énoncé désigne le son de la guitare.

Interaction, quand l'énoncé décrit à la fois la guitare et le musicien, voire spécifiquement l'interaction du musicien avec son instrument. Pour faciliter l'analyse de l'« objet qualifié », cette classe Interaction a été choisie quand les énoncés parlent à la fois de la guitare et du musicien.

Musicien, quand l'énoncé désigne le musicien.

Voici un exemple extrait du corpus pour chaque possibilité :

(RÉPONSE, PatP3, G. général) *Et j'reviens sur c'que j'ai dit, celle qui m'paraît la plus homogène au niveau du jeu si j'ai à choisir entre ces quatre guitares dans le magasin, si j'me dis bon il m'en faut une qui corresponde à ce que... dans un absolu c'qui m'convient l'mieux, qui soit bien équilibré dans tout le registre de l'instrument, qui réponde bien, qui ait un bon sustain avec la distorsion, que le son soit à la fois*

13. La description de la guitare et du musicien, conjointement, dans un énoncé, est plus large que l'interaction. C'est cependant plus facile à identifier et ça limite le nombre de possibilités différentes pour « objet qualifié ». De plus, il est supposé que ce niveau de précision sera suffisant pour les conclusions de l'étude linguistique. Pour des raisons pratiques, le terme « interaction » est employé comme la mention conjointe du musicien et de l'instrument et englobe les énoncés où c'est précisément l'interaction qui est décrite.

14. Pour illustrer les différents niveaux d'analyse, voici un énoncé, où le contexte morpho-syntaxique est mis en gras : *Je pense que le côté moelleux, cela va être quelque chose qui ne va pas m'agresser... un sentiment de confort un petit peu, de douceur* (NavP2).

clair, précis, et déjà quand il est neutre, qu'il soit harmonieux, quand j'dis harmonieux, c'est-à-dire qu'il soit pas trop agressif, quoi...

(VIBRATION, NavP4, G. objet) *La conduction c'est, le son est transmis à la caisse par le chevalet et le sillet de tête et quand la guitare marche bien elle fait vibrer tout le bois et la guitare a du son. C'est pour cela qu'elle a du sustain. Quand le bois se met à vibrer, moi je le sens physiquement.*

(DYNAMIQUE, PatP4, G. son) *Alors, si ça sonne acoustique, ça va sonner amplifié. Et on parlait en terme de dynamique, euh, là on l'entend bien la dynamique de la gratte, hein.*

(CONFORT, NavP12, Interaction) *Moi, je règle les guitares plus basses, et en terme de manche, là c'est réglé... ce n'est pas confortable pour moi. Moi, je suis plutôt Strat donc je ne règle pas mes guitares comme ça.*

(RESSENTI, NavP7, Musicien) *Je ne sais pas si c'est clair, si c'est vraiment ça, mais j'ai ressenti un peu que je n'avais pas matière avec ce morceau pour si j'allais dans un magasin, pour vraiment choisir la guitare. C'est un peu dommage.*

Il est supposé que la description de l'interaction musicien-instrument est importante pour la description du toucher, car l'interaction permet notamment de faire référence au contact du musicien avec l'instrument, de son ressenti physique de l'instrument. Les catégories choisies étaient considérées dans la littérature en acoustique musicale comme des descripteurs de l'interaction du musicien avec son instrument (voir section 1.1.4.2 au niveau du paragraphe dédié à l'interaction p. 1.1.4.2, puis section 3.2.2).

Pour l'indicateur « objet qualifié », l'énoncé est restreint au seul contexte morpho-syntaxique. Une information précise est disponible, dès ce niveau de contexte restreint, ce qui permet d'identifier les caractéristiques propres à chaque mot, et laisse moins de liberté à l'interprétation du chercheur. Le tableau 2.2 présente la proportion d'énoncés décrivant l'interaction dans les études, en fonction de la largeur du contexte (contexte morpho-syntaxique ou énoncé).

(%)	Nav13	Pat14	Total
Contexte morpho-syntaxique	14,0	17,0	15,1
Énoncé	55,5	62,4	58,1

TABLEAU 2.2 – Proportion des énoncés décrivant l'interaction à deux niveaux de contexte (contexte morpho-syntaxique et énoncé), par étude et sur l'ensemble du corpus. En élargissant le contexte, il y a une forte augmentation de l'interaction pour chaque étude.

Voici quelques exemples où l'augmentation du niveau de contexte (de contexte morpho-syntaxique à énoncé) fait passer « objet qualifié » d'une possibilité spécifique (G. objet, G. son, G. général ou Musicien) au niveau contexte morpho-syntaxique à l'interaction au niveau de l'énoncé :

(TOUCHER, NavP12, contexte MS¹⁵ : G. objet, énoncé : Interaction) *Je ne suis pas fan de ce toucher-là. Parce qu'après ce que tu as sous les doigts, cela va te permettre de t'exprimer plus ou moins facilement ; parce que tu es plus à l'aise avec ça,*

15. À lire : contexte morpho-syntaxique.

simplement sur le plan toucher ou digital. Après je ne rentre pas dans le détail mais je te dis ma préférence va vers la orange.

(DYNAMIQUE, PatP8, contexte MS : G. général, énoncé : Interaction) *Donc si j'y vais en douceur, ça attaque pas, ça nous embête pas en fait. Et elle a quand même de l'impact et de la dynamique. Si j'prends celle-là, elle est entre guillemets peut-être mieux équilibrée.*

(VIBRATION, NavP8, contexte MS : Musicien, énoncé : Interaction) *Et cela permettait de bien véhiculer les personnalités parce que déjà cela répondait au niveau du sustain, le mec [Leslie West] il faisait un vibré, on entendait vraiment le vibré à lui, parce que la guitare elle restituait bien, elle laissait passer le truc.*

Choisir le contexte morpho-syntaxique comme contexte pour l'« objet qualifié » permet une analyse plus rapide et plus spécifique pour chaque mot étudié. Ce niveau de contexte est donc recommandé. De plus, en élargissant le niveau de contexte, les possibilités de parler de l'interaction sont naturellement augmentées.

2.4.3 Implication dans le discours

Enfin, pour l'« implication dans le discours », trois possibilités ont été distinguées :

- **ESI**, quand l'énoncé décrit l'« Expérience Sensible Immédiate », le guitariste s'exprimant directement sur l'expérience qu'il vit lors de l'entretien présent.
- **GDP**, quand l'énoncé décrit la « Généralisation De Pratiques », le guitariste faisant appel à son expérience passée de guitariste.
- **DOXA**, quand l'énoncé contient de la « doxa », et que le guitariste ne décrit pas une expérience personnelle avérée.

Voici un exemple extrait du corpus pour chaque possibilité :

(CONFORT, PatP5, **ESI**) *C'est les mêmes cordes partout ? Les manches ne sont pas les mêmes non plus. Les conforts de jeu ne sont pas les mêmes, en tout cas.*

(VIBRATION, NavP10, **GDP**) *Je les teste d'abord à vide, sans amplificateur, parce que là on entend très bien tout de suite, et on sent aussi en particulier dans les graves si la guitare elle vibre, si les vibrations sont là, et on entend bien comment elles s'amortissent dans la résonance.*

(RÉPONSE, PatP6, **DOXA**) *Et ça c'est extraordinaire quand on en arrive là, hein. De pouvoir, euh, avoir la réponse qu'on a dans la tête et d'la faire partager aux gens immédiatement, c'est... une chance. Et ça on a besoin d'avoir un instrument qui répond, si il y a des défaillances dans l'instrument, bin on est frustré. C'est pour ça qu'c'est très important, dans la qualité d'un instrument euh... alors bon, effectivement, tout le monde dit la même phrase, euh le son c'est les doigts, c'est vrai, c'est vrai, mais un bon instrument 'fin qui a une âme, ça, ça contribue énormément aussi à la qualité du jeu, hein... faut pas l'nier.*

Il est vérifié si les énoncés de chaque étude permettent aux guitaristes de s'exprimer sur leur ressenti, donc si les énoncés présentent un maximum d'ESI et GDP, en privilégiant l'ESI, et un

minimum de DOXA. Il est supposé que l'expression du sens du toucher est favorisée par l'ESI, et empêchée par la DOXA. En effet, le sens du toucher est un sens proximal et particulièrement intime. Les combinaisons de plusieurs de ces trois catégories dans une même phrase sont possibles (l'« implication dans le discours » est alors qualifié de complexes, par exemple : de l'ESI et de la GDP). Pour cet indicateur, l'énoncé est restreint au contexte de la phrase contenant le mot de la catégorie étudiée. Pour l'« implication dans le discours », réduire le contexte à une phrase limite les combinaisons de plusieurs possibilités, comme présenté dans le tableau 2.3. Le contexte ne peut être restreint davantage, le contexte morpho-syntaxique ne contenant pas assez d'informations pour déterminer l'« implication dans le discours ».

Contexte	Nav13	Pat14	Total
Phrase	1,7%	0,7%	1,4%
Énoncé	23,1%	16,3%	20,1%

TABLEAU 2.3 – Proportion des types d'expérimentation complexes (ESI-GDP,GDP-DOXA,ESI-DOXA,ESI-DOXA-GDP) à deux niveaux de contexte (phrase et énoncé), par étude et sur l'ensemble du corpus.

Voici quelques exemples justifiant qu'élargir le contexte accroît fortement les possibilités d'« implication dans le discours » complexes, qui sont difficiles à interpréter :

(VIBRATION, PatP2, phrase : **ESI**, énoncé : **ESI-GDP**) *Et on sent un peu, moi j'aime bien, la résonance de la, c'est un truc qu'on a systématiquement sur les très vieilles guitares ou les très vieilles basses, on sent vraiment le bois qui vibre, et en général les guitares modernes, surtout un peu bas de gamme ont tendance à... on sent rien du tout, et quand on sent un instrument déjà comme ça [accord son acoustique], c'est plutôt bon signe, en général.*

(VIBRATION, NavP10, phrase : **DOXA**, énoncé : **GDP-DOXA**) *il y a des cordes qui perdent leur qualité de vibration en particulier au niveau des harmoniques, surtout sur les trois cordes filées, Ernie Ball, Dean Markley. Moi, j'utilise des d'Addario depuis plus de vingt ans, et je ne suis pas le seul, beaucoup utilisent ça.*

(RÉPONSE, NavP13, phrase : **ESI**, énoncé : **ESI-DOXA-GDP**) ***Claquant, ça se ? Ben euh, c'est la dynamique des attaques... si on attaque trop ça frise mais on arrive à trouver le bon dosage, cela claque... ce qui n'est pas typiquement une caractéristique des Gibson, à part peut-être les Gibson SG. Je vais comparer par exemple avec la première qui a un peu le même genre de réponse dans les aigus.***

Par conséquent, il est recommandé d'analyser l'« implication dans le discours » au niveau de la phrase, et non pas de l'énoncé complet. Le but est de limiter la quantité d'énoncés présentant conjointement au moins deux des trois possibilités de « implication dans le discours », et qui conduisent à des problèmes évidents d'interprétation.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les données de travail ont été présentées et la méthode d'analyse développée a été explicitée. De plus, des justifications sur les choix de délimitation pour chaque indicateur ont été données. Une description complémentaire de la méthode et les résultats de l'étude linguistique obtenus avec cette méthode sont présentés dans le chapitre 3. Le chapitre 4 détaille et discute ces résultats en comparant les contributions des deux études **Nav13** et **Pat14**. Ainsi, des recommandations supplémentaires sont formulées pour de prochains tests et futures analyses.

Chapitre 3

Vocabulary to speak about touch : analysis of the discourse of electric guitar players¹

Sommaire du présent chapitre

3.1 Introduction	32
3.2 Method	34
3.2.1 Perceptual tests data	34
3.2.2 Choice of words and categories	34
3.2.3 Construction of corpus	36
3.2.4 Observed parameters	38
3.3 Analysis	39
3.3.1 Levels of context	39
3.3.2 Guitar and human body parts	41
3.3.3 Linguistic features	44
3.3.4 Synthesis	46
3.4 Results	47
3.4.1 Relationship between word categories and the sense of touch	47
3.4.2 Guitar parts and relationship with touch	48
3.4.3 Relationship between word categories and their qualified object	49
3.4.4 Relationship between word categories and the implication in discourse	49
3.5 Discussion	51
3.6 Conclusion	53

L'analyse des catégories de mots sur le radical de « confort », « dynamique », « réponse », « ressenti », « toucher », et « vibration » a montré que certaines de ces catégories sont davantage

1. Ce chapitre est écrit en anglais, car il est directement adapté d'un article publié : Cambourian Paul, Paté Arthur, Cance Caroline, Navarret Benoît and Vasseur Jérôme, *Vocabulary to speak about touch : analysis of the discourse of electric guitar players*. Acta Acustica, Volume 6(2), 2022.

liées au sens du toucher, et que des arguments linguistiques permettent de les distinguer. Cela a fait l'objet d'un article publié en janvier 2022 dans la revue *Acta Acustica* [Cam+22]. Cet article contient les principaux résultats de l'analyse linguistique. Les mots issus de la catégorie CONFORT sont très directement liés au sens du toucher, davantage que VIBRATION ou TOUCHER. Il a été montré que les catégories RÉPONSE et RESENTI étaient très peu liées au sens du toucher.

Abstract This work presents a multidisciplinary approach to vibrotactile perception, applying linguistic methods to musical acoustics. We are interested more particularly in the sense of touch as a part of the multisensory experience of playing a musical instrument. Six words and their inflections are chosen from the literature in musical acoustics dealing with vibrotactile perception : “comfort”, “dynamics”, “response”, “feeling”, “touch” and “vibration”. Their use by musicians in playing situation is analyzed. The data used in this article comes from transcripts of two previous studies, conducted in French with professional guitarists natively speaking French. The linguistic analysis of the corpus is based on different features which help to categorize the utterances according to each observed parameter, namely the relationship with the sense of touch, the object that is qualified by the words under study and the implication in discourse of the interviewee. The results permit to understand the use of the six categories of words in relationship with the sense of touch, and provide perspectives to use some of these words to focus the discourse on the sense of touch in future studies.

3.1 Introduction

This work presents a multidisciplinary approach, applying linguistic methods to musical acoustics. It seems that, during perceptual tests, musicians talk more spontaneously about the sound of the instruments than about their vibrotactile perception. If the lexical field of sound is favored, this may be due to the situation of listening tests rather than playing experiences :

“By playing, violinists can experience a wider range of performance effects than the very short phrases or single notes often used in listening tests, and in this way assess any particular attribute of the instrument based on multi-modal sensory data (i.e., based on auditory and vibrotactile feedback).” [Sai+12]

The lexicon observed in the discourse of musicians, even in playing tasks [Nav13 ; Pat14 ; Pat+15 ; Sai+12 ; Wol+14], focuses to a great extent on the perception of sound and sound terms.

However, music experience is a cross-modal experience. It involves in particular the sense of touch and the interaction between the musician and the instrument, which is at the core of the action of playing an instrument [SJF18]. The sense of touch is so important for a musician that new interfaces for music, although they are often virtual or dematerialized, need to include vibrotactile feedback for more realistic sensations [MW06].

There are studies on music instruments which deal with the vibratory response of the instrument [BO07 ; LPC19 ; Fle05 ; FZ98 ; Fon+17 ; GBF14], in which only the mechanical information is measured and studied, but no perceptual measurement is carried out. Other studies couple the vibratory results with an analysis of vibrotactile feedback in perceptual tests [Fon+18 ; GW13 ; Wol13 ; WFP14 ; Wol+14]. Even if some of them are based on words assumed to speak about the relation of the musician with the instrument and vibrotactile feedback and potentially the sense of touch, they are no demonstration of the relationship with the sense of touch. In order to be able to study the vibrotactile perception of musicians, it is necessary to use a specific vocabulary to speak about the sense of touch, identified in the musician discourse.

From the choice of an instrument to its purchase, to live performances, through their everyday musical training and practice, musicians are constantly evaluating their instruments. Scientists

have aimed for decades at understanding how this expert evaluation is performed. The field of perception of musical instruments is dominated by psychophysical studies, for example to evaluate piano touch quality [GBF14], or physical differences between two trumpets [MPS12]. In the psychophysical paradigm, the description of the world as given by physics (in this case, acoustics) is assumed as the starting point, in order to test the human perception of, or sensitivity to, physical parameters. The implicit underlying assumption is that the physical parameters correspond to a psychological reality, i.e. that they are meaningful to the participants; an assumption which may or may not be true (see e.g. [Gib60, p. 701]).

While targeting the same objectives, our approach goes in the opposite direction. We try to identify what is relevant for the participants in their everyday, expert practice, in order to eventually perform physical and acoustical studies. For this reason, we consider as important to ask first for the point of view of the musicians. Fritz and Dubois reviewed the methodology of perceptual evaluation of musical instruments in [FD15], and highlighted the value of playing tests combined with production of verbal data. In the same way, Fritz et al. [FMD10], and Wollman et al. [Wol+14] conducted interviews with violinists in a playing situation. Playing situation corresponds to a more ecological² situation. Furthermore musicians can feel vibratory signals during tests, that stimulate vibrotactile perception.

The present paper deals with an analysis of verbalizations produced in an ecological situation of guitar playing [Nav13; Pat14]. While musicians speak easily about sound and there are many studies on timbre descriptors [Bar+10; BT11; Fri+12; Fri+08; Lav13; Sol58; Zac+11], the vocabulary of touch does not seem to be stabilized. Studies do not demonstrate the semantic relationship to the sense of touch, and it is the main goal of this work : identify words used by musicians to speak about touch. The analysis of those words is completed with a description of the object they describe (quantification, study in context), and how they are employed, to be the most exhaustive as possible on their use in the discourse of musicians. To identify these features, we use linguistic methods and descriptors.

In this paper, six words and their inflections are chosen from the literature in musical acoustics dealing with vibrotactile perception. These six words are often assumed to be related to the sense of touch, or to describe the relation to the musical instrument. In order to check these assumptions, this paper proposes to analyze the use of these words and their inflections (which form 6 categories of words, presented in table 3.2) by electric guitar players³ in a playing situation, and to check whether those categories of words relate to the sense of touch.

We define the following working hypotheses :

- H1 : the chosen categories of words may be linked to touch with some variability (speak about touch or not, with different degrees). The chosen words, even if they are linked to touch, could be used to describe different objects with different points of view (for example, the word “feeling” may be oriented towards the sensation of the musician, and the words “response” and “dynamics” may be oriented towards the description of the guitar).
- H2 : because of the mechanical behavior of the guitar and the human sensitivity, guitar players may speak differently about touch when touching and/or describing different parts

2. Ecological validity aims “to ensure that the participants react in the lab, to some extent, as if they were in a *natural* everyday life situation” [Gua21]. Producing an ecologically valid experiment permits an easier generalization to the real-life situation [Gua09; Dub+21; Can+21].

3. The choice of the electric guitar is motivated both by the access to a corpus with transcripts of perceptual test in playing situation with verbalization; and by the fact that due to the presence of an amplifier, the sound is mainly heard through the amplifier and mechanical vibrations are transmitted by the instrument, in contact with the musician. With this separation (which does not appear with acoustic instruments), we assumed to foster the production of specific evaluations focused on the sense of touch. Moreover, the choice of studying the *solid body* electric guitar is motivated by its very low acoustic radiation, that emphasizes the fact that most part of the sound energy comes from the amplifier (note that this might differ if using a hollow-body electric guitar).

of the guitar compared to when describing human body parts.

- H3 : the data used in this article were produced during free playing and verbalization tests. We therefore assume that the guitar players speak about their personal experience during the test. It could be expected that the more the implication in discourse is personal and spontaneous (link to the present situation), the more the musician speaks about touch. It could be explained with the fact that vibrotactile perception is stimulated when playing, and guitarists explore the sense of touch by comparing it to their prior personal experience.

We check all these hypotheses in the present work. First, section 3.2 presents the material and methods used in this study : verbal data available, selection of words related to touch, and constitution of the corpus. Then, section 3.3 shows the use of linguistic features for the analysis. Section 3.4 presents the results of this analysis, first assessing whether the categories of words selected in section 3.2 refer to the sense of touch or not. Second, results about the relationship with the sense of touch for groups of guitar parts are presented. Third, the qualified object by each category is investigated, and finally the implication in discourse of the guitar players when speaking about touch is presented. Results are then discussed in section 3.5 and conclusions are drawn in section 3.6.

3.2 Method

3.2.1 Perceptual tests data

The data used in this article come from transcripts of two previous studies [Nav13; Pat14], made in French with professional guitarists natively speaking French⁴. 13 guitar players participated in the perceptual tests in the work of Navarret [Nav13] and 10 participated in the work of Paté [Pat14], for an average duration of one hour and a half per participant.

Both studies consisted in a free playing and free oral verbalization task (with similar instructions) that were audio recorded and transcribed. The analysis presented here is made on these written transcripts. For each study, the players were presented with several guitars with slight modifications in their making : the guitars differed in the neck-to-body junction in the work of Navarret in 2011 [Nav13; Pat+12], and the fingerboard wood was different between the presented guitars in the work of Paté in 2013 [Pat14]. The modifications were made unnoticeable to the eye and the guitarists were not told about any existing difference between the instruments. For both studies, the guitars (copies with slight modifications described above of the model *Gibson Les Paul Junior*) were connected to an amplifier (*Fender Blues Junior*), with the possibility to change the master volume. The guitars could be connected to a pedal effect (*Ibanez Tube Screamer* in [Nav13], and *Fulltone OCD III* in [Pat14]). The guitarists played seated, and were free to take and play any of the guitars they were presented, and to spend as much time as they wanted on each guitar. No pick was supplied by the researchers, therefore the guitarists played with their own pick (or with the fingers for one of them). For the work described in this article, we selected the vocabulary to analyze based on the literature in musical acoustics. The selected words are detailed in section 3.2.2.

3.2.2 Choice of words and categories

As the perceptual tests with electric guitarists in [Nav13] and [Pat14] involved French native speakers and were conducted in French, we consider French words and categories of words in this

4. We consider them as professionals because they make their living from guitar-related activities : concerts, lessons, reviews, etc.

study :

- CONFORT⁵/COMFORT, well-being provided by the instrument when playing⁶ ;
- DYNAMIQUE/DYNAMICS, defines the possible playing amplitude from the weakest to the strongest sound producible with an instrument ;
- RÉPONSE/RESPONSE, the reaction of the instrument to the gesture of the musician ;
- RESSENTI/FEELING, sensation and feeling expressed by the musician ;
- TOUCHER/TOUCH, as a verb, to touch something is the action which creates contact between a person and an object ; and as a noun, describes the sense of touch and the contact felt by the musician when playing an instrument ;
- VIBRATION/VIBRATION, the mechanical displacement/oscillation of an object ;

are chosen as the categories for this study. To support the choice of these 6 categories, the following paragraphs present some references in the literature using the words we chose (summary presented in table 3.1), and the detail of words for each category (all lexical forms and inflections of the words in each category are presented in table 3.2).

Label of the category	Instrument	Ref.
CONFORT/COMFORT	Guitar	[Nav13 ; Pat14]
	Violin	[Sai+12]
DYNAMIQUE/DYNAMICS	Guitar	[Nav13 ; Pat+15]
	Violin	[Wol+14]
RÉPONSE/RESPONSE	Guitar	[Pat+15]
	Violin	[Sai+12 ; Wol+14]
RESSENTI/FEELING	Guitar	[Nav13 ; Pat14]
	Violin	[Sai+12]
TOUCHER/TOUCH	Guitar	[Nav13]
VIBRATION/VIBRATION	Violin	[Wol+14]

TABLEAU 3.1 – Articles using the words chosen for this work.

COMFORT⁷

The work of Paté et al. [Pat14] provided a synthesis of the words and category of words chosen by guitarists in [Nav13], in order to describe and evaluate electric guitars. As the choice was completely free for the participants, it is a reflection of the words chosen by the guitarists themselves. The word *confort* (in French) appears in this list. Moreover, Saitis et al. [Sai+12] list violin attributes used by musicians, and the word *comfort* (in English) appears among the attributes describing the interaction between the player and the instrument.

5. In this article, the labels of the chosen categories appear in small capitals. “Category” refers to a category of words detailed in table 3.2. “Words”, in italic in French and their translation between quote marks in English, correspond to the lexical forms found in the verbal productions.

6. For each category, the proposed definitions just aim to help the reader to understand the global meaning of words, but are not to be considered as consensual definitions.

7. From here on, the labels of the categories of words will be used in English to facilitate the reading. We insist on the fact that all the English translations in this article are suggestions to permit the understanding of this article by non-French readers and were not used by the guitarists of this study.

DYNAMICS

The word *dynamique* is also present in the list of [Nav13]. The words “dynamics” often defines the possible playing amplitude from the weakest to the strongest sound producible with an instrument, but we can imagine to transpose this definition from sound to the magnitude of vibrations. Moreover, in [Pat+15], semantic categories have been identified through discourse analysis. In this work, words within the category labeled “attack” relate to the interaction between the guitar and the musician, while words in the other categories relate to the sound directly. We therefore assumed that a word belonging to a category describing the relationship between the musician and the instrument is more likely to refer to the sense of touch. This category includes the word *dynamique*. “Dynamics” is “associated with both auditory and vibrotactile modalities in a balanced proportion”, as demonstrated in [Wol+14].

RESPONSE

The “attack” category identified in [Pat+15] includes the word *réponse*. “Responsiveness” is one of the selected words assumed in [Wol+14] to be “evaluable through one or both sensory modalities under study.” In the classification of violin attributes in [Sai+12], “response” is one of the most used to evaluate violins. According to Saitis [Sai+12, Table II], “response” offers the capability to describe the interaction between musician and instrument and we suppose that such words can be viewed as more likely to refer to the sense of touch.

FEELING

Ressenti/“feeling” seems to be used as a general word to question/describe the sensory experience of the musician as it can be seen in the instructions of various perceptual tests [Nav13; Pat14]. According to Saitis [Sai+12, Table II], “feel” offers the capability to describe the interaction between musician and instrument. We can address the specific relationship to touch in the semantics of this word in our study.

TOUCH

The word *toucher*/“touch” makes sense as we work on the sense of touch. The word *toucher* appears in the list provided in [Nav13]. Surprisingly, even with the growing literature on the sense of touch and vibratory feedback of music instruments, it seems that there is no other study with a specific attention of the word *toucher*.

VIBRATION

The word *vibration*/“vibration” has been used in instructions to provoke verbalizations about the sense of touch, as shown in experiments by Wollman et al. [Wol+14]. Moreover, verbal forms (*vibrer*/“vibrate”) and noun forms (*vibration*/“vibration”) are used and commented in [Ver16], to illustrate the diversity of vibrotactile representations. *Vibration* is an integral part of the vocabulary associated to the sense of touch.

3.2.3 Construction of corpus

We made a semi-automatic search of the strings of characters corresponding to the different forms each category may take in French (see table 3.2). For example, for the category COMFORT,

occurrences of *confort(s)*/"comfort(s)", *confortable(s)*/"comfortable", *inconfort*/"discomfort" were sought; for the category VIBRATION, the different forms *vibrer*/"vibrate", *vibration(s)*/"vibration(s)", *vibrato*/"vibrato", *le vibré*/"vibrato", etc. were sought by automatically scanning the transcripts with e.g. the string "vibr".

Label of the category	Sought string in the corpus	Words in corpus	Nature
CONFORT/COMFORT	confort	<i>confortable(s)</i> /"comfortable", <i>confort(s)</i> /"comfort(s)", <i>inconfort</i> /"discomfort",	adj., noun, noun
DYNAMIQUE/DYNAMICS	dynamique	<i>dynamique</i> /"dynamic(s)"	adj., noun
RÉPONSE/RESPONSE	répon	<i>réponse(s)</i> "response(s)", <i>répondre</i> /"respond"	noun, verb
RESSENTI/FEELING	ressen	<i>ressenti(s)</i> /"feeling(s)", <i>ressentir</i> /"feel"	noun, verb
TOUCHER/TOUCH	touch	<i>toucher</i> /"touch"	noun, verb
VIBRATION/VIBRATION	vibr	<i>vibration(s)</i> /"vibration(s)", <i>vibrato</i> /"vibrato", <i>vibré</i> /"vibrato", <i>vibrer</i> /"vibrate"	noun, noun, noun, verb

TABLEAU 3.2 – Words in the corpus for each category, their specific string characters (used to the semi-automatic research) and nature of words (adjective abbr. adj., noun or verb).

All the occurrences considered in our corpus were formulated by guitar players. Our corpus finally contains 370 utterances. "Utterance" refers here to the combination of sentences within which at least one occurrence of a word pertains to one selected category. An utterance contains the sentence where the word occurs and the sentences before and/or after to understand the context of use of this occurrence. In the following example⁸, the first sentence is needed to understand and complete the occurrence of *réponse*/"response" :

Je pense que le côté moelleux, cela va être quelque chose qui ne va pas m'agresser... un sentiment de confort un petit peu, de douceur. Oui, c'est un peu plus raide comme réponse, ce qui n'est pas désagréable non plus mais je suis moins...

"I think the mellow side is going to be something that isn't going to hurt me... a little of a feeling of comfort, softness. Yes, it's a little steeper as a response, which is not unpleasant either but I am less..."

(NavP2⁹, RESPONSE)

For each occurrence of each word in a category, we identified a dedicated utterance, even if there could be several occurrences in the same sentence (details of the number of utterances/occurrences in table 3.3). Each occurrence of a word in a category is analyzed separately.

8. In the examples, french quotes are in italic font, and the English proposition of translation appears between quote marks.

9. There are 2 corpora of interviews. The transcriptions of the study of Navarret are gathered to form the corpus Nav13, and the 13 guitarists/participants are named from P1 to P13. The transcriptions of the study of Paté are gathered to form the corpus Pat14, and the 10 participants are named from P1 to P10. NavP2 therefore corresponds to an extract of the corpus Nav13 with the participant number 2.

We can observe that RESPONSE and its occurrences represent 30% of the corpus (112 occurrences), whereas COMFORT and DYNAMICS contain respectively 35 and 37 occurrences only.

Label of the Category	#occ.	#part. (%)	Max. #occ. by part.
COMFORT	35	56	7
DYNAMICS	37	30	13
RESPONSE	112	82	17
FEELING	53	78	11
TOUCH	69	82	11
VIBRATION	64	52	26

TABLEAU 3.3 – Number of occurrences (abbr. # occ.) of each category, percentage of participants having used the words from each category (% , abbr. # part.), and maximum number of occurrences for a single participant (abbr. Max. # occ. by part.).

In table 3.3, we can already observe the variability between participants, for example with DYNAMICS, only 30% of participants (7 participants out of 23) used the words *dynamique* and one of the participants used the word 13 times. RESPONSE is used by most of the participants, like FEELING and TOUCH. One participant produced 41% of the occurrences of the category VIBRATION. This shows a high inter-individual variability. This variability may explain the need to deeply analyze the different words used by guitarists to speak about the sense of touch, as each guitar player may use those words differently. This work aims to clarify the various kinds of use of these words. After identifying the utterances where each category was used and creating the corpus, these utterances were analyzed with linguistic methods, with the objective of determining whether they are actually related to touch and how.

3.2.4 Observed parameters

The relationship of the selected categories of words with the sense of touch is analyzed in this article. This analysis is completed with the identification of the qualified object (what is described by each category), and the examination of the implication in discourse of musicians while talking about touch. This analysis is based on the linguistic features presented in section 3.3.

The main goal of this work is to clarify the relationship of the chosen categories with the sense of touch. It is an extended and updated version of the work presented in [Cam+20]. Utterances are classified into 3 labels :

- **Yes** : when the utterance has a semantic link with touch or deals with it.
- **No** : when we did not find any link with touch in the utterance.
- **Undefined** : when the available information was not sufficient to conclude on the relationship with the sense of touch.

The analysis of utterances specifies the qualified object by each category, often assumed to be a descriptor of the musician-instrument interaction. The utterances were classified into 5 labels , according to their focus on :

- **Guitar as sound** : description of the sound of the guitar,
- **Guitar as object** : description of the guitar as a physical object,
- **Guitar in general** : description of the guitar without specific precision (sound or object),
- **Interaction** : description of the relation between the musician and the instrument,
- **Musician** : description of the feeling of the musician or of his/her behavior.

As we aimed to identify relevant words for musicians, we evaluate the implication in discourse of the musician when talking about touch. The classification of the kinds of implication in discourse is declined into three labels, in decreasing order of personal implication :

- **ISE** : Immediate Sensory Experience, when the discourse of the guitarist refers to tested guitars or any observations on the present situation of test,
- **GOP** : Generalization Of Practices, when the observations are based on personal prior experience of the guitarist,
- **Doxa** : it corresponds to a set of opinions received without discussion, as obvious. It is the less personal kind of implication in discourse.

3.3 Analysis

The linguistic analysis of the corpus is based on different features (word classes e.g. nouns, adjectives, verbs ; personal marks e.g. personal and possessive pronouns ; morpho-syntactic context¹⁰, grammatical function, reference to guitar parts, reference to human body parts) which help to categorize the utterance for each observed parameter (relationship with touch, qualified object, implication in discourse). The use of each feature is detailed in this section with examples chosen in the corpus.

3.3.1 Levels of context

In this section, we distinguish three levels of context. At first a restricted context, defined by the morpho-syntactic context, at second an intermediate context corresponding to a full sentence, and finally a wide context with the entire utterance.

Morpho-syntactic context

Often, the words under study are head nouns¹¹ of noun phrases, e.g. *confort* in *confort de jeu*/"playing comfort", or *vibrations* in *vibrations de la table*/"soundboard's vibrations". This restricted context is named morpho-syntactic context. In the quotation below, *confort de jeu*/"playing comfort" refers to the relationship between the guitarist and his instrument. The word *confortable*/"comfortable" in the following utterance is linked to the vibrotactile perception of the neck and the ease to play these guitars.

*Si non en terme de **confort de jeu**¹², elles sont toutes les quatre, j'ai pas senti euh... elles sont toutes les quatre, elles me semblent toutes les quatre confortables. Je sais pas si c'est exactement les mêmes manches, si ?*

"Otherwise in terms of **playing comfort**, they are all four, I didn't feel uh... they are all four, they all seem comfortable to me. I don't know if they're exactly the same necks, are they?"

(PatP1, COMFORT)

Instead of paying only attention to isolated words, taking into account their morpho-syntactic context (restricted context) can provide details on the kind of vibration described, for example in the quote below. The soundboard's vibration is felt through the contact of the upper body of the

10. The morpho-syntactic context is used to form nominal groups or verbal groups (see [Par09] for details on morphosyntax in French). In this work, it refers to a restricted context, including the word under study and the associated words which form the nominal group or verbal group.

11. A head noun in a group of words is considered as the core of the phrase and determines its syntactic category.

12. Occurrences of category are underlined, and specific analyzed parts are in bold font.

guitarist. An interest on soundboard's vibration implies the sense of touch like in the following example.

Il y avait pour moi une différence flagrante entre la guitare verte et les deux autres, (...) je me concentrais plus sur la vibration de la table.

“There was for me a glaring difference between the green guitar and the other two, (...) I was more focused on **the vibration of the soundboard**.”

(NavP7, VIBRATION)

Analyzing the morpho-syntactic context is a first way to get information about the qualified object in the discourse of the guitarist. In the quote above, the morpho-syntactic context shows a strong link with the sense of touch. But in some other cases, it shows that there is no reference to touch, e.g. in *courbe de réponse* / “response curve” (NavP10) which is focused on frequency response and sound perception, or *harmoniques ressenties* / “felt harmonics” which concerns the timbre of the instrument and also the perception of sound (NavP12). It permits an efficient distinction between utterances to assess if there is a reference to touch or not.

Sentence context

If the morpho-syntactic context is the most efficient and repeatable way to analyze and identify the qualified object, it often does not permit to conclude on the implication in discourse or the relationship with touch. The sentence context can provide this information, as in the example below.

Pour définir ça, le grain c'est la matière du son, en ce qui me concerne, je ne sais pas si c'est la bonne définition, c'est comme ça que moi je la ressens.

“To define that, grain is the matter of sound, as far as I'm concerned, I don't know if that's the right definition, that's how I feel it.”

(NavP12, FEELING)

In this example, the morpho-syntactic context *que moi je la ressens* / “that's how I feel it” does not specify if the guitar player speaks about his prior experience or about the present task (implication in discourse) and if the use of the verb *ressens* / “feel” is related to the sense of touch. However, considering the whole sentence one can assume that the qualified object is the musician, because he especially explains his point of view and how he understands the concept of *grain* / “grain”. For the implication in discourse, the morpho-syntactic context could lead to interpret the sentence as immediate sensory experience with the use of present tense, but the sentence context highlights that the guitarist explains a word with his personal experience (generalization of practices).

Global utterance context

In the wide context (whole utterance), the word under study can refer to the sense of touch, in contrast with the sense of hearing. For example, COMFORT can be used in opposition to sound, and this confirms that COMFORT is linked to vibrotactile perception and interaction :

J'ai pas vraiment fait attention au confort de la guitare, etc, j'me suis vraiment concentré plutôt sur le son et sur le... tu vois, sur le son de la guitare.

“I didn't really pay attention to the comfort of the guitar, etc. I really focused more on the sound and the... you know, the sound of the guitar.”

(PatP1, COMFORT)

In contrast, the word can refer to sound more than touch, in association with words referring to sound (“bass”, “treble”, “medium”, “hear”, etc.) :

Il faut qu'il y ait du grave, il faut qu'il y ait du médium, il faut qu'il y ait des aigus, et cet équilibre, c'est un ressenti. Mais j'entends bien s'ils sont là ou s'ils ne sont pas là.

“There has to be some bass, there has to be some medium, there has to be some treble, and this balance is a feeling. But I can hear if they are here or if they are not here.”

(NavP10, FEELING)

Associated with the word “dynamics”, we can find information on touch through the mention of human body parts like fingers, or the use of action verbs such as “to attack” (see the example below for the use of action verbs), showing physical interaction between the player and his instrument. This attack is controlled by the right hand¹³, and the guitarist can decide to attack more or less through a gestural change, and observe the feedback of the instrument. It can be described and interpreted as a auditory feedback or a vibrotactile feedback. These two kinds of feedback are strongly linked.

Alors la dynamique d'une guitare, et la dynamique en général, pour moi, c'est le fait qu'il y a une différence énorme entre quand j'attaque et quand j'attaque pas. Y a un truc que j'aime pas trop c'est les guitares actives qui justement n'ont pas de dynamique. (...) C'est-à-dire que si j'attaque j'ai beaucoup de son, si j'attaque pas, j'ai très peu de son. La reine, pour ça, c'est encore une fois la Telecaster.

“So the dynamics of a guitar, and the dynamics in general, for me is the fact that there's a huge difference between when I attack and when I don't attack. One thing I don't like too much is active guitars that just don't have dynamics. (...) That is to say if I attack I have a lot of sound, if I don't attack, I have very little sound. The queen, for that, is once again the Telecaster.”

(PatP4, DYNAMICS)

By paying attention to the global context of each occurrence, we can find specific information on sound or touch (information not available with only the morpho-syntactic context) as the wide context of the utterance provides more information than the other kinds of context. Then, the analysis of the relation between the word under study with the other sentences within which it appears can help to determine the relationship with the sense of touch.

3.3.2 Guitar and human body parts

Association with body parts

There are few occurrences of parts of human body (only 51 utterances out of 370), but they provide information on the relation to touch, especially on the interaction with the fingers. The body of the guitarist, where skin is the vector of touch, is in contact with the instrument (hands and fingers with neck and strings, upper human body with the body of the guitar). It is illustrated with the following utterance mentioning the category COMFORT.

*La touche, euh, c'est pas si mal fait qu'ça, ça ne fait pas trop mal aux **doigts**. Certaines guitares neuves, euh, ils oublient de limer les barres de frettes, donc ça fait souvent très mal aux **doigts**. Là ça va encore, c'est assez confortable, assez facile à jouer. L'action des cordes est... pour moi me convient parfaitement.*

“The fingerboard, uh, it is not that badly done, it doesn't hurt the **fingers** too much. Some new guitars, uh, they forget to sand the fret bars, so it often hurts the **fingers** a lot. That's okay again, it is quite comfortable, quite easy to play. The string action is... for me it is a perfect fit.”

(PatP6, COMFORT)

13. The standard situation of playing guitar considered here is left hand on neck, and right hand to excite strings. The situation is inverted in case of left-handed guitars.

The example above shows that the use of body parts like “hands” and “fingers” may refer to touch. In the following example, the use of “fingers” and “hands” allows to state that the feeling of vibration is described, with no interest to the sound description but rather to the pain felt at the top of the fingers and therefore the sense of touch. The human body part *oreille* / “ear” is used in opposition to the vibratory feedback, as the guitar player did not hear the sound of the guitar, but felt the vibrations produced by the instrument. The guitar player made an opposition between the sound heard in his ears and the vibration felt in his fingers (and his left hand).

Là, je sens la guitare qui vibre, dans les doigts, dans mes mains. Même si on ne l'entend plus à l'oreille, je sens que cela continue à vibrer.

“There, I feel the guitar that vibrates, in the fingers, in my hands. Even if one can't hear it in your ear anymore, I feel that it continues to vibrate.”

(NavP10, VIBRATION)

The use of human body parts implies in general a relationship to the sense of touch, in particular when the “fingers” or “hands” are involved.

Association with guitar parts

Guitarists mention different parts of the guitar in the description of their sensations. It has to be established whether the occurrences of guitar parts could be used to qualify the relationship with the sense of touch. The guitar players can describe guitar parts in contact with their hands and fingers, like frets and neck. Table 3.4 presents all the guitar parts we found in the corpus in French with a tentative English translation, classified in 6 groups.

The category COMFORT is often linked with guitar parts, as words to speak about vibrotactile sensations.

Le manche me semble légèrement différent. Plus en... plus en V, peut-être. On sent plus l'arête au milieu. Un peu moins confortable, je trouve, que la précédente. Maintenant, le... peut-être c'est l'action... il me semble que le tirant de corde n'est pas... n'est pas identique non plus.

“The neck looks slightly different to me. More in... more V-shaped, maybe. You can feel the edge more in the middle. A bit less comfortable, I find, than the previous one. Now, the... maybe it is the action... it seems to me that the gauge is not... is not the same either.”

(PatP10, CONFORT)

Talking about TOUCH implies a lot of occurrences of different guitar parts (frets, wood, fingerboard, neck...), which help to assess that there is a relationship to the sense of touch. Guitarist PatP5 associates the sense of touch with the finger sensation on the string and the fingerboard in the following quote.

Ça dépend ce qu'on met derrière le toucher, après c'est vraiment la sensation physique au niveau des doigts, et euh il y a plein de choses qui rentrent là-dedans, voilà le type de cordes utilisées, l'action, les frettes, dans une moindre mesure le bois de la touche, mais ça je ne suis pas très sensible à ça. Enfin sinon c'est entre une touche vernie et une touche non vernie. La sensation est différente.

“It depends on what you put behind the touch, then it is really the physical feeling in the fingers, and uh there's a lot of things that go into it, like the type of strings used, the action, the frets, to a lesser extent the wood of the fingerboard, but I'm not very

12. In the field of instrument making, the word *diapason* / “scale” is referring to the vibrating length of the string, and not to the tuning fork (used by musician to tune their instrument). In this context, the word *échelle* is an anglicism of “scale” and means the same thing.

Label of the group	French Words	English translation
Bois “Wood”	<i>Bois</i>	Wood
	<i>Ébène</i>	Ebony
	<i>Érable/maple</i>	Maple
	<i>Lutherie</i>	Lutherie
	<i>Matériaux</i>	Materials
	<i>Palissandre/rosewood</i>	Rosewood
Corde “String”	<i>Action</i>	Action
	<i>Corde</i>	String
	<i>Diapason</i>	Scale ¹²
	<i>Échelle</i>	Scale
	<i>Nylon</i>	Nylon
	<i>Tirant</i>	Gauge
Corps “Body”	<i>Caisse</i>	Body
	<i>Chanfrein</i>	Forearm chamfer
	<i>Corps</i>	Body
	<i>Planche</i>	Board
	<i>Table</i>	Soundboard
Électronique “Electronics”	<i>Ampli</i>	Amplifier
	<i>Bobinage</i>	Winding
	<i>Double</i>	Humbucker
	<i>Micro</i>	Pickup
	<i>Pédale</i>	Pedal
	<i>Plot</i>	Polepiece
	<i>Potard</i>	Knob
	<i>Sélecteur</i>	Selector
Équipement “Equipment”	<i>Accastillage</i>	Hardware
	<i>Attache de courroie</i>	Strap button
	<i>Capo</i>	Capo
	<i>Chevalet</i>	Bridge
	<i>Cordier</i>	Tailpiece
	<i>Médiator</i>	Pick
	<i>Vibrato</i>	Vibrato
Manche “Neck”	<i>Barrette</i>	Fret
	<i>En D</i>	D-shape
	<i>Frette</i>	Fret
	<i>Manche</i>	Neck
	<i>Sillet (de tête)</i>	Nut
	<i>Touche</i>	Fingerboard

TABLEAU 3.4 – Grouping of guitar parts used in the corpus in French with their English translations.

sensitive to that. Otherwise it is between a varnished and an unvarnished **fingerboard**. The sensation is different.”

(PatP5, TOUCH)

The description of sensations with guitar parts helps to assess the link with touch, as the guitar part is in contact with the player.

Brand and model

In the corpus, some guitar models or brands are mentioned. It is a good indicator to identify whether the musician is speaking about the guitar, his relation to the instrument or his feeling/experience of it, as in the following example.

*C'est le toucher en général, c'est difficile à exprimer, la sensation qu'on a au vibré d'une note, au vibrato main gauche, l'impression qu'il faut y aller plus fort sur ce type de guitares, que sur ma **Ibanez** par exemple, où je vais tout doux et cela sonne.*

“It is the touch in general, it is difficult to express, the feeling that we have when a note is vibrated, with left hand vibrato, the impression that we have to go harder on this kind of guitar, than on my **Ibanez** for example, where I go very soft and it sounds.”

(NavP1, VIBRATION)

3.3.3 Linguistic features

Personal marks

Personal marks are the personal and possessive pronouns, as presented in table 3.5. They are useful to determine the qualified object, as subject or object of verbs, and the implication in discourse, to qualify the involvement of the speaker. The use of first person singular pronouns as subject of verbs may indicate a description centered on the musician (or on the interaction between musician and instrument) and a discourse based on the immediate sensory experience (ISE) or the generalization of practices (GOP), like in the example below :

***Je me** demande si **mon** premier ressenti qui était que celle-là était plus brillante, si ce n'est pas juste qu'elle est un poil plus creusée ou en tout cas qu'il se passe un peu moins de choses plus bas. Alors que sur celle-ci il se passerait plus de choses...*

“I wonder if **my** first feeling which was that this one was brighter, if it is not just that it is a bit hollower or in any case that a little less is happening more low. While on this one more things would happen...”

(NavP5, FEELING)

In the example above, the implication in discourse relates to an immediate sensory experience because the guitarist offers a reflection based on his feeling during the test.

The use of the second person pronoun brings a collective dimension, reflecting some shared knowledge between the speaker and his interlocutor. It could also indicate authority argument and doxa.

*Et à chaque fois qu'**tu** rejoues, la guitare elle **te** donne la même réponse. Parce que c'est un truc qu'est hyper-fidèle, hein, à c'niveau-là.*

“And every time **you** play again, the guitar gives **you** the same response. Because it is something that is greatly faithful, eh, at this level.”

(PatP6, RESPONSE)

The use of authority argument and doxa is often present when the third person is used as subject of the verbs, like the impersonal form *on*/“we, one”. In French, *on* can refer with high variability to a defined collective, a restricted collective (*on* : you and me, *on* : we guitarists,

People	Personal marks	English translation
Speaker	<i>Je, moi</i>	I
	<i>Mon, ma, mes, mien(s), mienne(s)</i>	My
	<i>Nous</i>	Us, our
Contact person, experimenter	<i>Tu, toi, vous</i>	You
	<i>Ton, ta, tes, tien(s), tienne(s), vôtre, vos</i>	Your(s)
Any other person	<i>Il, lui</i>	He
	<i>Elle, la</i>	She
	<i>On</i>	We, one
	<i>Son, sa, ses, sien(s), sienne(s)</i>	His, her
	<i>Ils, elles, eux</i>	They
	<i>Ceux,</i>	Those
	<i>Leur(s)</i>	Their
	<i>Gens,</i>	People
	<i>Bonhomme</i>	Man
	<i>Mec, type</i>	Guy
	<i>Musicien(s)</i>	Musician(s)
	<i>Personne(s)</i>	Person(s)
	<i>Luthier(s)</i>	Luthier(s)
	<i>Guitariste(s)</i>	Guitarist(s)
<i>Anglo-saxons</i>	Anglo-Saxons	

TABLEAU 3.5 – Personal marks in the corpus in French by the kind of subjects, with a proposition of English translation.

on : we humans, *on* : the others. . .). In the following example, *on* a priori refers to the whole community of guitarists, and the impersonal aspect is enhanced by the use of *il ne faut pas* “you must not”.

Si c’est trop flatteur, c’est que cela fait quelque chose de trop confortable à l’oreille, et du coup, on n’entend pas tout ce qu’on veut entendre, et c’est à double tranchant, il ne faut pas que cela soit trop joli non plus.

“If it’s too flattering, it’s because it makes something too comfortable for the ear, and therefore, one doesn’t hear everything one wants to hear, and it’s double-edged, you must not let it be too pretty either.”

(NavP2, COMFORT)

Modal words

Modal words¹⁴ express the degree of certainty and the degree of possibility. In the example below, the use of *en général* “in general” coupled with the first person singular and quantification of appreciation *j’aime pas trop* “I don’t really like” helps to class the utterance under the “generalization of practices” label for the implication in discourse. The modulation by the expression of doubt or uncertainty can be used as proof of a personal judgement. And in the following example, the use of *en général* “in general” expresses a usual fact, a usual situation. However, the use of *justement* “in fact” is ambiguous because this word is employed as the situation is considered as evident for the interlocutor.

14. For exhaustive lists, see [Nø189; Vio04].

Alors dynamique d'une guitare, et en général la dynamique en général, pour moi, c'est le fait que y a une différence énorme entre quand j'attaque et quand j'attaque pas. Y a un truc que j'aime pas trop c'est les guitares actives qui justement n'ont pas de dynamique.

“So the dynamics of a guitar, and the dynamics in general, for me is the fact that there's a huge difference between when I attack and when I don't. There's one thing **I don't really like**, it is active guitars **in fact** that don't have dynamics.”

(PatP4, DYNAMICS)

Moreover, a high presence of modal words in an utterance can help to class the utterance in the immediate sensory experience label, like in the example below. The modal word indicates the level of certainty of the musician, and specifies the personal characteristics of his reflection. Here, in the following example, coupled with present tense and the description of a guitar of the test, the presence of modal words strengthens the personal aspect of the discourse.

Là j'ai l'impression peut-être d'une guitare qui est relativement rigide, qui a peu de, sur laquelle on a peu d'impact en terme de dynamique de jeu. Donc qu'on joue comme ça ou qu'on joue comme ça le spectre est quasiment le même en fait. Il n'y a pas beaucoup d'expressivité.

“Here **I have the impression maybe** of a guitar which is **relatively** rigid, which has little, on which one has little impact in terms of playing dynamics. So whether we play like this or play like that the spectrum is actually **almost** the same. There is not a lot of expressiveness.”

(PatP2, DYNAMICS)

Metadiscourse

Words or groups of words classified as metadiscourse¹⁵ are used to reformulate an idea or a concept, in order to give a more detailed information or make sure that the discourse of the participant is well understood by the experimenter. It indicates reflexivity. The presence of metadiscourse can anchor the discourse in the present tense and reality, like the example below :

La sensation comme ça que j'ai avec cet instrument, la réponse qu'il me donne, n'est pas assez intéressante mais il y a une réponse quand même en quelque sorte. Là, la réponse est encore moins bordélique je dirais mais du coup cela me fait une base où je suis assez libre, où je n'ai pas les mêmes rapports. Cet instrument me pose plus de problèmes en quelque sorte.

“The feeling **like that** I have with this instrument, the response it gives me, is not interesting enough but there is a response somehow. There, the response is even less messy **I would say** but suddenly it gives me a base where I am quite free, where I do not have the same relationships. This instrument gives me more problems **somehow**.”

(NavP7, RESPONSE)

3.3.4 Synthesis

As a synthesis on the linguistic features of the section 3.2, we present in table 3.6 the features used to conclude on each parameter (relationship with the sense of touch, qualified object, implication in discourse) for each utterance.

We focused our analysis on the morpho-syntactic context (restricted context) whenever it was possible to guarantee the highest repeatability of this work and to have a systematic approach. The morpho-syntactic context was useful to identify the qualified object for each category and often the relationship with the sense of touch, but the larger context of one full sentence (intermediate context) was needed for the implication in discourse. The global utterance context (wide

15. For exhaustive lists, see [Bor85 ; Max09].

Linguistic features	Touch	Qo.	Id.
Context :			
Morpho-syntactic	X	X	.
Sentence	X	X	X
Global utterance	X	.	.
Association with :			
Body parts	X	X	.
Guitar parts	X	X	X
Guitar model or brand	.	X	X
Personal Marks	.	X	X
Modal words	.	.	X
Meta-discourse	.	.	X

TABLEAU 3.6 – Observed parameters (relationship with the sense of touch abbr. Touch, qualified object abbr. Qo., and implication in discourse abbr. Id.) and helpful linguistic features.

context) helps to resolve the cases left “undefined” by the analysis of the relationship with the sense of touch at a smaller scale with the morpho-syntactic context, but tends to homogenize the results on qualified object and does not illustrate the differences between each category. Moreover, analysis of the global utterance context adds complexity for the implication in discourse with combinations of the different labels, which makes the analysis difficult, since the aim of this work is to propose a repeatable and usable method for researchers.

The association with human body parts, guitar parts and guitar model is very useful to identify the qualified object. The mention of guitar parts helps to identify contact area between the guitarist and the instrument and a potential link with the sense of touch. Regarding the implication in discourse, the occurrences of guitar parts, model or brand give information if the guitarist is talking about the guitar of the present test or another guitar he once tested (or not).

Finally, linguistic features like personal marks can help to define the qualified object in utterance, and to specify the degree of implication of the guitarist (depends especially on the use of the first, the second or the third person) : is the speaker referring to himself, to the guitar, to the sound? The use of modal words and meta-discourse gives information about the level of knowledge of participants, the degree of confidence of affirmation and the personal or impersonal aspects of implication in discourse.

3.4 Results

In this section, the relationship with the sense of touch is presented for both word categories and guitar parts. Then, the results on qualified object and on implication in discourse for each category are commented.

3.4.1 Relationship between word categories and the sense of touch

Thanks to the linguistic features identified in section 3.3, we categorized the utterances of the corpus into the three labels presented in section 3.2, and observed the following distribution :

- **Yes** : (utterance related to the sense of touch) 41.3% of the utterances of the corpus
- **No** : (utterance not related to the sense of touch) 55.7% of the utterances of the corpus

- **Undefined** : (the available information was not sufficient to conclude on the relationship with the sense of touch) 3.0% of the utterances of the corpus

Even if the chosen categories were a priori related to the sense of touch (see section 3.2.2), only 41.3% of the utterances in the corpus actually relate to the sense of touch. Figure 3.1 shows the proportion of utterances with a relationship with the sense of touch for each category. RESPONSE and FEELING are poorly linked to touch (respectively 8% and 25%), due to their more general meaning, and a context more attached to sound than the other categories. The category COMFORT is mostly linked to the sense of touch with 80% of its utterances, TOUCH and VIBRATION are essentially linked to touch but the nature of words (verb or noun) affects the results (detailed in section 3.5). In the category TOUCH, the utterances classified “no” for the relationship with the sense of touch always contain the verb *toucher* / “to touch”, potentially because this word is used in our corpus with the meaning of the verb “to move” (or “to manipulate”). The nominal form *toucher* / “touch” is always used in utterances linked to the sense of touch. In the category VIBRATION, the use of the verb *vibrer* / “vibrate” is more linked to the sense of touch than nominal forms, *vibration(s)* / “vibration(s), *vibrato* / “vibrato” and *vibré* / “vibrato”. DYNAMICS is often used in relationship with the sense of touch (51%), but this relationship depends on context, when associated with verbs linked to the auditory feedback (*sonner* / “to sound”, *entendre* / “to hear”) or specific description of pickups.

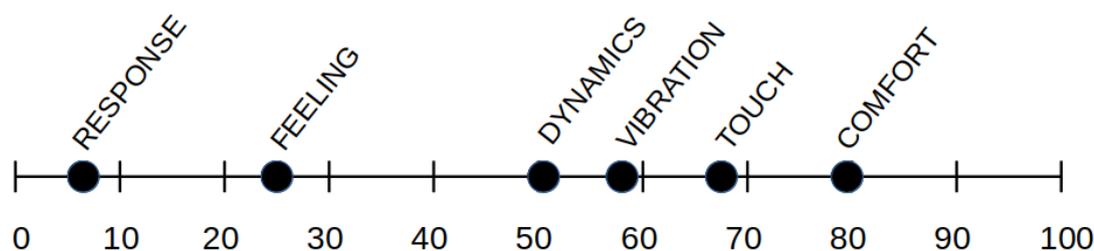


FIGURE 3.1 – Percentage of utterances in relationship with the sense of touch for each category.

3.4.2 Guitar parts and relationship with touch

The analysis of the relationship between the word categories we highlighted in our corpus and the sense of touch is facilitated by the presence of guitar parts (detailed in table 3.4) in utterances. In table 3.7, the number of utterances mentioning guitar parts are detailed by group of guitar parts. On the 173 utterances with guitar parts, it appears that the groups “neck”, “string”, and “electronics” are often used in the corpus. “Neck” is employed in utterances of COMFORT and TOUCH, but “string” is often employed with the category VIBRATION. For the categories DYNAMICS, RESPONSE and FEELING, the most used group of guitar parts is “electronics”.

Figure 3.2 shows the proportion of utterances with relationship with the sense of touch when associated with each group of guitar parts. The “neck” group is mostly linked to the sense of touch, 91% of the utterances including a guitar part of the group “neck” are linked to the sense of touch. At the opposite, the group “electronics” is rarely used linked to the sense of touch (15%) and mainly used to only speak about the sound of the guitar (for example, how the pickups affect the sound and description of the interaction between the pickups and the strings). The other groups, “equipment”, “wood”, “string” and “body”, are often used in utterance in relationship with the sense of touch (between 50% and 67%).

Label of the Group	#utt.
Bois/“Wood”	35
Corde/“String”	67
Corps/“Body”	25
Électronique/“Electronics”	53
Équipement/“Equipment”	16
Manche/“Neck”	58

TABLEAU 3.7 – Number of utterances (abbr. #utt.) for each group of guitar parts in the corpus.



FIGURE 3.2 – Percentage of utterances in relationship with the sense of touch by guitar parts group.

These results confirm the idea that vibrations and vibratory feedback are felt by guitar players more through the neck and the contact with the left hand than the other guitar parts, especially the group “electronics” that describes the sound transmission to the amplifier.

3.4.3 Relationship between word categories and their qualified object

The following results on the qualified object are led by the analysis of morpho-syntactic context. The detailed results for each category is shown in figure 3.3, summarized in table 3.8 with the one or two main qualified objects for each category.

COMFORT utterances often deal with interaction between musician and instrument whereas FEELING utterances describe the musician, and the other categories are mainly used as descriptors of the instruments. RESPONSE utterances most often describe the sound of the guitar, with occurrences based on the frequency response of the instrument. TOUCH and VIBRATION utterances are used in order to describe the guitar as a physical object, respectively for the contact of the hands with the instrument and for the vibrations of the strings. DYNAMICS is used for general descriptions of the guitar, often in association with the pickups of the guitar.

As an extension of these results, it can be noted that categories mostly linked to touch (80% for COMFORT, 68% for TOUCH, and 58% for VIBRATION) are descriptors of the guitar as an object (or the interaction between the musician and his instrument).

3.4.4 Relationship between word categories and the implication in discourse

The analysis of the implication in discourse reveals a majority of utterances describing personal experience (immediate sensory experience and generalization of practices). Details are pre-

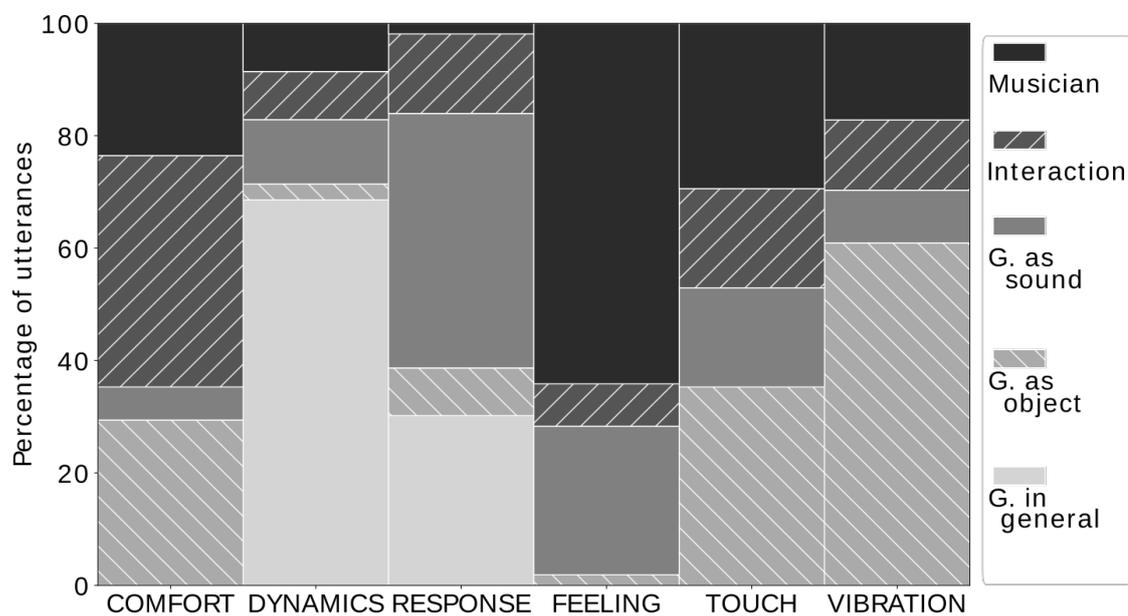


FIGURE 3.3 – Percentage of each qualified object for each category of words : musician, interaction, guitar (abbr. g.) as sound, g. as object, g. in general.

Label of the category	Qualified object	Percentage of utterances
COMFORT	Interaction	41.2
	G. as object	29.4
DYNAMICS	G. in general	68.6
RESPONSE	G. as sound	45.3
	G. in general	30.2
FEELING	Musician	64.2
	G. as sound	26.4
TOUCH	G. as object	35.3
	Musician	29.5
VIBRATION	G. as object	60.9

TABLEAU 3.8 – Distribution of the qualified object in utterances for each category (qualified object for each category with more than 25% of utterances of the category).

sented in figure 3.4. For each category we could observe that less than 20% of its utterances refer to doxa (the least personal kind of implication in discourse). It confirms that the corpus mostly contains utterances with the personal point of view of guitarists, due to the playing situation in the perceptual tests and also to the interview guides that were on purpose focused on personal experience.

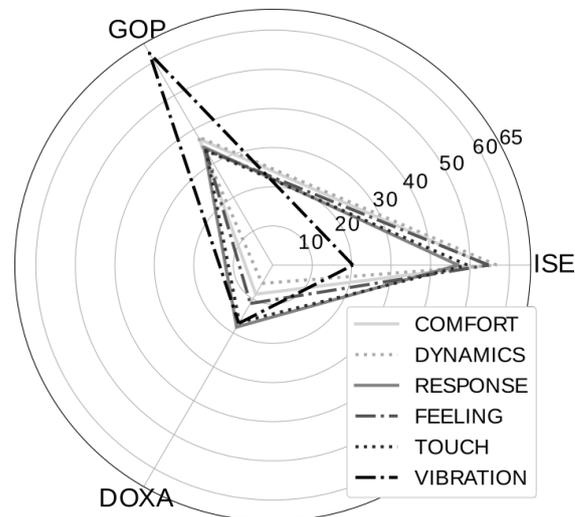


FIGURE 3.4 – Percentage of different implication in discourse for each category, with the analysis on sentence context. ISE corresponds to immediate sensory experience, GOP corresponds to generalization of practices, and DOXA corresponds to doxa.

The immediate sensory experience is the most common kind of implication in discourse found for each category of words, except for VIBRATION, where most of utterances concern a less immediate, related to present task, experience, namely generalization of practices. The proportion of doxa in the corpus is low, but one can observe more doxa for the categories RESPONSE, TOUCH, VIBRATION. For instance, COMFORT, DYNAMICS and FEELING may be more appropriate to speak about and focus on personal experience. The implication in discourse varies with the nature of words (verb or noun), with important variations for VIBRATION, TOUCH, FEELING and COMFORT, as detailed in section 3.5.

In the analysis of the corpus, there are few links between the relationship with the sense of touch and implication in discourse, as presented in table 3.9. The main result is a higher proportion of utterances with doxa that have no relationship with the sense of touch in comparison with utterances with immediate sensory experience and generalization of practices. In fact, the utterances classified “doxa” are often related to sound and auditory feedback. The reflection about sound may be considered by the musician as perceptible by the interlocutor and quite obvious (the sound is perceived by both the musician and the spectator, or here the researcher). But the vibratory signal is felt by the musician only, who must explain to his interlocutor the perceived vibrations.

3.5 Discussion

As the linguistic analysis showed, there are several linguistic features usable to identify the relation of each chosen category with the sense of touch. However, the results do not permit

Category	Yes	No	Undefined
ISE	42.1%	54.4%	3.5%
GOP	47.0%	50.3%	2.7%
DOXA	27.3%	69.1%	3.6%

TABLEAU 3.9 – Relationship with the sense of touch of utterances by implication in discourse, in percentage. ISE corresponds to immediate sensory experience, GOP corresponds to generalization of practices, and DOXA corresponds to doxa.

to assess a permanent relationship, but provide trends. This section discusses these results and gives details about the variability between words within some of the categories of words under study.

If COMFORT is mainly linked to the sense of touch (80% of utterances present a relationship with the sense of touch) with low variability between words, TOUCH and VIBRATION highly depend on the nature (verb or noun) of words used, as mentioned in section 3.4.1. The category TOUCH, when the word is the noun “touch”, is always in relationship with the sense of touch, whereas when the word used is the verb “to touch” the relationship with touch is much more rare (24%). This difference is explained by the use of the verb “to touch” by guitarists when playing, as they were asking (during test) permission to touch knobs or settings on the guitar or the amplifier. For example in this quote :

Ce qui est difficile, c’est de ne pas pouvoir toucher les boutons. C’est certain que je ne serais pas resté droit.

“The hard part is not being able to touch the knobs. Certainly I would not have stayed like this [all knobs at mid values].”

(NavP5, TOUCH)

For VIBRATION, the opposite trend is observed. The use of nouns (“vibration”, “vibrato”) is linked to the sense of touch in 47% of utterances, whereas the use of the verb (“vibrate”) is linked to the sense of touch in 71% of utterances. The verb is often used to describe how the instrument vibrates and how it is felt by the musician :

Pour moi, il est certain que les sensations que j’ai dans les doigts au toucher dans la manière dont vibre l’instrument, la sensation charnelle à l’instrument sont complètement reliées au son.

“For me, it is certain that the sensations I have in my fingers through touch in the way the instrument vibrates, the carnal sensation to the instrument are completely related to the sound.”

(NavP10, VIBRATION)

The category DYNAMICS presents a variability in the relationship with the sense of touch. Contrary to TOUCH and VIBRATION, this variability is not due to the different forms of the words in this category. We mainly found the noun *dynamique* / “dynamics” in the corpus (note that there was only one use of the adjective *dynamique* / “dynamic” in the corpus). The difficulty of the variability in the relationship with the sense of touch could be solved by the observation of occurrences of human body parts and action verbs :

*Pour **jouer** rock mais j’ai beaucoup plus de dynamique au **doigt**. Et pour des phrases hard rock jusqu’au blues jazz, je passe de l’un à l’autre.*

“To **play** rock music but I have a lot more dynamics on my **finger**. And for hard rock to blues jazz phrases, I switch from one to the other.”

(NavP4, DYNAMICS)

The variability on the nature of words used is less important for RESPONSE and FEELING, as they have no relationship with touch in most of the cases. RESPONSE does not present high variability through the observed parameters (relationship with touch, qualified object and implication in discourse), but the implication in discourse for the category FEELING is often immediate sensory experience when the verbal form is used (ISE 59.5%, GOP 28.6% and doxa 11.9%), and often generalization of practices when the nominal form is used (ISE 36.4%, GOP 54.5% and doxa 9.1%).

3.6 Conclusion

This study provides answers to the questions raised in section 3.1. The 6 chosen categories of words (COMFORT, DYNAMICS, RESPONSE, FEELING, TOUCH and VIBRATION) were analyzed through three parameters. First, the link with the sense of touch was determined, in order to check the usability of those words to speak about touch. Second, the specific qualified object of each category was specified, in order to check the assumption of the literature (i.e., the chosen words were considered to be descriptors of the relation between the instrument and the musician). Third, the implication in discourse of guitarists when using the chosen words is analyzed in order to identify the degree of personal implication. A linguistic analysis was done, based on different features (presented in section 3.3) : nature of the words, personal marks, morpho-syntactic context, modal words, meta-discourse, reference to guitar parts, reference to human body parts.

For the relationship with the sense of touch, a high variability between the category of words is observed, and even between words in a category. The 4 categories COMFORT, DYNAMICS, TOUCH and VIBRATION are linked with the sense of touch. It is important to keep a special attention to the nature of words for TOUCH with the use of the noun and VIBRATION with the use of the verb. For electric guitarists in playing situation in our corpus, the verb *toucher*/"touch" is not related to the sense of touch, with a meaning close to "move" more than "touch", and the nouns *vibration*/"vibration", *vibrato*/"vibrato" and *vibré*/"vibrato" are less linked to the sense of touch than the verb *vibrer*/"vibrate". The category COMFORT, as descriptor of the relation between the instrument and the musician, is highly linked to the sense of touch. DYNAMICS can be used to speak about touch, but the context of its use must be taken into account, especially when associated with a description of the pickups or verbs of the auditory feedback (*sound* or *hear* for example). The 4 categories COMFORT, DYNAMICS, TOUCH and VIBRATION can be used in further works to elaborate a survey on touch, and they will be useful to analyze the relationship with the sense of touch on further perceptual tests. However, the categories RESPONSE and FEELING have no strong link with the sense of touch, but can be useful as they are more employed by guitarists than the words in the other categories, and can be interesting to target and incite a discourse focused on the musician or the guitar.

The sense of touch was studied in utterances of the corpus that include references to electric guitar parts. It was shown a strong link of the group "neck" with the sense of touch, more than the other electric guitar parts. As the electric guitar players feel more vibrations on this part of the electric guitar than the others, it seems to be very interesting to measure the vibratory behavior of the electric guitar, and link the vibrotactile perception with the physical vibration (Fleischer and Zwicker proved a higher mobility at the neck of the guitar in [FZ98], and Paté et al. underlined the role of the conductance of the neck to predict decay time of a tone [PLF14]).

Moreover, for the development of questions and questionnaires for perceptual tests in playing situations, the focus on these contact areas could permit to orient the discourse on the sense of touch, and can be coupled with the categories linked to the sense of touch.

The analysis of the implication in discourse illustrates the personal implication of guitarists when both freely playing and speaking. The chosen categories are related to the immediate sensory experience, except VIBRATION which is related to generalization of practices. It could be due to the need for comparison when guitarists speak about how the guitar vibrates, because only the musician can access the vibratory feedback of the instrument. In order to be understood by the experimenter, he has to explain his feelings using comparisons with other situations. A potential lack of words to speak about the sense of touch could explain this need.

This work could be a basis for further works on vibrotactile perception and discourse on perceived vibrations, linked to the feeling of sound (when assumed that the auditory feedback and the vibratory feedback are both present for the musician when he is playing). The words presented through the different categories can now be used with a higher level of knowledge and some of them permit to target the vibrotactile perception. Tests may now be conducted in different formats (playing tests, interviews, surveys, physical studies) with the use of the word categories described in this article, which help to focus on vibrotactile perception.

Chapitre 4

Robustesse des résultats de la méthode d'analyse linguistique et recommandations

Sommaire du présent chapitre

4.1 Introduction	55
4.2 Comparaison des études	56
4.2.1 Différences générales	57
4.2.2 Différences par catégorie de mot	58
4.3 Différences sur les résultats de l'analyse et recommandations	61
4.3.1 Rapport au toucher	61
4.3.2 Objet qualifié	63
4.3.3 Implication dans le discours	65
4.4 Conclusion	69
4.4.1 Rapport au toucher	69
4.4.2 Objet qualifié	69
4.4.3 Implication dans le discours	70

4.1 Introduction

Dans le chapitre 3, il a été montré comment appliquer la méthode linguistique présentée dans le chapitre 2. Trois indicateurs ont été étudiés dans les énoncés du corpus : le « rapport au toucher », l'« objet qualifié » et l'« implication dans le discours ». Les résultats ont été obtenus sur la base de deux études similaires de comparaison de guitares *solid body* et sont résumés dans le tableau 4.1.

Dans le présent chapitre, la validité de l'association des études est discutée. La robustesse des résultats de la méthode d'analyse est étudiée, en reprenant séparément les résultats de chaque étude (Nav13 et Pat14). Il a été choisi de parler de « robustesse » dans ce cas, ce qui est présenté dans ce chapitre étant à la frontière entre trois notions : la reproductibilité, la répétabilité et la

Catégorie	Rapport au toucher (%)	Objet qualifié (%)	Implication dans le discours ESI - GDP - DOXA (%)
CONFORT	80	Interaction 41,2	54,3 - 37,1 - 8,6
DYNAMIQUE	50	Guitare en général 68,6	56,8 - 37,8 - 5,4
RÉPONSE	8	Guitare (son) 45,3	47,0 - 34,8 - 18,3
RESSENTI	25	Musicien 64,2	54,7 - 34,0 - 11,3
TOUCHER	68	Guitare (objet) 35,3	49,3 - 33,8 - 16,9
VIBRATION	58	Guitare (objet) 60,9	20,3 - 62,5 - 17,2

TABLEAU 4.1 – Synthèse des résultats de l'étude linguistique du chapitre 3. La première colonne indique la catégorie de mot, la deuxième indique la proportion d'énoncés en lien avec le sens du toucher, la troisième donne l'« objet qualifié » le plus représenté, et la dernière la proportion d'ESI, de GDP et de DOXA pour l'« implication dans le discours » (dont la somme peut dépasser 100% en présence de combinaison de plusieurs possibilités comme ESI-GDP qui est alors compté deux fois, une fois en ESI, une fois en GDP.)

robustesse. Il est question de reproductibilité quand une même expérimentation est effectuée à des moments, des lieux ou avec des opérateurs différents, et donne le même résultat. Il s'agirait bien de lieux différents car les deux études **Nav13** et **Pat14** sont différentes, mais l'analyse a été faite en même temps pour chaque étude, et dans les mêmes conditions. La discussion du présent chapitre ne s'inscrit pas totalement dans la réflexion sur la reproductibilité. Il est question de répétabilité si une mesure permet d'accéder systématiquement au même résultat quand elle est répétée dans des conditions identiques. La méthode d'analyse a été appliquée conjointement sur les deux études. Mais comme cela concerne deux études distinctes, la discussion de ce chapitre ne s'inscrit pas complètement dans la réflexion de la répétabilité. C'est pourquoi il a été décidé de parler plutôt de « robustesse » des résultats. En statistique, il est question de robustesse pour une étude si une petite modification des données (ou des paramètres du modèle statistique) ne se traduit que par une faible perturbation des résultats. La robustesse semble bien s'appliquer à la discussion de ce chapitre, car les études sont différentes (correspondant à la petite modification des données), et le modèle statistique correspondrait à la méthode d'analyse.

Les études **Nav13** et **Pat14** n'ont pas les mêmes objectifs, et des tests menés avec des musiciens basés sur la perception sont sujets à des variabilités inter-individuelles. Pour la discussion de ce chapitre, au contraire du chapitre 3 où les deux études étaient mélangées, les résultats pour chaque étude sont comparés et les différences observées sont utilisées pour formuler des recommandations pour de prochains tests.

4.2 Comparaison des études

Dans le chapitre 3, les résultats reposaient sur la mise en commun d'énoncés de deux études différentes, menées par Benoît Navarret et Arthur Paté, dans lesquelles les guitaristes s'exprimaient sur des guitares à comparer. Il a été fait l'hypothèse que les deux expériences étaient suffisamment similaires pour pouvoir être mélangées, car elles impliquent des tests perceptifs sur guitares électriques, avec verbalisation libre et jeu libre. Les analyses concernaient des guitaristes professionnels parlant le français. Comme explicité dans le chapitre 2 (section 2.2), les groupes de guitares étudiés dans chaque étude (**Nav13** et **Pat14**) étaient une déclinaison d'un même modèle de guitare avec une modification de confection.

De plus, les études sont considérées comme suffisamment similaires car certains des partici-

pants de l'étude **Nav13** ont également participé à l'étude **Pat14**, comme indiqué dans le tableau 4.2¹. Il s'agit ici de vérifier que les résultats sont similaires entre les études, et d'expliquer les différences dans le cas contraire.

Nav13	Pat14
NavP1	PatP10
NavP2	PatP5
NavP3	PatP7
NavP4	PatP4
NavP5	PatP9
NavP6	
NavP7	
NavP8	PatP6
NavP9	PatP3
NavP10	
NavP11	
NavP12	
NavP13	
	PatP1
	PatP2
	PatP8

TABLEAU 4.2 – Liste des participants de chaque étude et correspondances entre les participants de l'étude **Nav13** revenant dans l'étude **Pat14**. Les participants d'une même ligne sont une même personne ayant participé aux 2 expériences.

4.2.1 Différences générales

Les deux études (**Nav13** et **Pat14**) ont été présentées en section 2.2. Le tableau 4.3 montre les principales différences entre les contributions des deux études au corpus. Par le nombre de participants et la quantité de mots prononcés², une plus grande contribution de l'étude **Nav13** à notre corpus que l'étude **Pat14**³ est observée. Sur l'ensemble du corpus, les énoncés proviennent majoritairement (à plus de 60%) de l'étude **Nav13**. La validité des résultats du chapitre 3 doit être discutée si des différences sont observées d'une étude à l'autre.

Le tableau 4.3 illustre que les résultats de l'analyse sur l'étude **Pat14** s'accordent mieux avec les hypothèses que l'étude **Nav13**, à savoir un « rapport au toucher » plus élevé dans les énoncés sélectionnés, l'« objet qualifié » décrivant plus fréquemment l'interaction musicien-instrument, et l'« implication dans le discours » avec beaucoup d'ESI. La différence la plus saillante au niveau des trois indicateurs est liée au « implication dans le discours », avec pour l'étude **Pat14** un très fort taux d'ESI (écart de 27,8% par rapport à **Nav13**) et une plus faible quantité de DOXA (écart de 7,8% par rapport à **Nav13**). Cette nette différence dans l'« implication dans le

1. Sur les 13 participants à l'étude **Nav13**, 7 participants sont revenus pour l'étude **Pat14**. Il y a donc 6 participants de l'étude **Nav13** qui ne reviennent pas dans la deuxième étude, et 3 nouveaux participants pour l'étude **Pat14**.

2. Seuls les mots employés par les participants sont considérés. Dans ce dénombrement, les questions des chercheurs ont été retirées, tout comme les commentaires ajoutés par les chercheurs dans les transcriptions.

3. Pour la clarté de ce chapitre, ce qui concerne l'étude des éléments de guitare ne sera pas donné, le détail d'une analyse complémentaire est donnée en annexe A.

	Nav13	Pat14	TOTAL
Nombre de participants	13	10	23
Nombre de mots par participant	6086	3988	5174
Nombre d'énoncés sélectionnés*	229	141	370
Occurrences d'éléments de guitare dans le corpus	124	49	173
Énoncés en lien avec le toucher (%)	39,3	44,7	41,4
Énoncés décrivant l'interaction musicien-instrument (%)	14,3	17,6	15,5
Implication dans le discours ESI (%)	42,4	70,2	53,0
Implication dans le discours GDP (%)	58,5	31,2	48,1
Implication dans le discours DOXA (%)	22,7	14,9	19,7

TABLEAU 4.3 – Comparaison générale des contributions des deux études pour le corpus. * Les énoncés sélectionnés contiennent une occurrence des mots des catégories analysées dans le chapitre 3, CONFORT, DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI, TOUCHER, VIBRATION.

discours » entre les études est analysée par catégorie de mots dans la section 4.3.3 et fait l'objet des principales recommandations pour des études futures. Les écarts entre les études sur les deux autres indicateurs sont beaucoup plus faibles, et les résultats plus robustes (au sens où ils ne varient pas d'un sous corpus à l'autre). Le « rapport au toucher » est légèrement plus fréquent dans les énoncés sélectionnés pour l'étude **Pat14** (écart de 5,4%). Il sera vu tout de même en section 4.3.1 que cette différence peut être liée à l'utilisation différente par les participants des mots des catégories. Dans l'étude **Pat14**, l'« objet qualifié » est plus souvent l'interaction (écart de 3,3%) que dans l'étude **Nav13**. Ce résultat pourrait être justifié par un plus grand nombre d'occurrences de CONFORT, qui est la catégorie choisie décrivant le plus souvent l'interaction ⁴.

À ce niveau, des différences entre les résultats clés sont observables pour l'« implication dans le discours ». Une bonne robustesse des résultats est attendue pour les indicateurs « rapport au toucher » et « objet qualifié ». Le détail de l'analyse des indicateurs par catégorie de mots est présenté section 4.2.2.

4.2.2 Différences par catégorie de mot

L'analyse sur chaque étude est détaillée par catégorie. La présente section permet de vérifier si les catégories choisies sont spontanément utilisées par les guitaristes. Quand c'est le cas, leur utilisation sera recommandée pour de prochains tests. Le tableau 4.4 montre que la différence de nombre d'énoncés entre les études est surtout due aux catégories RÉPONSE, RESENTI et VIBRATION. Ces catégories sont très représentées dans l'étude **Nav13** et très peu dans l'étude **Pat14**. Il y a globalement plus d'énoncés dans l'étude **Nav13** (pour RÉPONSE, RESENTI et VIBRATION). Cependant, pour DYNAMIQUE, la tendance est complètement inversée, avec plus d'énoncés dans l'étude **Pat14** que dans l'étude **Nav13**. Il y a autant d'occurrences de CONFORT et TOUCHER dans chaque étude.

Les mots de la catégorie DYNAMIQUE sont peu employés par les guitaristes et seulement 30% des guitaristes emploient les mots de cette catégorie. La différence du nombre d'occurrences peut s'expliquer avec l'observation en détail des occurrences par participant. Dans chaque étude, un des participants est à l'origine à lui seul de la moitié des énoncés ⁵. La catégorie DYNAMIQUE

4. Ce résultat est présenté dans la section 3.4.3 et le tableau 4.1, puis confirmé dans la section 4.3.2.

5. NavP4 emploie 7 fois DYNAMIQUE, et PatP2 l'emploie 13 fois. NavP4 est également présent dans l'étude **Pat14** (PatP4, voir tableau 4.2) et l'emploie 11 fois. Ces 2 personnes (représentant 3 participants) se

	Nav13	Pat14	TOTAL
CONFORT	18	17	35
DYNAMIQUE	11	26	37
RÉPONSE	67	45	112
RESSENTI	39	14	53
TOUCHER	35	34	69
VIBRATION	59	5	64
TOTAL	229	141	370

TABLEAU 4.4 – Nombre d’occurrences des mots des catégories par étude.

n’est pas partagée par l’ensemble des guitaristes comme montré dans le tableau 4.5. La tendance observée dans le chapitre 3 est confirmée, à savoir que l’emploi de DYNAMIQUE est très dépendant des guitaristes. Peu de guitaristes l’emploient spontanément. Il sera donc conseillé aux chercheurs d’éviter l’emploi de DYNAMIQUE avec des musiciens lors de tests, car il est peu probable que les musiciens soient à l’aise avec DYNAMIQUE.

(%)	Nav13	Pat14	TOTAL
CONFORT	53	60	56
DYNAMIQUE	30	30	30
RÉPONSE	76	90	82
RESSENTI	84	70	78
TOUCHER	69	100	82
VIBRATION	69	30	52

TABLEAU 4.5 – Pourcentage de participants utilisant les différentes catégories. Ce pourcentage correspond au nombre de participants utilisant au moins un mot de la catégorie sur le nombre total de participant.

Pour la catégorie VIBRATION, quasiment tous les énoncés sont dans l’étude **Nav13** (voir tableau 4.4). Pour justifier ce grand écart, plusieurs explications sont envisagées. La première est que les chercheurs ont relancé les guitaristes sur le sujet des vibrations par des questions reprenant des éléments du discours des guitaristes⁶. Mais le plus souvent, la catégorie VIBRATION est spontanément utilisée par les guitaristes. La deuxième explication possible est que seulement certains guitaristes sont sensibles à la notion de vibrations au sens large et la verbalisent en employant la catégorie VIBRATION. Le détail des occurrences de VIBRATION par participant permet d’observer que trois participants (NavP10, NavP12 et NavP13) se partagent 70,3% des énoncés de VIBRATION sur le corpus⁷ (voir tableau 4.6).

Pour les autres catégories de mots (CONFORT, RÉPONSE, RESSENTI, TOUCHER), les résultats devraient être similaires entre l’étude **Nav13** et l’étude **Pat14**. Ces résultats sont vérifiés en se répartissent 84% des occurrences de DYNAMIQUE sur le corpus.

6. De fait, en plus des 59 occurrences de VIBRATION par les participants dans l’étude **Nav13**, cette catégorie est utilisée 5 fois par les chercheurs dans le cadre de questions visant à relancer les guitaristes sur un sujet précédemment abordé.

7. Il est également souligné que les énoncés de VIBRATION de ces participants (NavP10, NavP12 et NavP13) présentent un plus faible taux de « rapport au toucher » que ceux des autres participants. De tous les participants qui utilisent la catégorie VIBRATION, seuls NavP6 et NavP8 l’utilisent avec un taux plus faible (0% sur deux occurrences chacun). Pour tous les autres participants utilisant VIBRATION, le taux de « rapport au toucher » est de 100%. Aucun de ces trois participants n’est présent dans l’étude **Pat14**.

Participant	Occurrences	Rapport au toucher (%)
NavP1	3	100
NavP4*	2	100
NavP5	1	100
NavP6	2	0
NavP7	4	100
NavP8	2	0
NavP10	26	53,8
NavP12	10	30,0
NavP13	9	55,6
PatP2	3	100
PatP4*	1	100
PatP8	1	100
TOTAL	64	58

TABLEAU 4.6 – Nombre d’occurrences et « rapport au toucher » de la catégorie VIBRATION par les participants employant cette catégorie dans le corpus. Par *, il est rappelé que NavP4 et PatP4 sont la même personne. Aucun autre guitariste présent pour les deux études n’utilise la catégorie VIBRATION dans les deux entretiens. En vert, les 3 participants utilisant le plus VIBRATION dans l’ensemble du corpus.

focalisant sur les participants communs aux deux études (voir tableau 4.2). Il a été noté assez peu de variations du nombre d’occurrences des catégories chez les participants revenant pour les deux tests, sauf pour RÉPONSE (NavP2-PatP5) et pour TOUCHER (NavP9-PatP3)⁸.

Les tableaux 4.4 et 4.5 montrent que la catégorie CONFORT est présente dans les études avec un pourcentage de participants relativement constant. C’est une catégorie régulièrement employée mais peu ré-utilisée (moins de 10 occurrences par participant). Cette catégorie peut être librement utilisée par les guitaristes, ce qui est très intéressant car il a été montré section 3.4.1 que c’est une catégorie importante à étudier en lien avec le sens du toucher. Il n’y a donc pas de restriction à l’emploi des mots de CONFORT pour des expériences.

Tous les participants de l’étude **Pat14** utilisent la catégorie TOUCHER, contrairement à l’étude **Nav13**. Cela peut s’expliquer par une question systématiquement posée par les chercheurs sur le toucher. En effet, une hypothèse de l’étude **Pat14** était que l’ébène et le palissandre (matériau de la touche) pouvaient être distingués par le toucher. On trouve de plus nombreuses occurrences de TOUCHER qui sont prononcées à la suite d’une question des chercheurs utilisant ce terme⁹. Certains guitaristes n’auraient même pas employé de mots de TOUCHER si les chercheurs ne les avaient pas eux-mêmes employés. TOUCHER n’est donc pas spontanément utilisé par les guitaristes. C’est pourquoi il n’est pas recommandé d’imposer l’usage de TOUCHER aux guitaristes, ces derniers n’étant pas habitué à son emploi.

La forte présence de VIBRATION dans l’étude **Nav13** et sa faible présence dans l’étude **Pat14** permet de remarquer que la modification de la jonction corps-manche (**Nav13**) peut être source d’importantes différences dans la perception des vibrations, alors que ce n’est pas le cas pour la modification du matériau de touche (**Pat14**). C’est une hypothèse forte qui devrait être vérifiée,

8. Le détail des occurrences par guitariste et par catégorie est disponible en annexe B, dans le tableau B.1

9. Le détail sur les occurrences de TOUCHER est présenté par participant dans l’annexe C, dans le tableau C.1. Il est précisé que TOUCHER contient les occurrences du nom *toucher* et du verbe *toucher*, mais pas les occurrences du nom *touche*, faisant référence à la touche de la guitare.

notamment car d'autres facteurs sont variables entre les deux études (les participants, les instruments et leur fabrication, les hypothèses des chercheurs, etc.). Ayant été surpris par la faible présence de VIBRATION dans l'étude **Pat14**, les transcriptions d'une expérience avec modification des vibrations ont été brièvement étudiées. L'expérience en question est présentée chapitre 7, avec un protocole similaire (jeu libre et verbalisation libre), mais dans un contexte très différent des études **Nav13** et **Pat14** (une seule guitare, dans une démarche d'augmentation sonore, vibrotactile et visuelle). Ces arguments permettent de comparer l'utilisation « spontanée » de VIBRATION (nombre d'occurrences) entre les études **Nav13** et **Pat14**, et l'expérience du chapitre 7. Pour seulement 5 participants à l'expérience, 204 occurrences de VIBRATION ont été répertoriées, avec plus de 25 occurrences par participant. Les guitaristes peuvent spontanément utiliser VIBRATION¹⁰. Ce résultat invite à conseiller l'utilisation de VIBRATION pour de prochains tests.

Avec l'analyse des occurrences des catégories, il apparaît que l'utilisation de certaines catégories est très dépendante des locuteurs, particulièrement pour DYNAMIQUE. Il a été observé que les guitaristes interrogés n'utilisent pas spontanément TOUCHER. La catégorie VIBRATION est employée très différemment entre les études, mais peut spontanément être employée par les guitaristes. Sur l'ensemble du corpus, la catégorie CONFORT est spontanément utilisée par la majorité des guitaristes, mais avec très peu d'occurrences. Cette analyse est complétée par le détail sur les trois indicateurs observés (voir section 4.3) afin de confirmer les résultats du chapitre 3.

4.3 Différences sur les résultats de l'analyse et recommandations

L'ensemble des résultats est repris par indicateur, et ces résultats sont différenciés par étude.

4.3.1 Rapport au toucher

Sur le « rapport au toucher », le tableau 4.7 montre que la répartition des possibilités de l'indicateur (Oui, Non, Non défini, comme vu en section 2.4 p. 26 et 3.2.4 p. 38) est similaire d'une étude à l'autre. Les résultats du chapitre 3 devraient être confirmés par cette section : par exemple, avec le détail par catégorie, il doit être confirmé que CONFORT, TOUCHER et VIBRATION sont liées au sens du toucher, et que RÉPONSE et RESENTI ne sont pas liées au sens du toucher.

(%)	Nav13	Pat14	TOTAL
Oui	39,3	44,7	41,4
Non	57,2	53,2	55,7
Non défini	3,5	2,1	3,0

TABLEAU 4.7 – Pourcentage d'énoncés de chaque étude se rapportant ou non au sens du toucher.

Le tableau 4.8 détaille le rapport au sens du toucher pour chacune des catégories et par étude. Il est déjà confirmé que la catégorie CONFORT est associée au sens du toucher (plus de 70% dans chaque étude). Pour aller plus loin, les extraits des seuls énoncés de CONFORT qui ne sont pas en lien avec le sens du toucher sont présentés. Ces extraits (contexte morpho-syntaxique) permettent de montrer qu'il faut rester vigilant pour l'analyse de CONFORT et le « rapport au toucher » :

- *être à l'aise en terme de confort* (NavP2) (classé non défini),

10. Le mot « vibration » n'a pas été introduit par les chercheurs avant son emploi par les guitaristes.

- *confortable à l'oreille* (NavP2), directement associé à l'expérience sonore,
- *un sentiment de confort* (NavP2) lié au côté moelleux du son,
- *confortable* (NavP2) parce que la guitare tient l'accord,
- *situation de confort* (NavP6) qui n'a pas lieu par l'absence de tonalité¹¹ et vibrato flottant¹²,
- *delay d'confort* (PatP10, 2 occurrences), pour le *sustain*,

Le tableau 4.8 confirme la forte variabilité de DYNAMIQUE pour le « rapport au toucher ». Le « rapport au toucher » est moins fréquent pour les énoncés de la catégorie RÉPONSE, qui n'a que peu de lien avec le sens du toucher. Dans les rares cas du corpus où RÉPONSE est associée au sens du toucher (9 énoncés), ce n'est pas la mention de RÉPONSE qui est déterminante. En effet, ces énoncés contiennent des éléments du groupe *Manche* (tel que défini dans le tableau 3.4), les catégories CONFORT et TOUCHER ou la mention de partie de corps¹³ (en l'occurrence de la main). L'observation de RÉPONSE n'est donc pas nécessaire pour l'étude du sens du toucher, car le lien avec le sens du toucher peut être observé à partir d'autres mots. Comme RÉPONSE, la catégorie RESENTI n'est pas associée au sens du toucher. Pour les quelques énoncés de RESENTI en lien avec le sens du toucher (13 énoncés), ce sont des éléments du groupe *Corde* (voir tableau 3.4) et les catégories TOUCHER et VIBRATION qui permettent d'identifier le lien avec le sens du toucher.

(%)	Nav13	Pat14	TOTAL
CONFORT	72	88	80
DYNAMIQUE	36	58	51
RÉPONSE	4	13	8
RESENTI	26	21	25
TOUCHER	80	56	68
VIBRATION	54	100	58
TOTAL	39,3	41,4	44,7

TABLEAU 4.8 – Pourcentage d'énoncés présentant un rapport avec le sens du toucher par catégorie et par étude.

Les énoncés de TOUCHER ne sont pas systématiquement en rapport avec le sens du toucher. Ce résultat est justifié par les nombreuses occurrences du verbe « toucher » de la catégorie TOUCHER dans chaque étude, très rarement en rapport avec le sens du toucher. Sur les rares énoncés de TOUCHER avec le verbe « toucher » et un lien avec le sens du toucher (7 énoncés), soit des éléments du groupe *Manche*¹⁴ sont présents, soit la mention des doigts dans le rapport au manche ou la sensation de texture est présente. En raison de sa polysémie, le verbe « toucher » n'est pas l'indice le plus pertinent pour repérer la verbalisation d'une expérience tactile.

Même si elles sont peu nombreuses, toutes les occurrences de VIBRATION dans l'étude **Pat14** sont liées au sens du toucher. Pour expliquer la différence entre les études pour VIBRATION, les thématiques principales de l'emploi de VIBRATION pour les 3 participants utilisant le plus cette catégorie ont été mises en évidence :

11. La tonalité, sur une guitare électrique, est un bouton permettant d'atténuer les fréquences aiguës. Certains guitaristes s'en servent pour obtenir une sonorité plus douce.

12. Dans ce cas, le « vibrato » est un accessoire fixé au niveau du chevalet d'une guitare électrique. L'objectif est de modifier la hauteur du son grâce à un levier modifiant la tension des cordes.

13. Il a été vu dans le chapitre 3 que les mentions de parties du corps pouvaient être révélatrices du lien avec le sens du toucher.

14. *Frettes et manche*.

- NavP10 fait une description de la vibration de la corde, qui n'est pas en lien avec le sens du toucher.
- NavP12 s'intéresse au fait de *vibrer une note*, qui n'est pas en lien avec la perception tactile, mais avec le geste et l'interprétation.
- NavP13 parle du vibrato (élément de lutherie) et de la vibration de la corde, qui ne sont pas en lien avec le sens du toucher.

Recommandations pour le rapport au toucher

Dans ce paragraphe, les résultats des catégories pour le « rapport au toucher » dans le chapitre 3 ont été confirmés. La catégorie CONFORT est bien associée au sens du toucher, contrairement à RÉPONSE et RESENTI. La catégorie DYNAMIQUE est particulièrement instable dans son « rapport au toucher ». Pour la catégorie TOUCHER, il n'est pas nécessaire de s'intéresser à la forme du verbe « toucher ». Il est donc très important d'observer la nature du mot dans la catégorie TOUCHER. La catégorie VIBRATION est majoritairement associée au sens du toucher. De plus il est possible de conclure rapidement si l'énoncé est en lien avec le sens du toucher en observant le contexte morpho-syntaxique. S'il est question de la corde qui vibre ou le vibrato au niveau du contexte morpho-syntaxique, l'énoncé a très peu de chance de concerner le sens du toucher.

4.3.2 Objet qualifié

Les catégories de mots ont été spécifiquement choisies par leur supposée description de l'interaction musicien-instrument (voir p. 10 et tableau 1.2 p. 11 pour l'explication et la liste des mots identifiés, puis section 3.2.2 pour le détail du choix des mots). L'analyse de l'« objet qualifié » permet de le vérifier. Cette analyse est concentrée autour du contexte morpho-syntaxique, et il a été montré dans le chapitre 3 avec la figure 3.3 et le tableau 3.8 que seul CONFORT était un descripteur de l'interaction musicien-instrument au niveau du contexte morpho-syntaxique¹⁵. L'analyse du tableau 4.9 indique que dans l'étude **Nav13** les guitaristes ont décrit le musicien¹⁶ (catégorie majoritaire, identifiée à partir de l'étude du contexte morpho-syntaxique), et que dans l'étude **Pat14** les guitaristes ont parlé de la guitare. On trouve une proportion légèrement plus grande d'énoncés décrivant l'interaction dans l'étude **Pat14**.

La figure 4.1 permet de confirmer que CONFORT est la catégorie décrivant le plus l'interaction entre le musicien et l'instrument (dans l'étude **Nav13** surtout). Pour DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI et VIBRATION, l'« objet qualifié » le plus représenté est le même pour chaque étude, comme présenté dans le tableau 4.10. L'importance surprenante de l'objet « G. son » pour TOUCHER dans l'étude **Pat14** vient de l'emploi du verbe « toucher » pour parler des réglages de l'amplificateur et du son qui en résulte.

Globalement, les résultats sur l'« objet qualifié » sont les mêmes d'une étude à l'autre. S'appuyant sur l'argument du contexte morpho-syntaxique, les conclusions du chapitre 3 sur l'« objet qualifié » sont confirmées par l'analyse séparée des deux études du corpus. Il est confirmé dans chaque étude que la catégorie RESENTI décrit le musicien, et que CONFORT permet le plus directement de parler de l'interaction musicien-instrument. Il est montré dans le paragraphe suivant qu'il est pertinent de parler d'interaction pour parler du sens du toucher.

15. Avec l'agrandissement du contexte à l'énoncé complet, l'interaction est présente dans 58% des énoncés, devenant majoritaire pour chacune des 6 catégories de mots.

16. Les participants de **Nav13** ont majoritairement décrit le musicien, mais ils ont quand même largement parlé de la guitare que ce soit de « G. son » ou de « G.objet »

	Nav13	Pat14	TOTAL
G. général	10,3	24,3	15,6
G. objet	24,6	21,3	23,3
G. son	24,1	23,5	23,9
Interaction	14,3	17,6	15,5
Musicien	26,8	13,2	21,7

TABLEAU 4.9 – Pourcentage d'énoncés par « objet qualifié » dans chaque étude du corpus. G. en général correspond à une description globale de la guitare. G. objet correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. G. son correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son. La couleur verte met en évidence l'« objet qualifié » le plus décrit dans chaque étude.

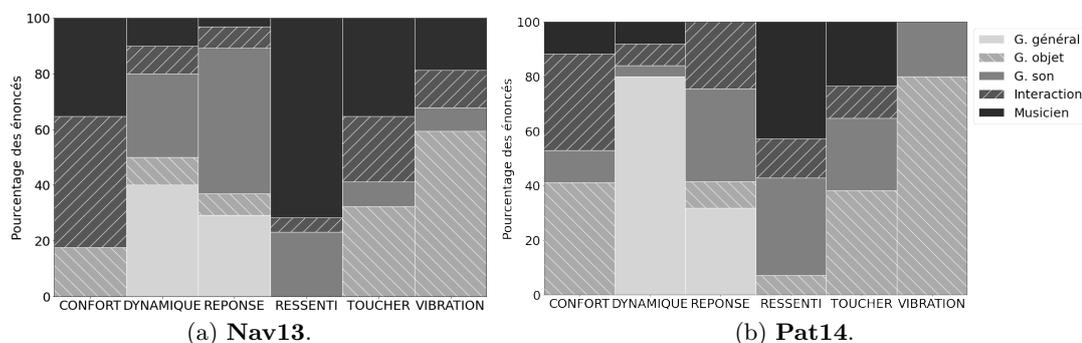


FIGURE 4.1 – Objet qualifié par étude et par catégorie.

	Nav13	Pat14
CONFORT	Interaction	G. objet
DYNAMIQUE	G. général	G. général
RÉPONSE	G. son	G. son
RESSENTI	Musicien	Musicien
TOUCHER	Musicien	G. objet
VIBRATION	G. objet	G. objet

TABLEAU 4.10 – Objet qualifié le plus représenté par catégorie dans chaque étude. G. en général correspond à une description globale de la guitare. G. objet correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. G. son correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son.

4.3.2.1 Recommandation pour l'objet qualifié

Dès le début de l'analyse, il a été supposé que la description de l'interaction musicien-instrument permettait aux guitaristes de parler du sens du toucher. Le « rapport au toucher » a été analysé sans utiliser l'« objet qualifié » comme argument. Le tableau 4.11 montre que de parler de l'interaction musicien-instrument permet effectivement aux guitaristes de parler du sens du toucher. De parler directement de la guitare en tant qu'objet le permet également. Avec ce résultat, il est recommandé aux chercheurs :

- soit de regarder l'« objet qualifié » dans l'analyse pour identifier si les guitaristes parlent du sens du toucher ;
- soit de relancer les guitaristes au sujet de la guitare ou de l'interaction entre le guitariste et son instrument.

	Nav13	Pat14	TOTAL
<i>G. objet</i>	58,2	96,6	71,4
<i>G. son</i>	1,9	3,1	2,3
<i>G. général</i>	21,7	30,3	26,8
<i>Interaction</i>	78,1	66,7	73,2
<i>Musicien</i>	41,7	38,9	41

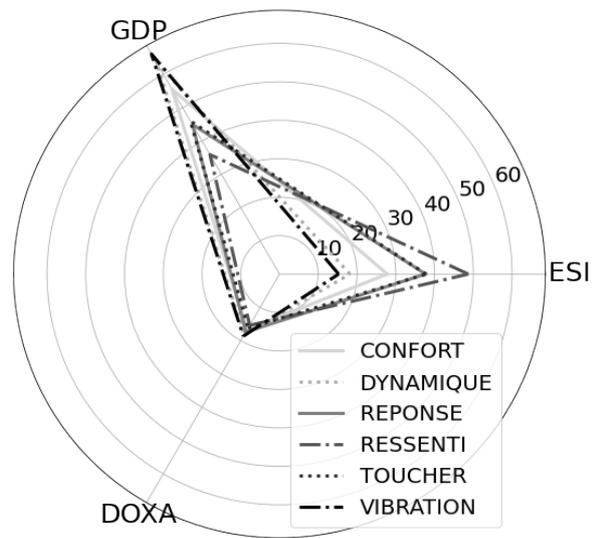
TABLEAU 4.11 – Pourcentage d'énoncés se rapportant au sens du toucher par « objet qualifié » et par étude. 58,2% des énoncés décrivant la guitare en tant qu'objet ont un rapport avéré avec le sens du toucher. Parler de la guitare en tant qu'objet ou de l'interaction sont un bon moyen de parler du sens du toucher. *G. en général* correspond à une description globale de la guitare. *G. objet* correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. *G. son* correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son.

4.3.3 Implication dans le discours

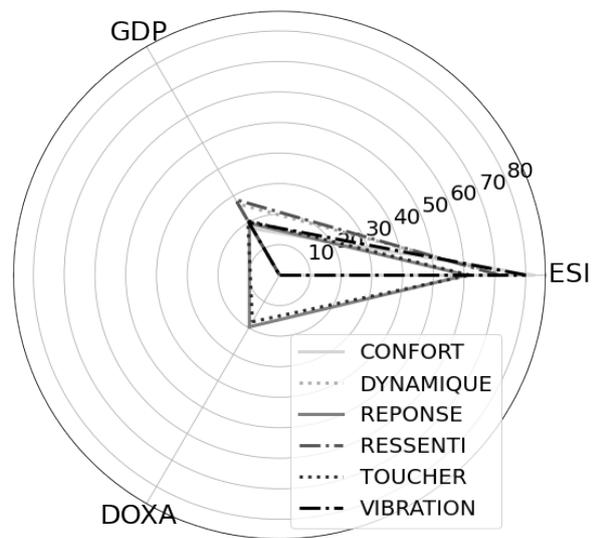
Dans le chapitre 3, il a été montré que la méthode de jeu libre et la méthode de verbalisation libre permettent aux musiciens de parler de leur expérience personnelle. Il a été montré (voir figure 3.4) que toutes les catégories favorisaient l'ESI, à l'exception de VIBRATION qui favorise la GDP. VIBRATION et RÉPONSE sont les catégories présentant le plus de DOXA. Il est ici vérifié si ces résultats suivent bien les mêmes tendances entre les deux études. Le tableau 4.12 et la figure 4.2 mettent en évidence le fait que l'étude **Nav13** favorise globalement la GDP alors que l'étude **Pat14** favorise nettement l'ESI (allant de 60% à 85% sur l'ensemble des catégories).

	Nav13	Pat14	TOTAL
ESI	42,4	70,2	53,0
GDP	58,5	31,2	48,1
DOXA	22,7	14,9	19,7

TABLEAU 4.12 – Pourcentage d'énoncés par « implication dans le discours » dans chaque étude du corpus. La couleur verte permet d'identifier l'étude dans laquelle la proportion de chaque « implication dans le discours » est majoritaire.



(a) Nav13.



(b) Pat14.

FIGURE 4.2 – Implication dans le discours pour chaque étude. L'axe radial définit le pourcentage d'énoncés en fonction de chaque possibilité. ESI correspond à de l'expérience sensible immédiate, GDP à de la généralisation des pratiques et DOXA correspond à de la doxa.

Les catégories peuvent être distinguées dans la répartition entre GDP et ESI dans l'étude **Nav13** (les différences sont moins évidentes pour l'étude **Pat14**). Dans l'étude **Pat14**, plus de 60% des énoncés de chaque catégorie font appel à l'ESI. Il n'y a de la DOXA que pour les catégories RÉPONSE et TOUCHER dans cette étude. Dans l'étude **Pat14**, les guitaristes se sont exprimés sur les guitares du test plus facilement, alors qu'ils ont plutôt fait référence à leurs expériences passées dans l'étude **Nav13** (58,5% de GDP dans les énoncés). Plusieurs causes possibles ont été étudiées dans la comparaison des méthodes expérimentales de l'étude **Nav13** et l'étude **Pat14**.

En premier lieu la différence envisagée est celle due aux guitares. Par exemple, il est possible que les guitares de l'étude **Nav13** étaient très différentes des guitares habituelles des guitaristes et ceux-ci ont eu tendance à parler moins directement d'elles, mais à se référer à des choses plus générales ou habituelles. En regardant les énoncés classés GDP dans l'étude **Nav13**, seulement quelques comparaisons entre les guitares du test et leurs guitares habituelles sont présentes. Les guitaristes s'expliquent plutôt sur les mots qu'ils ont préalablement employés. Cette hypothèse est donc écartée, la différence n'est pas due aux guitares.

Le ressenti, c'est vraiment à un moment pour moi, le vrai test c'est quand tu te trouves en situation à la jouer debout sur scène et c'est là que je me rends compte si cela me convient ou pas. (NavP5)

Je pense que le côté moelleux, cela va être quelque chose qui ne va pas m'agresser... un sentiment de confort un petit peu, de douceur. (NavP2)

À la lecture de ces exemples, les différences ont ensuite été cherchées au niveau des guitaristes. En faisant l'hypothèse que les guitaristes s'impliquent autant dans le discours dans les différentes conditions expérimentales (qui conservent à la fois le jeu libre et l'expression libre sur des guitares électriques), des résultats similaires sont attendus pour l'« implication dans le discours » entre les deux passages des guitaristes de l'étude **Nav13** qui reviennent dans l'étude **Pat14**. Ça ne semble pas être le cas, car le tableau 4.13 montre que tous les guitaristes (sauf NavP8-PatP6 qui revient avec plus de 50% de DOXA) qui reviennent ont un plus fort taux d'énoncés avec de l'ESI, notamment les participants (NavP1-PatP10, NavP2-PatP5, NavP4-PatP4 et NavP5-PatP9) qui employaient majoritairement de la GDP dans l'étude **Nav13**. De plus, la tendance de NavP9-PatP3 à utiliser majoritairement de l'ESI est accentuée entre l'étude **Nav13** et l'étude **Pat14**, avec encore plus d'ESI (de 80% à 95,5%). Cette hypothèse est donc écartée, la différence n'est pas due aux guitaristes.

La dernière interprétation envisagée est que les différences dans l'« implication dans le discours » seraient liées aux chercheurs et à la démarche expérimentale. Il s'avère que les deux chercheurs Navarret et Paté ont mené les expériences ensemble. S'agissant des mêmes chercheurs sur les deux études, est-ce qu'ils auraient affiné leur approche, permettant davantage d'orienter les réponses vers de l'ESI ? Pour l'étude **Nav13**, il s'agissait de la première expérience de ce type menée par les deux chercheurs. Pour l'étude **Pat14**, il pourrait y avoir eu une consolidation suite à cette première expérience, et une certaine prise de recul. Il peut être supposé que ça a pu leur éviter d'orienter les guitaristes vers de la GDP lors des relances. À titre d'exemple, voici quelques questions des chercheurs de l'étude **Nav13** :

Pour toi, quelle est la différence entre « juste » et « tempéré » ? (NavP4)

Et un son « rond », c'est quoi ? (NavP3)

Tu avais parlé d'un son « mort », « chétif » ? est-ce que tu pourrais le rapprocher d'autres termes ? (NavP7)

Du coup, vous entendez quoi plus précisément par « acide », « rond », « velouté » ? (NavP9)

Nav13	ESI	GDP	DOXA	Pat14	ESI	GDP	DOXA
NavP1	41,7	58,3	8,3	PatP10	60,0	30,0	10,0
NavP2	22,2	72,2	5,6	PatP5	55,6	22,2	22,2
NavP3	—	—	—	PatP7	0,0	100,0	0,0
NavP4	8,3	83,3	8,3	PatP4	55,6	50,0	0,0
NavP5	41,7	50,0	8,3	PatP9	66,7	33,3	0,0
NavP6	42,9	28,6	28,6				
NavP7	59,3	25,9	18,5				
NavP8	38,9	55,6	5,6	PatP6	27,8	16,7	55,6
NavP9	80,0	20,0	0,0	PatP3	95,5	4,5	0,0
NavP10	17,6	54,9	27,5				
NavP11	18,8	68,8	12,5				
NavP12	21,9	59,4	25,0				
NavP13	57,9	21,1	21,1				
				PatP1	50,0	43,8	6,3
				PatP2	91,3	8,7	0,0
				PatP8	94,1	0,0	5,9

TABLEAU 4.13 – Pourcentage du nombre d'énoncé par participant selon le type d'expérimentation. Les participants d'une même ligne sont la même personne, par exemple NavP1 et PatP10, ou NavP9 et PatP3. Le pourcentage d'ESI est plus élevé pour **Pat14**, sauf pour le participant NavP8-NavP6, dont le pourcentage est en rouge dans **Pat14**. Les traits de NavP3 rappellent qu'il n'a utilisé aucun mot des catégories.

Les chercheurs s'intéressent davantage au sens des mots utilisés par les musiciens que par leur ressenti des guitares du test, avec des questions plus indirectement liées aux mots employés. Ce qui est moins le cas pour **Pat14** :

Et en égalisation, elle a quoi de spécifique, celle-là ? (PatP1)

Alors j'ai encore quelques questions, tu as parlé de, en prenant la guitare 3, ta préférée, je crois, tu as dit que le sustain était très correct. . . (PatP3)

Et un aspect dont j'aimerais bien parler, c'est la clarté. Est-ce que tu peux dire quelque chose de la clarté d'une des guitares ? (PatP4)

Les chercheurs, lors de l'étude **Pat14**, recentrent le discours sur les guitares du test. l'« implication dans le discours » des musiciens est donc dépendant des questions des chercheurs.

De fortes variations ont été identifiées dans l'« implication dans le discours », entre ESI et GDP. Il a été montré dans ce paragraphe toute l'importance de la méthode expérimentale dans l'« implication dans le discours ».

4.3.3.1 Recommandations pour l'implication dans le discours

Il y a peu de DOXA dans les deux études. Les musiciens ont donc pu parler de leur propre expérience. Ce résultat confirme que ces études en situation de jeu libre et verbalisation libre, ainsi que les consignes données aux guitaristes, favorisent un discours personnel des participants. Les recommandations concernent les fortes variations dans l'« implication dans le discours » pour les participants, entre ESI et GDP¹⁷. Il a été montré dans ce paragraphe toute l'importance de la

17. Le taux de DOXA est néanmoins sensiblement le même entre les études, en étant faible. Ce résultat confirme que ces études en situation de jeu libre et verbalisation libre favorisent un discours personnel des participants.

méthode expérimentale dans l'« implication dans le discours ». Pour obtenir de l'ESI de la part des musiciens, il est recommandé de parler de l'instrument testé lors des relances, et pas des mots employés, dont la sémantique est construite par les musiciens en référence à leurs expériences passées.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, la méthode d'analyse présentée dans le chapitre 2 est discutée selon la robustesse des résultats obtenus dans le chapitre 3. Les 3 indicateurs (« rapport au toucher », « objet qualifié », « implication dans le discours ») précédemment étudiés ont été repris en distinguant les résultats présentés sur les deux études du corpus (l'étude **Nav13** et l'étude **Pat14**). De cette analyse, des recommandations visant à renforcer la méthodologie d'expérience ont été formulées, dans le cadre de la perception située avec verbalisation libre.

4.4.1 Rapport au toucher

Les résultats du chapitre 3 ont globalement été confirmés dans chaque étude. Il a été confirmé que CONFORT est une catégorie permettant de parler du sens du toucher, ainsi que TOUCHER et VIBRATION. Il n'y a pas de restriction à l'emploi des mots de CONFORT pour des expériences. De même, l'utilisation de VIBRATION est conseillée pour de prochains tests, car spontanément employée par les guitaristes. RÉPONSE et RESENTI ne permettent pas de parler du toucher. Il a été montré que les résultats pour DYNAMIQUE sont très variables. Il est conseillé aux chercheurs d'éviter l'emploi de DYNAMIQUE avec des musiciens lors de tests, car il est peu probable que les musiciens soient à l'aise avec DYNAMIQUE. Il a été rappelé que la catégorie TOUCHER choisie est très dépendante de la nature des mots dans les énoncés (verbe ou nom). De plus, les guitaristes n'étant pas habitués à son emploi, il n'est pas recommandé de leur imposer l'usage de TOUCHER. La méthode développée ici doit permettre d'analyser d'autres expériences afin que les chercheurs vérifient dans quelles conditions les musiciens interrogés parlent du sens du toucher, à partir de CONFORT, TOUCHER et VIBRATION. De plus, la méthode développée permet à d'autres chercheurs d'étudier de nouvelles catégories de mots qui seraient liées au sens du toucher. Une méthode similaire pourrait être développée pour l'étude des autres modalités sensorielles dans le discours expert ¹⁸.

4.4.2 Objet qualifié

Globalement, les résultats sur l'« objet qualifié » sont les mêmes d'une étude à l'autre. Dans le corpus, l'interaction musicien-instrument a été identifiée. CONFORT est la catégorie permettant le plus facilement de parler d'interaction sur l'ensemble du corpus ¹⁹. RESENTI permet de parler du musicien. Les catégories DYNAMIQUE, RÉPONSE et VIBRATION permettent de parler de la guitare. Les résultats pour TOUCHER restent très dépendants de la nature du mot utilisé. Il est recommandé de s'intéresser à la description de l'interaction musicien-instrument et de la guitare en tant qu'objet pour un discours sur le toucher.

18. Pour rappel, les guitaristes interrogés lors des études **Nav13** et **Pat14** étaient des guitaristes professionnels.

19. En se restreignant au contexte morpho-syntaxique, il a été montré que seul CONFORT permet de parler de l'interaction musicien-instrument. Ceci étant, en étudiant les énoncés des catégories en délimitant le champ d'observation à l'énoncé complet, il a été vu en section 2.4 que chaque catégorie permet de parler de l'interaction.

4.4.3 Implication dans le discours

C'est pour cet indicateur que les études sont le plus différentes. Les conditions expérimentales, tout comme la manière qu'ont les expérimentateurs de formuler les questions et d'orienter l'objet de la discussion, influent beaucoup sur l'« implication dans le discours ». Il est recommandé aux chercheurs de questionner les participants directement sur ce qu'ils sont en train de tester pendant qu'ils jouent et sur ce qu'ils ressentent personnellement. Pour le détail des catégories, RESENTI est la plus à-même de faire s'exprimer les guitaristes sur leurs sensations avec l'instrument qu'ils ont pendant l'expérience. La démarche expérimentale de jeu libre et verbalisation libre permet en général un faible taux de DOXA.

Conclusion et perspectives de l'analyse linguistique

L'ensemble du travail linguistique effectué a démontré que les guitaristes sont capables de s'exprimer spontanément sur le sens du toucher en situation de jeu. J'ai identifié six catégories de mots pouvant se rapporter au sens du toucher, et proposé des recommandations pour la démarche expérimentale.

Hypothèses

J'avais fait plusieurs hypothèses :

- a. les guitaristes parlent du sens du toucher ;
- b. le vocabulaire de l'interaction musicien-instrument est adapté pour parler du toucher ;
- c. la situation de jeu libre avec verbalisation libre permet aux guitaristes de s'exprimer sur leur ressenti, ainsi que de parler du toucher (cette hypothèse est implicitement justifiée par la démarche de perception située et le fait que le toucher est un sens proximal) ;
- d. les six catégories CONFORT, DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI, TOUCHER et VIBRATION permettent de parler du sens du toucher et décrivent l'interaction musicien-instrument.

Indicateurs

Pour vérifier ces hypothèses, trois indicateurs ont été analysés :

- le « rapport au toucher » (hypothèses a, b, c et d) ;
- l'« objet qualifié » (hypothèses b et d) ;
- l'« implication dans le discours » (hypothèse c).

Caractéristiques linguistiques

Des caractéristiques linguistiques utiles ont été mises en évidence pour chacun des indicateurs. Avec le « rapport au toucher », les mentions d'éléments de guitare ou de parties du corps sont utiles pour affirmer que le musicien parlait bien du toucher dans l'énoncé. L'« objet qualifié » a été analysé au niveau du contexte morpho-syntaxique, et déterminé à l'aide de la mention d'éléments de guitare, de parties du corps ou de marques de la personne. L'analyse du « implication dans le discours » a été guidée par les marques de la personne, la présence de modalité ou de méta-discours.

Rapport au toucher

Pour parler du sens du toucher, il faut favoriser l'utilisation de CONFORT, TOUCHER et VIBRATION. Il est recommandé de ne pas utiliser RÉPONSE et RESENTI, qui ne permettent pas de parler du toucher, et d'éviter également DYNAMIQUE dans ce but.

Objet qualifié

À l'échelle d'un énoncé, les 6 catégories permettent de décrire à la fois le musicien et l'instrument. Au niveau du contexte morpho-syntaxique, CONFORT permet de parler à la fois du musicien et de la guitare, et RESENTI permet de parler du musicien. Les autres catégories décrivent la guitare. CONFORT est donc particulièrement recommandé pour la description de l'interaction musicien-instrument, mais il n'y a pas de contre-indication à l'utilisation des autres catégories.

Implication dans le discours

L'« implication dans le discours » est dépendante des questions des expérimentateurs. Les conditions de jeu libre et de verbalisation libre permettent d'éviter la DOXA. Il est du rôle des expérimentateurs de relancer les musiciens sur l'instrument qu'ils sont en train de jouer. Cela a pour objectif de favoriser l'ESI (expérience sensible immédiate) dans le discours des musiciens, de s'assurer que les verbalisations à analyser portent bien sur l'expérience réalisée et de limiter le discours associé à une expérience passée.

Lexique vibrotactile

Il a été fait le choix de limiter l'étude à six catégories de mots. La liste pourrait en être étendue. J'ai identifié, à partir de la littérature présentée en section 1.1.4.2, d'autres mots qui pourraient être étudiés : « sensation », « interaction », « contact », « jouabilité », « ergonomie », « agréable », « vivant » font partie des exemples possibles (voir tableau 1.2 p. 11 pour une liste étendue des possibilités). De tels travaux viendraient compléter le lexique disponible en vue de l'étude du sens du toucher.

Études complémentaires

L'analyse présentée dans cette première partie s'est basée sur des expériences menées par Navarret et Paté avec des guitaristes électriques. L'objectif principal de ces expériences était de comparer des guitares électriques selon des modifications d'éléments de lutherie. Il est possible d'approfondir ces recherches :

- sur d'autres instruments, et d'étudier les similitudes dans l'expression du toucher : peut-on généraliser les résultats des guitaristes électriques aux autres instrumentistes ?
- il aurait été possible de décider de s'appuyer sur les tests de guitare issus des magazines spécialisés (tests effectués par des professionnels), les forums de guitaristes (avec des réflexions par des non-professionnels), et ainsi de faire le relevé d'énoncés sur le sens du toucher. Est-ce que le niveau d'expertise joue un rôle important dans le choix du vocabulaire et dans le lien entre le discours et le sens du toucher ?
- il sera intéressant d'étudier ces mots dans des expériences spécifiques sur le sens du toucher. Conserveraient-ils leurs propriétés de rapport au toucher ? Peut-on préciser le fait qu'ils permettent effectivement aux expérimentateurs d'orienter le discours des musiciens vers le sens du toucher ?

Nouvelles expériences sur le sens du toucher

Avec les résultats présentés dans l'analyse, il est possible pour tout expérimentateur d'étudier le sens du toucher dans des verbalisations. Nous pouvons déjà conseiller l'utilisation de CONFORT, TOUCHER et VIBRATION pour orienter le discours des guitaristes vers le sens du toucher. Sinon, pour ne pas introduire de nouveaux mots, il est possible d'orienter les musiciens vers leur interaction avec l'instrument ou vers l'instrument directement. Avec de nouvelles expériences, nous pourrions interroger les conditions dans lesquelles les guitaristes parlent du sens du toucher. Par exemple, il pourrait être envisagé de comparer des guitares électriques selon leur retour vibrotactile et d'inviter les guitaristes à s'exprimer avec les catégories CONFORT et VIBRATION. Autre exemple (qui peut correspondre à l'expérience menée dans le chapitre 7), il est possible d'avoir un instrument sur lequel le retour vibrotactile est modifié et d'interroger des guitaristes sur leur ressenti. Avec les données issues des verbalisations, la méthode développée et présentée dans cette partie pourrait être appliquée. Un lien pourrait alors être déterminé entre le ressenti des guitaristes et le type de modification du retour vibrotactile.

Deuxième partie

Modification et perception du
retour vibrotactile de la guitare
électrique

Avant-propos

La première partie de ce travail a analysé le discours des guitaristes électriques afin d’identifier si ces musiciens étaient amenés à parler spontanément de vibrations et du sens du toucher, et avec quel vocabulaire spécifique. Les occurrences des catégories et des mots décrivant l’interaction musicien-instrument ont été analysées, et leur emploi par les guitaristes en train de tester des guitares a été vérifié. Des possibilités d’expression du sens du toucher ont été déterminées.

L’objectif de la deuxième partie est d’effectuer un travail expérimental sur la perception du retour vibratoire dans le cas de la guitare électrique *solid body*. Il s’agit également d’aller jusqu’à la modification du retour vibratoire en situation de jeu. Il est question de comprendre le lien entre le retour vibrotactile transmis par l’instrument et la perception des vibrations par les musiciens.

Le retour vibrotactile influe sur la perception du musicien. Il a été montré dans différentes études qu’il existait un lien entre les variations du retour vibrotactile et la perception sonore. C’est le cas pour le violon, pour lequel Wollman *et al.* [Wol+14] ont montré que le retour vibrotactile était important dans le jugement de la qualité du violon (pour les aspects sonore et de jouabilité). Pour le piano, ce sont Flückiger *et al.* [FGT18] qui ont amplifié le retour vibrotactile au niveau d’une touche, les pianistes ont alors perçu des différences sonores. La perception du retour vibrotactile fut même suffisamment précise pour permettre à des musiciens de différencier des pianos à queue. C’est tout l’objet d’une expérience sur la perception multisensorielle de la qualité du piano menée par Galembo et Askenfelt [GA03]. Dans cette expérience, les pianistes ont su reconnaître des pianos malgré un masquage du retour audio et du retour visuel.

Dans le cas du piano, cette faculté de distinguer les instruments est sans doute le fait de la dureté et de l’enfoncement variables des claviers. Cette explication n’est pas envisageable pour le cas du violon et celui de la guitare électrique. Il est alors fait l’hypothèse, dans cette partie, que les instruments à cordes tels que la guitare électrique pourraient être différenciés sur la base de la perception de leur retour vibrotactile.

Dans le cas de la guitare électrique, le retour vibrotactile est un signal complexe, de par son contenu fréquentiel. Il est intéressant d’étudier la perception du retour vibrotactile par les guitaristes électriques, car il a été montré dans la partie I qu’ils parlent spontanément du toucher.

- Sont-ils sensibles à des variations du retour vibrotactile ?
- Si la réponse est positive, à quelles fréquences sont-ils sensibles dans le retour vibrotactile ?
- Si les guitaristes sont sensibles aux variations du retour vibrotactile, seraient-ils intéressés par son contrôle et ses modifications (ainsi qu’il est désormais habituel pour la modification du retour sonore, par exemple avec les pédales d’effet) ?

Pour répondre à ces questions, j’ai mené plusieurs expériences, et j’en présente les résultats ici. Le retour vibrotactile de la guitare électrique en situation de jeu constitue le point de départ de la réflexion pour l’étude des signaux vibratoires. Il est mesuré avec un accéléromètre placé sur le manche de la guitare et réinjecté à l’aide d’un excitateur électrodynamique²⁰ (appelé

20. Le choix de l’excitateur électrodynamique est justifié dans l’annexe D.

« vibreur » par la suite) placé sur la tête de la guitare. Cette réinjection des vibrations est supposée fidèle au retour vibrotactile à l'endroit où l'accéléromètre est placé.

Plusieurs hypothèses sont ainsi discutées dans cette partie :

- Il est possible de simplifier le contenu fréquentiel du signal vibratoire sans altérer la perception des guitaristes, en ne conservant que le fondamental de la note jouée (et certains partiels). L'amplitude relative des partiels par rapport aux modes de structure est suffisamment grande pour considérer que les guitaristes ne perçoivent pas les modes de structure.
- Les guitaristes perçoivent plus de différences entre les signaux vibratoires sans jouer qu'ils n'en perçoivent en situation de jeu. S'ils ne jouent pas, les guitaristes sont concentrés uniquement sur l'analyse du signal qu'ils ressentent.
- Le signal vibratoire mesuré à l'accéléromètre peut être remplacé par le signal du micro, généré avec un vibreur. Les deux types de signaux contiennent les fréquences des modes de corde, à des amplitudes similaires. Ainsi, les différences entre les signaux ne sont pas perçues.
- Les guitaristes peuvent modifier le retour vibratoire de leur instrument. Les guitaristes électriques ont de toute façon l'habitude de modifier le retour sonore de leur instrument (amplificateur et pédales d'effet).

Dans le chapitre 5, le contenu fréquentiel du signal mesuré à l'accéléromètre est filtré. Il est ici demandé aux guitaristes de juger de la « similarité » entre le retour vibrotactile de l'instrument en situation de jeu et le retour vibrotactile de différents signaux vibratoires générés sur la guitare par le vibreur. Les signaux vibratoires générés varient en fonction de leur contenu fréquentiel. Le but est de montrer qu'il est possible de simplifier le signal vibratoire sans altérer la perception des guitaristes.

Les signaux vibratoires présentés dans le chapitre 5 nécessitent l'utilisation d'un accéléromètre pour mesurer les vibrations. Or, la présence de l'accéléromètre sur le manche pose un problème d'ergonomie pour des expériences en situation de jeu. Le chapitre 6 est basé sur une expérience dont le but est de simplifier le montage expérimental pour la réinjection de signaux vibratoires²¹. Il serait intéressant de pouvoir utiliser directement le signal du micro pour générer les vibrations. Dans le cas présent, il s'agit de montrer que l'utilisation du signal du micro n'altère pas la perception des vibrations, par comparaison avec la réinjection des signaux vibratoires.

Les chapitres 5 et 6 sont à l'origine du choix des signaux vibratoires générés pour le chapitre 7. Le chapitre 7 répond aux objectifs du travail de la présente thèse, à savoir étudier la perception des vibrations par des guitaristes, en conditions écologiques²² et avec la possibilité de modification des vibrations de la guitare électrique. Dans l'expérience proposée, les guitaristes ont joué librement, avec la possibilité de modifier conjointement le retour sonore et le retour vibratoire. Les modifications proposées permettent aux guitaristes de choisir un signal « lisse » ou un signal « rugueux »²³. Les guitaristes se sont librement exprimés sur leur ressenti, et cette expérience permet de faire le lien entre l'analyse linguistique de la partie I et la perception des vibrations.

21. Les expériences du chapitre 6 ont été menées indépendamment des résultats du chapitre 5.

22. La notion de conditions écologiques est expliquée dans le chapitre 1.

23. Ces termes n'ont pas été donnés aux musiciens.

Influence du contenu fréquentiel du retour vibrotactile sur la perception

Sommaire du présent chapitre

5.1 Introduction	79
5.2 Méthodologie de l'expérience	81
5.2.1 Matériel	81
5.2.2 Déroulé	82
5.3 Résultats	88
5.3.1 Scores des filtres	88
5.3.2 Différences significatives par facteur	91
5.3.3 Critères d'évaluation	94
5.3.4 Zones du ressenti	94
5.4 Conclusion	95
5.4.1 Limites	97
5.4.2 Perspectives	97

5.1 Introduction

Il a été vu dans le chapitre 3 que les guitaristes s'exprimaient spontanément sur le retour vibrotactile en situation de jeu. Les guitaristes sont donc sensibles aux vibrations de leur instrument, qu'ils peuvent ressentir au niveau des points de contact avec l'instrument. Ces points de contact apparaissent sur la figure 5.1 :

- la main gauche qui tient le manche et appuie sur les cordes et la touche ;
- le ventre et le torse contre lesquels la guitare peut être appuyée ;
- l'avant-bras droit posé sur la guitare ;
- les cuisses, en position assise ;
- la main droite quand les cordes sont pincées (ou par l'intermédiaire du médiator), et souvent une partie de la paume de la main droite, qui peut se trouver en contact avec les

cordes très proches du chevalet.



FIGURE 5.1 – Photo d’un guitariste en situation de jeu. Les zones en rouge mettent en évidence les zones de contact entre le guitariste et la guitare.

La perception des vibrations par les guitaristes électriques est étudiée dans ce chapitre. Il a été choisi de prendre le retour vibrotactile de l’instrument en situation de jeu comme point de départ, en cherchant à simplifier ce signal. L’objectif à terme est d’augmenter la guitare en vibration en temps réel. Les signaux des dispositifs actuels avec augmentation haptique sont basés, pour la plupart, sur des signaux de synthèse, parfois sans la possibilité de modification de la fréquence. À l’inverse, la démarche proposée ici se base sur le signal mesuré en situation de jeu et permet d’observer jusqu’à quelle limite il est possible de simplifier ce signal, sans dénaturer la perception des vibrations. Ainsi, la principale question posée dans ce chapitre est de savoir quelle partie du spectre de ce signal complexe est-elle nécessaire à la perception des guitaristes, sans altération notable de la qualité? Pour la simplification, il a été décidé de filtrer le signal de reproduction des vibrations. Sur la base de mesures en situation de jeu, des guitaristes ont pu évaluer des signaux avec un contenu fréquentiel altéré. Ils ont évalué dans quelle mesure les signaux vibratoires proposés sont semblables au retour vibrotactile qu’ils perçoivent quand ils jouent. Est-ce que toutes les composantes fréquentielles du signal sont utiles à la perception des vibrations de l’instrument? Peut-on réduire le signal vibratoire au seul fondamental sans en affecter la perception?

Avant de mener l’expérience, les hypothèses suivantes ont été posées :

- Le ressenti des vibrations a principalement lieu au niveau de la main gauche, et donc la reproduction des vibrations est faite pour un point particulier du manche, proche de la main gauche des guitaristes. Il a été vu dans le chapitre 3 (section 3.4.2) que le manche était particulièrement lié au sens du toucher. Le manche est en effet en contact direct avec la main gauche des guitaristes.
- Les guitaristes joueront assis, ce qui influera sur les zones de contact entre le guitariste et l’instrument, mais limitera la fatigue pendant le test. L’hypothèse émise est que les

résultats en position assise seraient identiques à ceux obtenus en position debout. En effet, très peu de zones de contact changent entre ces deux positions. Le contact des mains et des bras avec la guitare reste inchangé. Comme il est fait l'hypothèse que la perception des vibrations a principalement lieu au niveau de la main tenant le manche, les résultats devraient être conservés en position debout. Les différences entre les positions assise et debout sont la perte de contact avec les cuisses d'une part, et la probable augmentation de la surface de contact avec le ventre d'autre part, puisque la guitare est, dans la position debout, complètement posée contre le ventre des guitaristes.

L'expérience doit permettre de vérifier que :

- Le cas « accéléromètre non filtré » est jugé comme étant similaire aux vibrations ressenties en situation de jeu par les guitaristes.
- Il est possible de simplifier le signal vibratoire sans altérer la perception qu'en ont les guitaristes, en ne conservant que le fondamental de la note jouée et certains partiels¹. Il est sous-entendu par cette hypothèse que les musiciens sont plus sensibles au fondamental qu'au reste du contenu spectral. Dans ces conditions, on n'observerait pas de différence, dans les évaluations des guitaristes, entre le signal issu de la mesure à l'accéléromètre (non filtré) et les signaux filtrés.
- Les fréquences au-delà de 450 Hz ne sont pas nécessaires à la perception des vibrations, car nettement moins perçues par les guitaristes (d'après les résultats de Verrillo [Ver84, page 229], voir figure 1.1 de ce manuscrit, p. 6). Cette fréquence est choisie pour être située après la bande de fréquence la plus sensible (250 Hz).
- La suppression des fréquences des modes de structure de la guitare n'affecte pas la perception des guitaristes. Cette démarche est similaire au contrôle actif modal, qui permet de modifier les amortissements aux fréquences des modes de structure – cette hypothèse s'appuie sur une mise en œuvre du contrôle actif modal, présentée dans l'annexe E, dans laquelle aucune différence ne semble être perçue malgré un écart de 10 dB au niveau des fréquences des premiers modes grâce au contrôle. Le filtrage tel qu'il est envisagé au niveau des modes de structure dans ce chapitre garantit une atténuation de 40 dB autour des fréquences concernées, ce qui se rapproche de ce qui pourrait être un contrôle actif modal idéal. Même dans ces conditions, il est supposé qu'il n'y aurait pas de changement perceptible par les guitaristes.

L'expérience présentée dans ce chapitre a fait l'objet d'une présentation orale lors du Congrès Français d'Acoustique (CFA) en avril 2022, intitulée « Étude du ressenti des guitaristes pour une guitare électrique augmentée en vibration ».

5.2 Méthodologie de l'expérience

5.2.1 Matériel

Pour cette expérience, une guitare électrique *solid body Squier Classic Vibe '50s Telecaster* (voir figure 5.1) est utilisée. Il s'agit d'un modèle de référence bien connu des guitaristes électriques.

1. Les « harmoniques », pour une note donnée, correspondent à la fréquence fondamentale de la note et de ses multiples, et les « partiels » y correspondent également, à la multiplication par le coefficient d'inharmonicité près (ce ne sont donc pas exactement des multiples de la fréquence fondamentale).

Pour la mesure des vibrations, un capteur d'accélération piézo-électrique *B&K 4393* ($0,316 \text{ pC/m.s}^{-2}$, $2,4 \text{ g}$), appelé « accéléromètre » par la suite, est placé sous le manche de la guitare, à côté de la main des guitaristes qui tient le manche. Cet accéléromètre est à position variable en fonction des participants (voir annexe F, figure F.7), afin d'être au plus proche de la main des guitaristes. Les stimuli vibratoires sont générés par un vibreur *Dayton Audio DAEX19CT-4* (diamètre 19 mm, 5 W, 4Ω), placé au niveau de la tête de la guitare, comme présenté figure 5.2, connecté à un amplificateur *Audiophonics TPA-S25* ($2 \times 45 \text{ W}$, 4Ω). L'acquisition des mesures et la génération des signaux sont effectuées avec une carte son² *Focusrite Scarlett 2i2* (fréquence d'échantillonnage³ 16 kHz, 16 bits).

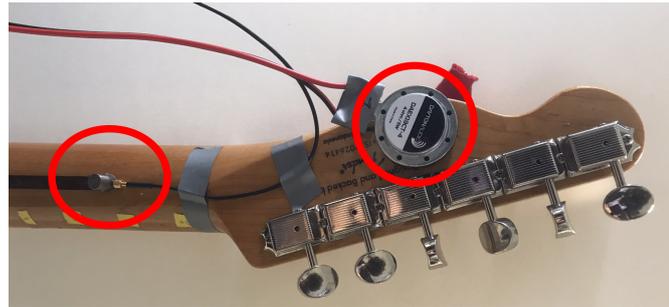


FIGURE 5.2 – Vibreur *Dayton Audio DAEX19CT-4* placé sur la tête de la guitare et accéléromètre *B&K 4393* placé derrière le manche, mis en évidence par les zones en rouge.

5.2.2 Déroulé

Pour cette expérience, 9 participants sont venus au laboratoire pour une durée moyenne d'une heure. L'expérience s'est déroulée en 4 étapes :

1. Mesures vibratoires de 6 notes à jouer (5 minutes).
2. Mesure d'une fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre, *in situ* (2 minutes).
3. Préparation automatique des signaux (1 minute).
4. Évaluation de signaux vibratoires (40 minutes).

5.2.2.1 Étape 1 : Mesures en situation de jeu

Des mesures des vibrations sont effectuées avec l'accéléromètre (voir le placement figure 5.2) pendant que les guitaristes jouent des notes une par une. Pour l'enregistrement des mesures, il est demandé aux guitaristes de jouer chacune de ces notes en les laissant résonner. Mesurer l'ensemble des notes aurait rendu l'expérience particulièrement longue, c'est pourquoi 6 notes ont été sélectionnées (voir tableau 5.1). Il y a une note par corde, une hypothèse implicite étant qu'il puisse y avoir un résultat différent entre les cordes graves et aiguës, mais généralisable sur l'ensemble des notes d'une même corde et donc pour tout endroit du manche. Les notes choisies incluent deux cordes à vide (case 0), car le fait d'avoir ou non le doigt posé sur la touche pourrait changer les sensations. Dans le choix des cases pour les notes, la présence de fréquences proches

2. Dans l'annexe G, il est montré que l'utilisation de la carte son pour des signaux vibratoires est aussi pertinente que l'utilisation d'une carte d'acquisition *NI-9223* (fréquence d'échantillonnage 16 kHz, 16 bits).

3. Pour les cartes d'acquisition et les cartes son utilisées, chaque fréquence d'échantillonnage donnée dans les différents chapitres correspond à la fréquence d'échantillonnage appliquée dans le chapitre où elle est mentionnée.

des fréquences des modes de structure identifiés lors de l'analyse modale (voir section F.2.1) a été prise en compte : certaines notes ont des fréquences (fondamentale et partiels) proches des fréquences des modes de structure, d'autres non.

Enfin, les notes choisies sont concentrées sur le haut du manche (entre les cases 0 et 4), afin de conserver la position de l'accéléromètre entre les mesures vibratoires de chaque note⁴. Il est fait l'hypothèse (qui ne sera pas vérifiée) que les résultats obtenus pour un positionnement en haut du manche seront conservés pour les notes des cases plus élevées (jusqu'en bas du manche).

Numéro de note	Corde	Case	Fréquence fondamentale	Nom de note
1	1	4	415,3 Hz	Sol# ₃
2	2	3	293,7 Hz	Ré ₃
3	3	2	220,0 Hz ^{*1-2}	La ₂
4	4	0	146,8 Hz ^{*3}	Ré ₂
5	5	2	123,5 Hz	Si ₁
6	6	0	82,4 Hz ^{*1}	Mi ₁

TABLEAU 5.1 – Les notes choisies pour l'expérience. Une note a été choisie par corde, en haut du manche sur les premières cases. La présence de * indique la coïncidence des fréquences d'un partiel de la note avec au moins une fréquence d'un mode de structure (différence de fréquence inférieure à 5 Hz), qu'il s'agisse du fondamental (¹) ou d'un des partiels suivants (² ou ³).

La figure 5.3 (p. 84) illustre la présence des fréquences des modes de structure (voir détail dans le tableau F.1, p. 183) et des modes de corde dans la représentation fréquentielle des mesures vibratoires. Un grand écart d'amplitude entre les fréquences des modes de structure et les fréquences des modes de corde est observé (plus de 40 dB d'écart entre les amplitudes des 3 premiers partiels et les amplitudes des modes de structure visibles à 176,7 Hz et 222,7 Hz). Cela interroge sur l'importance des résonances de la structure dans la perception des vibrations et justifie la présence du filtre *CB modes* (voir tableau 5.2, p. 87), visant à éliminer les résonances de la structure dans le signal réinjecté.

5.2.2.2 Étape 2 : Fonction de transfert

Les mesures vibratoires des notes, effectuées derrière le manche par l'accéléromètre, sont réinjectées par le vibreur depuis la tête de la guitare. Le vibreur est placé à un endroit qui diffère de l'endroit où est placé l'accéléromètre, il est donc nécessaire d'appliquer la fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre pour effectuer la reproduction des vibrations. Si le vibreur était placé exactement au niveau de l'accéléromètre, ce ne serait pas nécessaire. Cependant, pour des raisons évidentes d'ergonomie, le vibreur ne peut pas être placé au niveau de la main du guitariste (voir figure 5.2 pour le placement du vibreur). Le placement du vibreur au niveau de la tête de la guitare correspond à la position où le vibreur maximise la transmission d'énergie au manche et à l'ensemble du corps de la guitare⁵. De plus, le fait de réaliser la fonction de transfert avec le vibreur a l'avantage de prendre en compte sa réponse en fréquence (voir annexe F).

4. L'accéléromètre est placé sur le manche, à proximité de la main des guitaristes. S'il avait été demandé aux guitaristes de jouer sur des cases plus élevées, ils auraient dû changer la position de leur main, et l'accéléromètre aurait dû être déplacé en conséquence.

5. D'autres positions ont été testées pour les vibrateurs. Cependant, pour un même niveau d'entrée, les signaux générés depuis les autres positions n'étaient pas perceptibles.

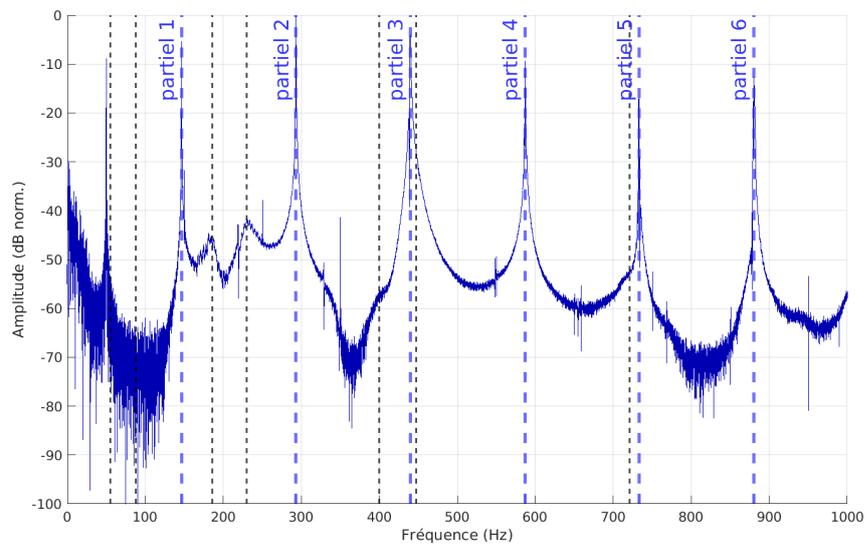


FIGURE 5.3 – Spectre du signal vibratoire mesuré lors du jeu de la note 4 (Ré_2 , 146,8 Hz) par le participant P4. Les lignes verticales pointillées, fines, noires, sont aux fréquences des modes de structure, les lignes verticales pointillées, épaisses, bleues sont aux fréquences des premiers partiels (fréquence du fondamental et des harmoniques suivants). La fréquence du troisième partiel est très proche de la fréquence d'un autre mode de structure (moins de 5 Hz), qui n'est pas visible sur le spectre, car il est d'amplitude trop faible par rapport à l'amplitude du partiel.

La mesure et l'application d'une fonction de transfert sont une méthode classique dans le domaine du contrôle des vibrations, illustrée par les travaux de Rizet [Riz99] sur le contrôle actif et de Boutin [Bou11] sur l'application du contrôle au violon et à la lame de xylophone. Une telle démarche de reproduction des vibrations avec application d'une fonction de transfert a été menée par Giordano et Wanderley pour une étude similaire sur la guitare acoustique [GW13].

Pour la mesure de la fonction de transfert, les guitaristes tiennent la guitare en position de jeu (assis, en tenant le manche, sans jouer) pendant qu'un balayage fréquentiel (comme présenté dans l'annexe F) est effectué. Un sinus logarithmique glissant de 10 à 1000 Hz, d'une durée de 15 s, est généré avec *Matlab* et envoyé au vibreur *via* la chaîne décrite en section 5.2.1. La mesure d'une fonction de transfert est présentée figure 5.4, elle concerne le participant P5. Les fréquences des modes de structure sont directement observables. La reproduction exacte des vibrations correspond au rapport entre la mesure à l'accéléromètre et la fonction de transfert.

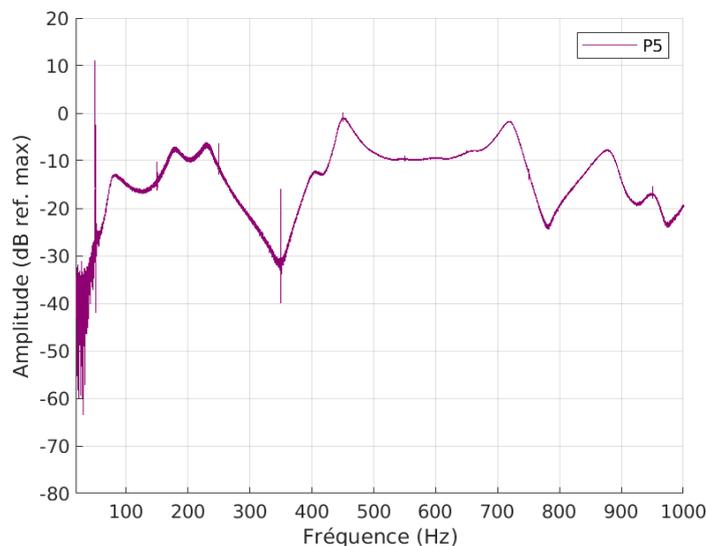


FIGURE 5.4 – Fonction de transfert mesurée pour le participant P5 de l'expérience.

5.2.2.3 Étape 3 : Filtrage des signaux

Le signal de l'accéléromètre est filtré pour générer les autres signaux du test, présentés ci-après. Les caractéristiques des différents filtres appliqués sont présentées dans le tableau 5.2 (p. 87) et la figure 5.5 (p. 86).

Le filtre *PB 900 Hz* (voir tableau 5.2, page 87) est choisi pour permettre un haut niveau de similarité avec les vibrations ressenties en situation de jeu (signal de l'accéléromètre filtré au niveau de la fréquence limite de sensibilité aux vibrations). Il s'agit d'un filtre passe-bas de fréquence de coupure 900 Hz (fréquence choisie car très éloignée de 250 Hz, fréquence où l'on est selon Verrillo le plus sensible au toucher [Ver92]). Ce filtrage des hautes fréquences a également l'avantage de limiter le bruit audible généré par le vibreur. Un filtre de type Chebychev a été choisi parce qu'il garantit une forte décroissance après la fréquence de coupure. Le filtre *PB 900 Hz* est appliqué à tous les signaux afin de ne conserver que les fréquences auxquelles les musiciens sont sensibles en vibration.

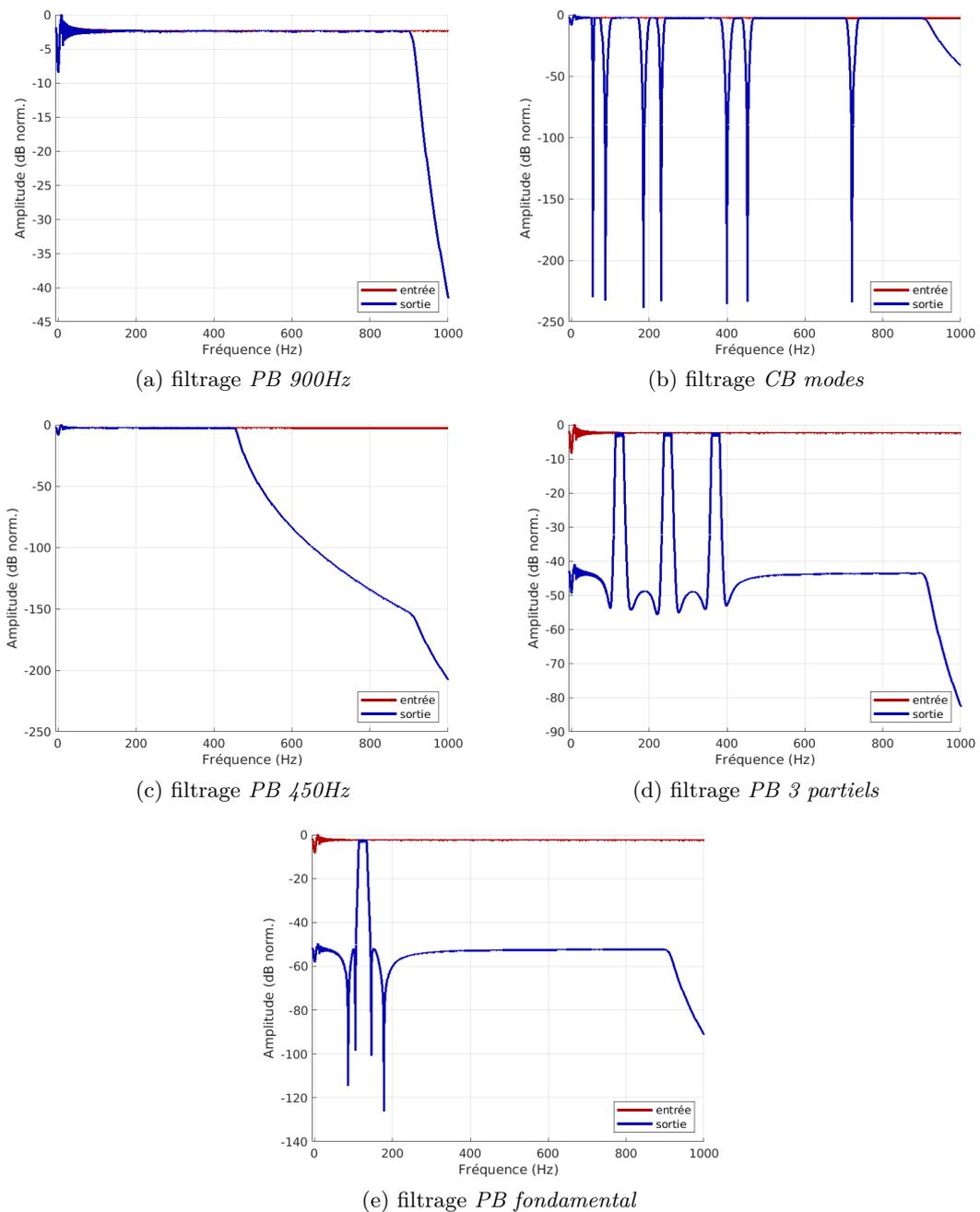


FIGURE 5.5 – Spectres relatifs aux 5 types de filtres appliqués aux signaux. La réponse en fréquence est affichée en trait plein bleu en fonction de l'entrée (balayage fréquentiel linéaire généré par *Matlab* avec la fonction *chirp*, de 1 Hz à 1000 Hz), affichée elle en trait plein rouge, pour chacun des filtres.

	Filtre	Fréquence de coupure	Type
<i>PB 900 Hz</i>	Passe-bas	900 Hz	IIR ordre 15, type Chebychev 1
<i>CB modes</i>	Passe-bas Coupe-bande	900 Hz Modes de structure (55 Hz, 88 Hz, 186 Hz, 230 Hz, 400 Hz, 452 Hz, 721 Hz)	IIR ordre 15, type Chebychev 1 IIR ordre 10, type Butterworth
<i>PB 450 Hz</i>	Passe-bas	450 Hz	IIR ordre 15, type Chebychev 1
<i>PB 3 partiels</i>	Passe-bas Passe-bande	900 Hz 3 premiers partiels	IIR ordre 15, type Chebychev 1 IIR bande passante 20 Hz
<i>PB fondamentale</i>	Passe-bas Passe-bande	900 Hz Fondamentale	IIR ordre 15, type Chebychev 1 IIR bande passante 20 Hz

TABLEAU 5.2 – Les différents types de filtres appliqués au signal de l'accéléromètre. Les filtres choisis sont des filtres IIR (*infinite impulse response*).

Le filtre *CB modes* consiste en plusieurs filtres coupe-bande (autrement appelés *notch filter*) dont les fréquences de coupure correspondent aux fréquences des modes de structure. Des filtres de type Butterworth ont été choisis parce qu'ils garantissent un gain constant dans la bande passante (un ordre 10 a été jugé suffisant). Les facteurs de qualité (liés à la largeur de chaque bande passante) de chaque filtre ont été identifiés à partir de la fonction de transfert mesurée. Les bandes de fréquence autour des fréquences des modes de structure ont été retirées. L'effet de ce filtre *CB modes* s'apparente à du contrôle actif modal (où l'amortissement au niveau des fréquences des modes de structure est contrôlé). Donc, pour le filtre *CB modes*, si une note a au moins une fréquence de ses partiels très proche d'un mode de structure (différence inférieure à 5 Hz), l'amplitude de ses partiels sera altérée. C'est le cas des notes 3, 4 et 6 (voir tableau 5.1). Il est supposé que cela n'aura pas d'effet sur les autres notes.

Le filtre *PB 450 Hz* consiste en un filtre passe-bas de fréquence de coupure à 450 Hz, au-delà de la fréquence fondamentale de la note la plus aiguë testée. Cette fréquence est choisie pour être située après la bande de fréquence la plus sensible, mais nettement moins élevée que 900 Hz. L'hypothèse que les fréquences au-delà de 450 Hz ne sont pas nécessaires à la perception des vibrations est testée, car ces fréquences sont clairement moins perceptibles par les guitaristes que les plus basses fréquences.

Le filtre *PB 3 partiels* consiste en 3 filtres passe-bande autour des fréquences des 3 premiers partiels de chaque note. Les fréquences des partiels ont été systématiquement identifiées à partir des mesures (maximum local du spectre sur une bande de fréquence réduite autour de la fréquence harmonique). Les filtres passe-bande choisis ont une bande passante de 20 Hz (valeur plus élevée que la largeur des pics des partiels) et garantissent une atténuation de 40 dB en-dehors de la bande passante.

Le filtre *PB fondamentale* consiste en un filtre passe-bande autour de la fréquence du fondamental de la note courante.

Pour chaque note, les cinq filtres sont présentés aux guitaristes. Les cinq signaux ont la même énergie, car ils sont normalisés en énergie, la référence choisie étant l'énergie E_0 du signal de plus basse énergie (*PB fondamentale*). Pour un signal d'énergie E_{sig} (« sig » pour « signal »), le signal est multiplié par $\frac{\sqrt{E_0}}{\sqrt{E_{sig}}}$.

5.2.2.4 Étape 4 : Évaluation des signaux

Pour l'évaluation des signaux, l'expérience est divisée en 6 séries (une par note testée). Lors de chaque série, les guitaristes sont soumis à 7 stimuli vibratoires (5 types de filtres, avec la duplication du filtre *PB 900 Hz* et du filtre *PB fondamentale* pour juger de la répétabilité du jugement des participants). Afin de s'assurer que les guitaristes n'entendent pas les signaux, des bouchons d'oreille ainsi qu'un casque diffusant un bruit blanc (filtré avec un filtre passe-bas à 1000 Hz d'ordre 6, généré par *Pure Data*) sont fournis :

Tu ne dois pas pouvoir entendre les notes quand tu joues. Dis-moi si c'est assez fort [le bruit dans le casque] pour valider que tu n'entends pas la guitare.

Pour chacune des séries (donc chaque note testée), les guitaristes ont à disposition un clavier avec 7 boutons numérotés de 1 à 7, comme présenté figure 5.6. Ces boutons correspondent aux numéros 1 à 7 présentés sur l'interface d'évaluation, figure 5.7. En appuyant sur le bouton i (i allant de 1 à 7), le guitariste déclenche le signal vibratoire i , et il évalue la similarité du stimulus du signal i avec ses sensations de vibration quand il joue lui-même de la guitare. La consigne donnée aux guitaristes est la suivante :

Tu vas avoir 6 notes à évaluer. Pour chacune des 6 notes : 7 signaux différents seront envoyés sur la guitare. Ton rôle est de noter ces signaux sur leur niveau de similarité avec le moment de jeu. Tu peux jouer les notes toi-même pour les comparer avec les signaux. À chaque fois, on te propose de tenir la guitare comme si tu jouais la note en question. Pour lancer les signaux, tu appuies sur les touches correspondantes au numéro et ça déclenchera quelques secondes de signal sur la guitare. Ensuite, tu les évalues sur l'écran devant toi.

Sur l'interface d'évaluation (voir figure 5.7), il est indiqué aux guitaristes la signification des valeurs extrêmes (de 0 à 100) : « Très différent » pour 0 et « Très similaire » pour 100. Le curseur à déplacer est placé au centre de l'échelle d'évaluation (50) à chaque début de série, avec l'indication « Assez similaire ».

La disposition des 7 stimuli possibles est aléatoire, le guitariste n'ayant aucune information sur la nature des signaux.

5.3 Résultats

L'expérience contient 3 facteurs :

- *Participant* : les 9 participants, identifiés de P1 à P9 ;
- *Note* : les 6 notes (voir tableau 5.1, p. 83), numérotées selon le numéro de corde (la corde 1 étant la corde du mi aigu et la corde 6 la corde du mi grave) ;
- *Filtre* : 7 filtres (*PB 900 Hz* et une duplication *PB 900 Hz 2*, *CB modes*, *PB 450 Hz*, *PB 3 partiels*, *PB fondamentale* et une duplication *PB fondamentale 2*).

Les évaluations de la similarité de chaque signal avec la situation de jeu sont appelées « scores » par la suite. Ces scores vont de 0 à 100 et correspondent aux évaluations des guitaristes (aucun traitement n'est appliqué sur ces données).

5.3.1 Scores des filtres

Les résultats par filtre (figure 5.8) sont assez surprenants. Si peu de différences entre chaque type de filtre étaient attendues, le filtre *PB 900 Hz* aurait dû avoir le meilleur score moyen, ce

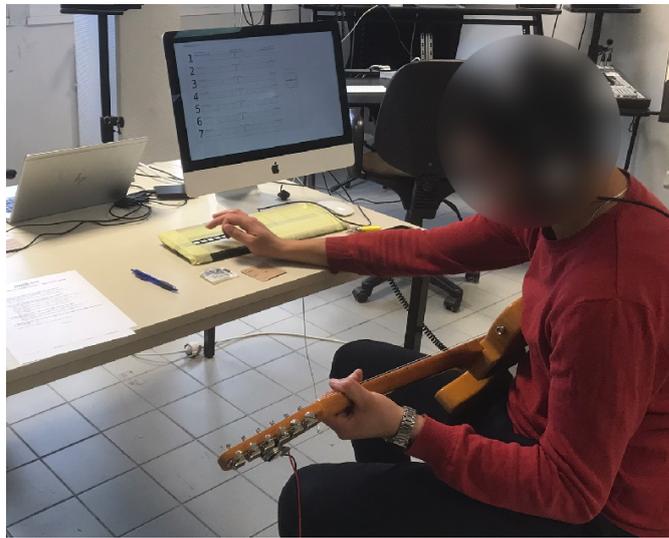


FIGURE 5.6 – Mise en situation du guitariste pendant la phase d'évaluation.

InterfaceEvaluationCFA2022

1 Très différent des sensations pendant le jeu Assez similaire aux sensations pendant le jeu Très similaire aux sensations pendant le jeu

2 Très différent Assez similaire Très similaire

3 Très différent Assez similaire Très similaire

4 Très différent Assez similaire Très similaire

5 Très différent Assez similaire Très similaire

6 Très différent Assez similaire Très similaire

7 Très différent Assez similaire Très similaire

Note n° 1 / 6

Sauvegarder

FIGURE 5.7 – Interface logicielle proposée aux participants.

qui n'est pas le cas. Le filtre *PB 3 partiels* est perçu comme étant le plus similaire aux vibrations ressenties en situation de jeu. Pourtant, le filtrage imposé par *PB 3 partiels* diminue fortement le contenu fréquentiel. Les guitaristes seraient donc fortement sensibles à la perception des partiels de la note. Cependant, les filtres *PB fondamental* et *PB fondamental 2* (passe-bande autour du seul fondamental) sont perçus comme étant les moins similaires aux vibrations ressenties en situation de jeu. Les guitaristes seraient donc sensibles à la présence ou à l'absence des autres partiels.

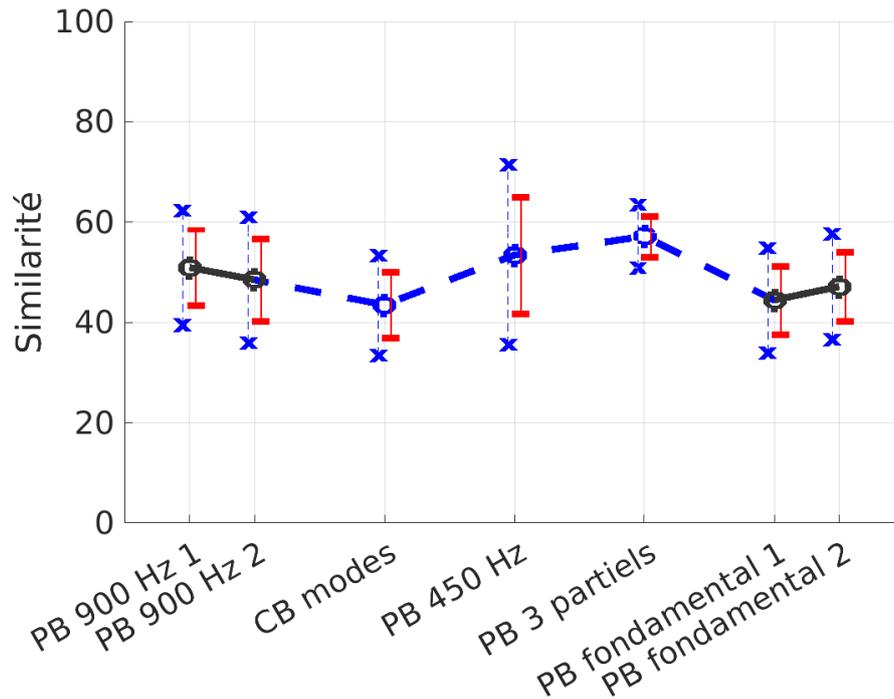


FIGURE 5.8 – Moyennes (de tous les participants et toutes les notes), $\pm ET$ (l'écart type de tous les participants, à partir de la moyenne des notes, croix bleues) et l'IC (intervalle de confiance, entre les traits horizontaux rouges) des scores de similarité des différents filtres avec les vibrations ressenties en situation de jeu. Les traits noirs rappellent que *PB 900 Hz* et *PB fondamental* sont chacun présent deux fois (pour chaque série de 7 stimuli).

Généralement, l'écart type (ET) pour chaque filtre est important (plus de 10 points d'écart type pour des moyennes toutes comprises entre 40 et 60), et les scores de similarité pour les reproductions de vibrations (*PB 900 Hz*) ne sont ni aussi élevés qu'attendu, ni plus importants que les autres signaux. Il apparaît que les différents filtres ne sont pas perçus avec des différences importantes.

De plus, l'intervalle de confiance (IC) à 95 % est calculé pour chaque filtre. La moyenne du filtre *PB 3 partiels* est la seule apparaissant comme significativement différente de celle de deux autres filtres, *PB fondamental 1* et *CB modes*. La différence entre la borne inférieure de l'IC du filtre *PB 3 partiels* et la borne supérieure des deux filtres (*PB fondamental 1* et *CB modes*) est très faible. Les autres IC des différents filtres se chevauchent, indiquant qu'il n'y a pas de différence entre les moyennes de ces filtres.

5.3.2 Différences significatives par facteur

Les différences entre les niveaux de chaque facteur (*Filtre* et les autres facteurs *Note* et *Phase*) sont quantifiées par l'analyse des scores avec la méthode ANOVA (analyse des variances, voir [SW89] pour une description complète de la méthode). La méthode ANOVA est un ensemble de modèles statistiques utilisés pour montrer des différences ou des similitudes entre les niveaux d'un facteur. Par exemple, dans l'étude du facteur *Filtre*, la méthode ANOVA permet de vérifier si les différences entre les moyennes de chaque filtre sont significatives⁶. Le facteur *Participant* est considéré comme un facteur aléatoire, dans la mesure où l'on souhaite pouvoir généraliser les résultats sur la population des guitaristes électriques. Les facteurs *Note* et *Filtre* sont considérés comme fixes, car les niveaux ont été fixés par l'expérimentateur.

Pour s'assurer de la validité de l'utilisation de la méthode ANOVA, il faut vérifier que les résidus de l'ANOVA suivent la loi normale (normalité) et l'homogénéité des variances (l'homoscédasticité). Ces deux conditions sont vérifiées ci-après.

5.3.2.1 Normalité et homoscédasticité

Les vérifications de la normalité et de l'homoscédasticité sont effectuées selon la répartition des données, et plus précisément des résidus de l'ANOVA. Les résidus sont définis comme étant les différences entre les valeurs observées (ici les scores) et les valeurs estimées (moyennes). Les résidus correspondent donc aux erreurs de prédiction d'un modèle (à savoir l'écart de chaque score à la moyenne). La vérification de la normalité doit confirmer que la répartition des résidus suit la loi normale. La vérification de l'homoscédasticité (homogénéité des variances) doit confirmer que les variances des résidus sont uniformément réparties.

La vérification de la normalité est proposée graphiquement par la lecture du graphique quantile-quantile⁷ (qq-plot) de la figure 5.9. Ce graphique compare la répartition de la loi normale à la répartition des résidus. Le graphique quantile-quantile de la figure 5.9 montre que les données de l'expérience suivent approximativement une loi normale (les points correspondant aux valeurs des résidus sont globalement sur la droite représentant les points de la loi normale).

L'homoscédasticité consiste à vérifier que la variance des résidus est la même pour chaque observation, et donc qu'ils sont distribués de manière aléatoire. Sur le graphique des résidus en fonction des prédictions (voir figure 5.10), on observe une répartition homogène des résidus en fonction des prédictions. À partir d'une valeur de prédiction, on ne peut pas donner de valeur précise pour les résidus. La disposition des valeurs semble aléatoire, aucune forme particulière n'est observée⁸ et il n'y a pas de tendance visible. La condition d'homoscédasticité est donc satisfaite.

La vérification de la normalité et de l'homoscédasticité permet d'utiliser les résultats de l'ANOVA.

6. L'adjectif « significatif » est directement emprunté au domaine des statistiques et sera fortement employé par la suite. Un test est statistiquement significatif lorsque le risque quantifié de se tromper, nommé p-value, est inférieur à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (valeur classique), autrement appelé « erreur de type I ». Pour tout type de test, affirmer qu'un facteur, une interaction ou une différence sont significatifs se déduit d'une p-value inférieure à $\alpha = 0,05$. À l'inverse, une différence ne pourra pas être considérée comme significative si la p-value du test est supérieure à $0,05$, l'hypothèse nulle ne peut pas être rejetée.

7. En statistique et en théorie des probabilités, les quantiles sont les valeurs qui divisent un jeu de données en intervalles de même probabilité. La médiane est le quantile qui sépare le jeu de données en deux, et les quartiles sont les trois quantiles qui séparent le jeu de données en quatre groupes de même probabilité.

8. Dans les cas où l'homoscédasticité n'est pas vérifiée, il est classique d'observer une forme d'entonnoir sur le graphique des résidus en fonction des prédictions.

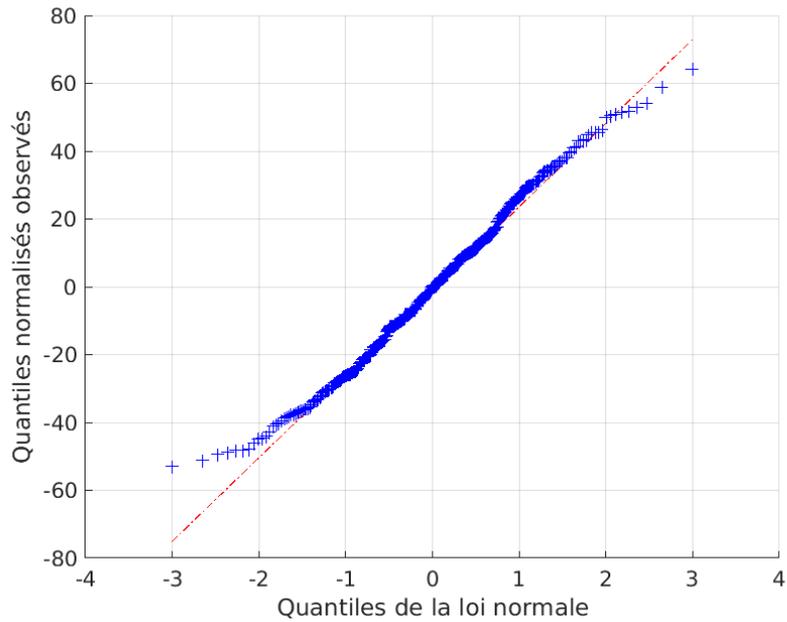


FIGURE 5.9 – Graphique quantile-quantile sur les résidus (normalité). La droite en pointillés rouge représente la loi normale, et les croix bleues sont les résidus des données de l'expérience.

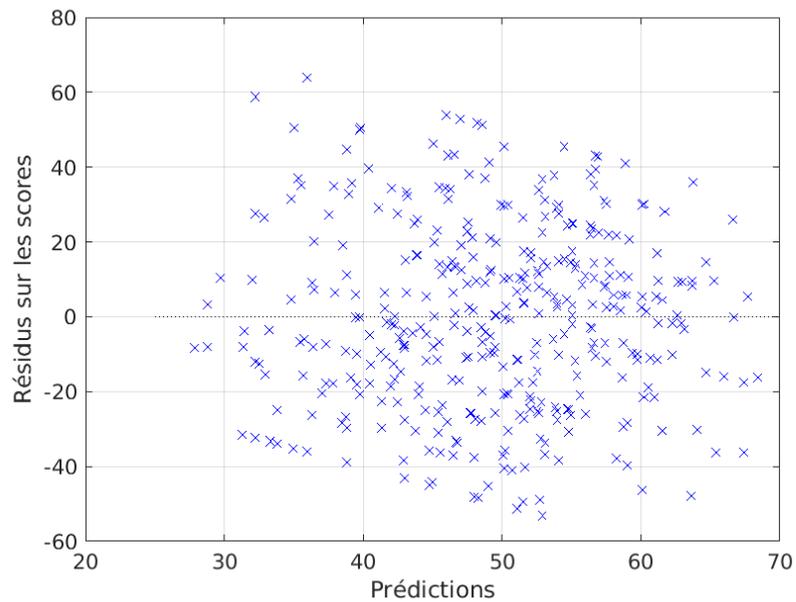


FIGURE 5.10 – Graphique des résidus (homoscédasticité). Les croix bleues sont les résidus des données.

5.3.2.2 Facteurs et interactions

Dans l'utilisation de la méthode ANOVA, il faut considérer un modèle complet et alors prendre en compte les facteurs (*Participant*, *Note* et *Filtre*) et les interactions deux à deux entre les facteurs. Le facteur *Participant* décrit un facteur aléatoire, il en va donc de même pour les interactions impliquant ce facteur. La précaution de considérer *Participant* comme un facteur, qui plus est facteur aléatoire, permet de pallier le problème des mesures répétées par un même participant⁹, et donc la perte de l'indépendance des évaluations. Le tableau 5.3 montre qu'aucune interaction (*Note/Filtre*, *Note/Participant* et *Filtre/Participant*) n'est significative (p-value supérieure à 0,05). Par exemple, *Note/Filtre* est une interaction non significative, donc il n'est pas possible de conclure que l'effet des notes sur le score dépend du filtre utilisé. Il en va de même pour les autres interactions.

Source	Type	Somme des carrés	Degrés de liberté	Carré Moyen	F	Valeur-p
<i>Note</i>	Fixe	5417,7	5	1083,55	1,68	0,1622
<i>Filtre</i>	Fixe	7779,7	6	1296,62	1,93	0,0957
<i>Participant</i>	Aléatoire	14124,9	8	1765,62	2,51	0,0402 *
<i>Note/Filtre</i>	Fixe	16197,8	30	539,93	0,88	0,6529
<i>Note/Participant</i>	Aléatoire	25829,6	40	645,74	1,05	0,3966
<i>Filtre/Participant</i>	Aléatoire	32313	48	673,19	1,1	0,323
Erreur	Aléatoire	147531	240	614,71		
Total		249193,8	377			

TABLEAU 5.3 – Présentation des résultats du modèle comprenant les facteurs avec les interactions. Le facteur *Participant* décrit un facteur aléatoire. La présence de * indique si le facteur implique *a priori* des différences significatives. L'analyse a été effectuée avec le logiciel *Matlab*.

Des trois facteurs, seul *Participant* est significatif (p-value inférieure à 0,05). Il y a donc des différences significatives entre les participants.

5.3.2.3 Tests post-hoc

Avec une p-value inférieure à 0,05 (voir tableau 5.3), le facteur *Participant* est le seul à être significatif pour l'ANOVA. Il n'y a pas de différence significative entre les scores moyens obtenus avec les différentes notes, ni entre les scores moyens obtenus avec les différents filtres (à titre indicatif, le détail des tests post-hoc de Tukey sur le facteur filtre est présenté dans le tableau H.2 de l'annexe H). Dans le cas du facteur *Participant* qui est significatif, des différences sont attendues entre certains participants.

5.3.2.4 Conclusion de l'utilisation de la méthode ANOVA

En appliquant la méthode ANOVA aux données de l'expérience, aucune interaction n'est significative. Le facteur *Filtre* n'est pas significatif. Pour ce qui est de la perception des signaux par les guitaristes, rien ne permet de conclure à la différence sur les niveaux de similarité des

9. Si chaque participant effectue la totalité des conditions, les scores d'un même participant ne sont plus indépendants et l'expérience se positionne dans le *within-subject design*, ce qui est le cas présenté dans ce chapitre. Afin de pallier la dépendance des nombreux scores d'un participant, il faut prendre en compte le participant comme un facteur [FB15, page 167].

vibrations ressenties avec les signaux ré-injectés par rapport aux vibrations ressenties pendant qu'ils jouent. Dans le but d'augmenter la guitare en vibrations, les dissimilarités entre les conditions et la condition témoin des filtres *PB fondamentale* et *PB 900 Hz* sont suffisamment faibles pour suggérer une chose : mis à part le fondamental, le contenu fréquentiel des signaux à injecter dans l'instrument pourrait ne pas être nécessaire à la perception.

5.3.3 Critères d'évaluation

Pour compléter l'étude de la perception des vibrations, les guitaristes ont été interrogés sur la manière dont ils ont cherché à différencier les signaux :

Pendant cette expérience, sur quels critères avez-vous évalué les signaux proposés ?

Les réponses sont regroupées par catégorie dans le tableau 5.4.

Il est surprenant de voir figurer la notion d'« intensité » et la notion de « durée » dans les critères des guitaristes. En effet, il était attendu de la normalisation en énergie une impossibilité, pour les guitaristes, de distinguer les signaux sur la base de la comparaison de leur « intensité ». Or, les guitaristes ont utilisé l'« intensité » pour la distinction, et certains d'entre eux se sont même directement plaints de ne pas ressentir certains signaux. La normalisation en énergie ne correspond donc pas à la perception de l'« intensité » par les participants. Pour être plus précis, il faudrait envisager pour de futures expériences de prendre en compte les courbes de sensibilité en fréquences identifiées par Verrillo [Ver84]. Pour les participants s'étant servis de l'« intensité » pour distinguer les signaux (à savoir P2, P7, P8 et P9), quelles conséquences sur les résultats peuvent être observées ? Avec la normalisation en énergie, les signaux les moins filtrés (ceux qui disposent de la plus grande énergie avant normalisation) ont été diminués en amplitude, peut-être au point de ne pas être ressentis par les guitaristes. On pourrait s'attendre alors à ce que les signaux les plus filtrés (et donc augmentés en amplitude par la normalisation en énergie, par exemple *PB fondamentale*) aient une plus grande similarité avec le ressenti en situation de jeu que les autres, ce qui n'est pas le cas. L'utilisation de « durée » pour la distinction des signaux est particulièrement inattendue, car chaque signal d'une même série est basé sur la même mesure vibratoire. Plusieurs explications sont envisagées, la première étant une conséquence des différences perçues en intensité. Si le signal est augmenté par la normalisation, il est perçu sur une durée plus longue, car il passe sous le seuil de perception plus tardivement. Une deuxième explication possible serait liée aux variations de jeu des participants. En effet, les participants ont comparé les signaux à leur ressenti lorsqu'ils jouent. S'ils ont été influencés par les signaux, ils ont pu changer leur façon de jouer entre deux signaux.

Trois participants (P5, P8 et P9) disent avoir utilisé l'« attaque » comme critère de distinction des signaux. L'utilisation de l'attaque pour distinguer les signaux aurait pu se traduire dans leurs évaluations par une différence nette entre les filtres *PB 900 Hz* et *PB fondamentale*, car le filtre *PB fondamentale* ne conserve pas les hautes fréquences, présentes au moment de l'impact, et caractéristiques d'un signal impulsif. Cette différence n'est pas observée, pour aucun de ces participants.

En général, il n'a pas été trouvé de lien direct entre l'utilisation des critères d'évaluation employés par les guitaristes et les différences de scores entre participants selon les signaux.

5.3.4 Zones du ressenti

Après l'expérience, les guitaristes ont été interrogés sur les parties du corps où ils ont ressenti les vibrations (voir tableau 5.5) :

Catégorie	Critères des guitaristes
ATTAQUE	<i>Attaque</i> (3)
DURÉE	<i>Durée</i> (4)
ENVELOPPE	<i>Enveloppe</i> (2), <i>Chute des vibrations</i> (1), <i>Decay</i> (1)
INTENSITÉ	<i>Intensité</i> (2), <i>Force du signal</i> (1), <i>Puissance</i> (1)
LOCALISATION	<i>Zones de contact vibrantes</i> (1), <i>Sensations dans la main gauche et leur localisation</i> (1), <i>Sensations dans le corps</i> (1), <i>Zones de vibrations</i> (1), <i>Localisation de la source du vibreur</i> (1)
MODULATION	<i>Modulation</i> (2), <i>croissance décroissance</i> (1)
RICHESSSE	<i>Plénitude du retour vibratoire (c'est plein, il ne manque rien, ce n'est pas trop fin ou étriqué...)</i> (1), <i>Aspect spectral : corde 2 case 3 des signaux plus riches en basses fréquences</i> (1)
AUTRE	<i>Le fait que la corde entre en résonance avec le signal</i> (1), <i>Comparaison avec les autres cordes</i> (1)

TABLEAU 5.4 – Critères d'évaluation des guitaristes pour distinguer les signaux. Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre de guitaristes ayant employé le mot qui précède. Chaque catégorie est un regroupement arbitraire, et n'est pas issu d'une analyse sémantique.

Pendant cette expérience, sur quelles zones de votre corps avez-vous ressenti les vibrations ? Et était-ce les mêmes zones pour chaque signal proposé ?

Le tableau met en évidence que tous les participants ressentent les vibrations au niveau de la main, ce qui correspond à l'objectif de départ, à savoir faire ressentir les vibrations au niveau de la main. Les mentions d'autres zones de ressenti indiquent que les vibrations injectées depuis la tête de la guitare ont bien été senties sur les autres zones de contact. Cela confirme que la génération de signaux depuis la tête de la guitare permet de générer des vibrations sur tout l'instrument.

Ces zones du ressenti ne permettent pas d'expliquer des résultats particuliers dans les scores.

5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une expérience sur l'influence du contenu fréquentiel sur la perception des vibrations a été menée. Le signal vibratoire a été mesuré, puis filtré, pour générer de nouveaux signaux vibratoires. Les signaux vibratoires proposés ont un contenu fréquentiel variable. Les guitaristes ont été interrogés sur le niveau de similarité des signaux générés avec le retour vibrotactile en situation de jeu.

Plusieurs hypothèses ont été vérifiées :

- Le filtre *PB 900 Hz* est jugé « assez similaire » aux vibrations perçues en situation de jeu par les guitaristes. Il était attendu que ce signal vibratoire soit perçu avec un plus haut niveau de similarité avec la référence de la situation habituelle de jeu. De plus, ce signal n'est pas significativement plus similaire que les autres types de signaux. Ce faible niveau

Partie du corps	Termes des guitaristes
MAIN	(P1) <i>Index, Pouce, Articulation pouce-index</i> , (P2) <i>Doigts, Paume de la main</i> , (P3) <i>Main gauche</i> , (P4) <i>Bout des doigts, Poignet main gauche</i> , (P5) <i>Bout des doigts, Paume de la main gauche, Doigts</i> , (P6) <i>Main gauche, Main droite</i> , (P7) <i>Main, Doigts</i> , (P8) <i>Main gauche</i> , (P9) <i>Paume de la main, Doigt</i>
BRAS	(P1) <i>Avant-bras droit</i> , (P8) <i>Avant-bras droit</i>
BUSTE	(P3) <i>Côtes</i> , (P5) <i>Torse</i> , (P6) <i>Torse</i> , (P9) <i>Abdomen</i>
JAMBE	(P1) <i>Cuisse</i> , (P3) <i>Cuisse</i> , (P7) <i>Cuisse</i>

TABLEAU 5.5 – Parties du corps décrites par les guitaristes comme zones de ressenti des vibrations. Le numéro du participant est donné entre parenthèse avant le détail des zones de ressenti.

de similarité peut être dû au placement du vibreur, qui génère une vibration à partir d'un point différent de la génération habituelle aux points de fixation des cordes. De plus, il n'y avait aucun signal très différent des autres, qui aurait permis d'avoir un niveau de similarité moyen très faible pour ce signal. Enfin, la condition de référence à l'évaluation des signaux (les vibrations perçues pendant le jeu) variait fortement, car les guitaristes ont jugé avoir eu des difficultés à répéter leur geste sans être influencé par les signaux ré-injectés.

- L'écart des moyennes des évaluations des différents signaux filtrés est suffisamment faible pour considérer que les différents types de filtre n'affectent pas beaucoup la similarité perçue des signaux vibratoires par rapport aux vibrations en situation de jeu, et que dans ce cas, autant utiliser le filtre le plus simple (en termes de quantité d'information contenue).
- L'impossibilité de conclure à des différences de similarité avec la situation de jeu entre les signaux ré-injectés ne s'oppose pas avec le fait de simplifier le signal vibratoire sans altérer la perception des guitaristes, en ne conservant que le fondamental de la note jouée et les partiels les plus graves. Comme aucune différence significative entre les signaux n'a été observée, il n'est pas impossible de simplifier le signal reproduit. Ainsi, la présence du fondamental pourrait être suffisante pour la perception des vibrations. Il est néanmoins conseillé de conserver les 3 premiers partiels, correspondant au signal le mieux noté en moyenne dans l'expérience. Les verbalisations du tableau 5.4 semblent montrer que le contenu fréquentiel supprimé a moins d'importance pour la perception des vibrations que les paramètres communs aux signaux proposés : enveloppe, durée, fréquence fondamentale.
- Les fréquences au-delà de 450 Hz pourraient ne pas être nécessaires à la perception des vibrations, car nettement moins perçues par les guitaristes. Cette fréquence est choisie pour être située après la bande de fréquence la plus sensible. Ainsi, le contrôle des vibrations par contrôle actif modal ne devrait pas modifier la perception des vibrations pour les guitaristes.
- Retirer les fréquences des modes de structure de la guitare n'aurait que peu d'influence sur la perception des guitaristes. Comme les modes de structure n'ont pas permis d'améliorer significativement la similarité des ré-injections avec les signaux en situation de jeu, une hypothèse devient alors qu'ils ne sont pas si importants dans la perception des vibrations. Cela motive l'objet du chapitre 6, et permet d'essayer d'autres ré-injections de vibrations, par exemple à partir du micro de la guitare (qui ne prend pas en compte ces modes).

De plus, il est confirmé que la main est une zone privilégiée pour le ressenti du retour vibrotactile pour la guitare électrique, sans pour autant négliger les autres zones de contact (bras,

buste et cuisse). Pour de futures expériences, il est envisagé de simplifier davantage les signaux et le montage expérimental.

5.4.1 Limites

Quelques difficultés ont été rencontrées durant cette expérience. La première est que le test a été jugé par les participants comme étant particulièrement difficile. Les signaux sont comparés à la situation de jeu, et cette référence est par nature variable (les guitaristes pouvaient jouer chaque note pour les comparaisons). Chaque comparaison effectuée est donc particulièrement dépendante de la répétabilité des participants. Il est confirmé par les participants que devoir comparer les signaux générés avec la situation de jeu (référence) s'est avéré délicat. Certains participants ont dit notamment avoir adapté leur geste aux vibrations ressenties.

Une deuxième difficulté rencontrée concerne la normalisation en énergie. Il était attendu par cette normalisation que les signaux soient perçus avec la même « intensité », ce qui n'a pas été du tout le cas pour certains participants. Cette normalisation en énergie a entraîné de grandes différences de sensations au sujet de l'« intensité ». Cela a fortement influencé les résultats de certains participants. Cette normalisation n'est donc pas adaptée à l'étude des vibrations. Lors de prochaines expériences, il faudra changer cette méthode. Par exemple, il est possible de faire une étape de normalisation avec les participants (normalisation dite « subjective »). Avec cette méthode, les participants augmentent ou diminuent l'intensité des signaux qu'ils jugent respectivement moins fort et plus fort que les autres. Dans le cas du présent chapitre, il aurait été difficile de la mettre en œuvre, car les mesures sont propres à chaque participant et donc les signaux également. Une autre manière de faire serait de considérer les courbes de Verrillo [Ver84], qui établissent l'isosensibilité en amplitude en fonction de la fréquence. La normalisation en énergie pourrait tenir compte de ces courbes, et les signaux seraient alors normalisés selon l'énergie perçue.

Une troisième limitation concerne la mesure des fonctions de transfert avec un accéléromètre déplacé. En observant les fonctions de transfert, il a été constaté d'importantes différences (voir annexe F, section F.3.2). Par crainte que cela ait une influence sur les résultats, il est recommandé de fixer une même position de l'accéléromètre pour tous les participants, en s'assurant que ça ne gêne aucun d'eux pour la tâche imposée.

Enfin, aucune différence significative n'a pu être montrée. Il n'est pas possible de directement conclure sur l'absence d'effet du filtre sur la perception des vibrations. Pour aller plus loin et renforcer les résultats de ce chapitre, il sera intéressant de prouver une équivalence, par exemple en utilisant le TOST (*Two one-sided tests*, voir [Lak17]).

5.4.2 Perspectives

La présence des premiers partiels des notes pourrait être suffisante à la perception de vibrations similaires aux conditions habituelles. En particulier, les fréquences des modes de structure semblent n'avoir que peu d'influence sur la perception. Ainsi, les mesures de vibrations à l'accéléromètre (mesurant les fréquences des cordes et celles de la structure) pourraient être remplacées par des mesures au micro¹⁰. Les partiels sont présents dans le signal en sortie du micro et c'est notamment ce qui est étudié dans le chapitre 6. Les prochaines expériences pourront être effectuées en situation de jeu pour augmenter les sensations de vibration de la guitare pour les musiciens.

10. Il s'agit du capteur électromagnétique, autrement appelé *pickup*, monté sur la guitare (voir figure 1.2, page 13).

La démarche de simplification des signaux pourrait aller jusqu'à des signaux de synthèse (sinusoïdes) basés sur les fréquences des partiels des notes jouées.

Réinjections vibratoires à partir de différentes sources : comparaison perceptive en situation de jeu

Sommaire du présent chapitre

6.1 Introduction	99
6.2 Méthode	101
6.2.1 Montage expérimental	101
6.2.2 Mesures	102
6.2.3 Normalisation de signaux vibratoires	103
6.2.4 Évaluation des signaux	103
6.3 Résultats	105
6.3.1 Facteurs et interactions	105
6.3.2 Taux de bonnes réponses	107
6.4 Conclusion	111

6.1 Introduction

Pour une reproduction supposée fidèle des vibrations du manche (comme vu dans le chapitre 5), un accéléromètre est nécessaire. Cette reproduction nécessite également la mesure systématique d'une fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre. La présence de l'accéléromètre pose un problème majeur, celui de l'écologie des tests. En effet, la présence d'un capteur sur le manche empêche potentiellement les guitaristes de jouer librement et ces derniers ne sont pas forcément habitués à de tels capteurs. Le micro¹ de la guitare est un capteur déjà présent sur la guitare électrique, donc serait une alternative envisageable. Mais le signal audio peut-il être utilisé pour générer des vibrations? C'est une démarche courante, comme il a été vu dans les travaux de Russo *et al.* [RAF12]. Le signal du micro est-il adapté pour générer des

1. Il s'agit du capteur électromagnétique, autrement appelé *pickup*, monté sur la guitare (voir figure 1.2, p. 13).

vibrations ? La principale différence observable entre les spectres des signaux vibratoires mesurés à l'accéléromètre sur le manche et ceux des signaux du micro se situe au niveau des modes de structure. Naturellement, ces modes n'apparaissent pas dans les spectres des signaux du micro. L'utilisation du signal du micro est d'autant plus intéressante que l'absence des fréquences des modes de structure ne diminue pas significativement la similarité du signal vibratoire avec les vibrations ressenties pendant le jeu (en comparaison avec le signal vibratoire contenant les fréquences des modes de structure, par les participants, voir chapitre 5, page 91). De plus, la fonction de transfert (nécessaire à la reproduction des vibrations) est directement liée aux modes de structure et pourrait ne pas être nécessaire dans les questions de perception des vibrations.

La question principale posée dans ce chapitre est la suivante : les différences entre des signaux issus de l'accéléromètre ou du micro sont-elles perceptibles quand il s'agit de vibration ? À travers une expérience interrogeant la capacité des guitaristes à distinguer des signaux vibratoires complexes, l'objectif est de simplifier le montage expérimental. Dans le présent chapitre, il est décidé de comparer entre eux des signaux générés depuis la tête de la guitare (figure 6.1) :

- **Acc** Signal basé sur la mesure des vibrations à l'accéléromètre ;
- **FT** Signal basé sur la mesure des vibrations à l'accéléromètre avec application de la fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre. Ce signal permet de reproduire les vibrations sur le manche de la manière la plus fidèle possible au signal tel qu'il serait mesuré au niveau de la main du guitariste ;
- **Pickup** Signal basé sur la mesure au micro.

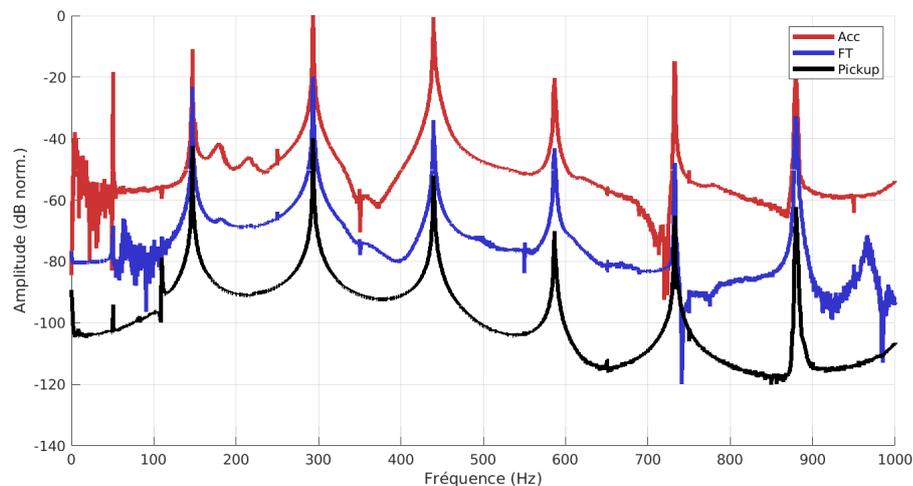


FIGURE 6.1 – Spectre des trois types de signaux (**Acc**, **FT**, **Pickup**), décalés de 20 dB pour faciliter la lecture, avec la note Si_1 (corde 5, case 2, 123,5 Hz).

Dans le test présenté dans ce chapitre, la comparaison des signaux est effectuée dans deux conditions :

- **Sans Jeu**, où, comme dans le chapitre précédent, les vibrations sont déclenchées en appuyant sur un bouton. Le guitariste est en position de jeu, mais ne pince pas les cordes en même temps que les vibrations sont envoyées.

- **Avec Jeu**, où c'est le pincement des cordes par le guitariste qui déclenche les vibrations supplémentaires.

Un test triangulaire² est effectué pour étudier si les guitaristes font la différence entre les signaux en situation de jeu. S'il s'avère que les guitaristes ne font pas de différence particulière entre les signaux, il sera considéré que l'utilisation du signal micro (**Pickup**) de la guitare permet de générer un signal vibratoire au même titre que l'utilisation d'un accéléromètre.

Hypothèses

Dans ce chapitre, un certain nombre d'hypothèses sont étudiées :

- Les guitaristes sont plus performants (ils identifient bien le signal différent des autres) **Sans Jeu** qu'**Avec Jeu**. Dans le premier cas, seuls les signaux injectés sont à analyser par les guitaristes. Dans le deuxième cas, ils doivent se concentrer sur le fait de jouer, et le signal injecté va s'ajouter au retour vibratoire de l'instrument. C'est une situation plus difficile pour la perception des signaux vibratoires.
- Il n'y a pas de différence perceptible entre **FT** (signal de l'accéléromètre avec application d'une fonction de transfert) et **Pickup** (le signal du micro). Cette hypothèse suit les suggestions du chapitre 5, où la présence des fréquences de quelques partiels pourrait suffire à la perception de vibrations similaires à celles rencontrées en situation de jeu.
- Il n'y a pas de différence perceptible entre **FT** et **Acc** (signal de l'accéléromètre seul). Des différences de niveau entre les modes de structure (ce sera la principale différence entre **Acc** et **FT**) ne devraient pas être perceptibles, car les guitaristes (voir chapitre 5, page 91) ne sont pas sensibles aux modes de structure.
- Il n'y a pas de différence perceptible entre **Pickup** et **Acc**. Les différences entre un signal d'origine vibratoire et le signal du micro sont trop faibles pour être perçues, car les amplitudes au niveau des fréquences des modes de structure sont bien plus faibles que les amplitudes aux fréquences des partiels (plus de 20 dB de moins).
- Les distinctions sont plus faciles à faire sur les cordes graves que sur les cordes aiguës. Les cordes graves résonnent plus longtemps que les cordes aiguës. De plus, il y a davantage d'énergie autour du pic de sensibilité pour les cordes graves (il y a des partiels autour de 250 Hz), alors que pour les cordes aiguës la fréquence du fondamental dépasse 250 Hz, et est donc moins perceptible.

Ainsi, l'objectif de ce chapitre est d'étudier si l'on peut s'émanciper des mesures avec un accéléromètre pour générer les signaux vibratoires à injecter, tout en continuant à proposer une expérience similaire à celle à laquelle les guitaristes sont habitués. La section 6.2 décrit l'expérience menée pour vérifier ces hypothèses, les résultats en sont présentés en section 6.3.

6.2 Méthode

6.2.1 Montage expérimental

Pour cette expérience, les mesures des vibrations sont effectuées avec un accéléromètre *B&K 4393* ($0,316 \text{ pC}/\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$, $2,4 \text{ g}$), placé derrière le manche (voir figure 6.2), et un conditionneur

2. Le test triangulaire est un test classique en analyse sensorielle [E18] et adapté à la problématique de ce chapitre. Pour ce test, trois signaux sont systématiquement présentés aux guitaristes, deux d'entre eux sont identiques et un troisième est différent des deux autres. Il est demandé aux guitaristes d'identifier le signal différent des deux autres.

B&K 2626 sur une guitare *Squier Classic Vibe '50s Telecaster*. La génération de vibrations est faite avec un vibreur *Dayton Audio DAEX25CT-4* (diamètre 25 mm, 10 W, 4 Ω), placé sur la tête de la guitare (voir figure 6.2) et connecté à un amplificateur *Audiophonics TPA-S25* (2x45 W, 4 Ω). Il a été préféré au vibreur *Dayton Audio DAEX19CT-4* (diamètre 19 mm, 5 W, 4 Ω) utilisé dans le chapitre 5, car ce dernier ne permettait pas un niveau de vibration suffisant pour être ressenti en situation de jeu. Pour que les guitaristes soient bien focalisés sur la perception des vibrations, il leur a été fourni des bouchons d'oreilles avec un casque audio diffusant du bruit (bruit blanc filtré avec un passe-bas à 1000 Hz d'ordre 6 généré avec *Pure Data*). Il a été demandé aux guitaristes de confirmer qu'ils n'entendaient ni la guitare en jouant, ni le son dû aux vibrations générées avec le vibreur. Lors de l'expérience, les guitaristes sélectionnaient les signaux avec une interface MIDI *Novation Launchpad Pro*.



FIGURE 6.2 – Positions, indiquées par les cercles rouges, du vibreur et de l'accéléromètre pendant l'étape de mesure.

6.2.2 Mesures

Dans cette première étape de l'expérience, les mesures sont effectuées à l'accéléromètre et au micro sur six notes choisies (les mêmes notes que dans le chapitre 5, voir tableau 6.1). L'ensemble de ces mesures sont effectuées avec le logiciel *Matlab*.

Corde	Case	Fréquence	Note
1	4	415,3 Hz	Sol# ₃
2	3	293,7 Hz	Ré ₃
3	2	220,0 Hz ^{*1-2}	La ₂
4	0	146,8 Hz ^{*3}	Ré ₂
5	2	123,5 Hz	Si ₁
6	0	82,4 Hz ^{*1}	Mi ₁

TABLEAU 6.1 – Les notes choisies pour l'expérience. Une note a été choisie par corde, en haut du manche sur les premières cases. La présence de * indique la coïncidence des fréquences d'un partiel de la note avec au moins une fréquence d'un mode de structure (différence inférieure à 5 Hz), selon qu'il s'agit du fondamental (¹) ou d'un des partiels suivants (² ou ³).

Pour la mesure de la fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre, il est demandé à chaque guitariste de tenir la guitare pendant les 15 secondes de mesure, en position de jeu (voir figure 6.3) et en étouffant les cordes avec la main droite.

Pendant la mesure, on effectue avec le vibreur un balayage fréquentiel de 15 secondes allant de 10 Hz à 1000 Hz. Même si l'on utilise des signaux vibratoires ne dépassant pas 1000 Hz, la

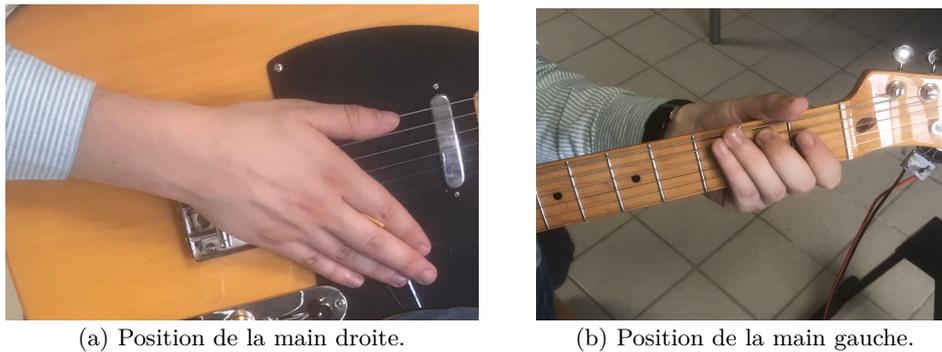


FIGURE 6.3 – Position des mains d'un guitariste pendant la mesure de la fonction de transfert. La main droite étouffe les cordes.

fréquence d'échantillonnage choisie est 44100 Hz, car le traitement vibratoire et le traitement audio de l'expérience du chapitre 7 sont faits sur le même logiciel, *Pure Data*. Le traitement audio nécessite un échantillonnage à 44100 Hz, et il n'y a pas de contre-indication à utiliser cette même fréquence pour les vibrations (même s'il n'est, dans l'absolu, pas nécessaire d'avoir une fréquence d'échantillonnage aussi élevée).

L'accéléromètre est placé dans le plan normal à la guitare et systématiquement au dos du manche au niveau de la 4^e frette, car l'expérience du chapitre 5 a montré des différences importantes pour certaines fréquences dans les fonctions de transfert (voir le détail dans l'annexe F). Ainsi placé, l'accéléromètre est au même endroit pour chaque mesure et reste proche de la main tenant le manche. Il ne gêne pas les guitaristes pendant les mesures, car les notes à enregistrer sont toutes situées en haut du manche. L'accéléromètre est ensuite retiré pour l'évaluation des signaux.

6.2.3 Normalisation de signaux vibratoires

Dans l'expérience du chapitre 5, les différents signaux ont été numériquement normalisés en énergie. La normalisation devait permettre de s'assurer que les participants ne fondent pas leur jugement sur des différences de niveau. Or, près de la moitié des participants ont révélé s'être appuyés sur des différences d'« intensité » entre certains signaux évalués, certains participants se plaignant même de ne pas ressentir certains signaux.

Pour limiter cet effet dans l'expérience de ce chapitre, la normalisation en énergie des différents signaux a été faite manuellement pour les signaux de chaque participant. Il est classique de demander à des participants (expérimentés) de faire cette étape de normalisation de manière subjective [Fon+15; Tar+09; Tar+08]. Comme cette étape devait être effectuée pour chaque participant, il a été décidé que la normalisation serait effectuée par l'expérimentateur.

La normalisation dans l'expérience de ce chapitre suit l'ordre suivant :

1. Normalisation des signaux entre eux pour une note donnée, sans jeu ;
2. Normalisation par note pour la cohérence de l'énergie d'une corde à l'autre ;
3. Vérification de la normalisation en situation de jeu.

6.2.4 Évaluation des signaux

Les guitaristes poursuivent alors avec la partie d'évaluation de l'expérience, avec l'interface MIDI présentée figure 6.4. Cette partie consiste en un test triangulaire (voir [E18] pour une

présentation de la méthode). Dans ce test, 3 signaux (ici nommés A, B et C) sont proposés aux participants. Parmi ces trois signaux, deux sont identiques et un troisième se distingue des deux autres. Il est demandé aux guitaristes d'identifier celui des trois qu'ils pensent être différent des deux autres. Il s'agit d'un choix forcé, car même s'ils répondent au hasard, les participants doivent choisir l'un des trois signaux. Une bonne réponse des guitaristes implique qu'ils aient identifié le signal se distinguant des deux autres, sauf si, par hasard, ils ont choisi la bonne réponse, malgré le fait de ne pas distinguer le signal différent. Cela arrive avec une probabilité de $1/3$ dans le cas où aucune différence n'est perceptible.



FIGURE 6.4 – Interface MIDI *Novation Launchpad MIDI* avec laquelle les guitaristes interagissent. En haut, le numéro de la note à jouer est indiqué (de 1 à 6), les boutons au milieu en rouge ou en vert permettent de choisir le signal généré (A, B ou C) et les boutons en jaune en dessous permettent aux guitaristes de répondre en déterminant le signal qu'ils pensent être différent des autres. Les boutons en bas à gauche indiquent le mode de déclenchement des signaux (voir l'explication de la *Phase* dans cette section), et le bouton en bas à droite permet d'enregistrer la réponse pour passer aux signaux suivants.

Les différents signaux à comparer sont les suivants :

- **Acc**, le signal mesuré à l'accéléromètre est directement ré-injecté à l'aide du vibreur.
- **FT**, le signal mesuré à l'accéléromètre est divisé par la fonction de transfert calculée (ce qui correspond à la manière décrite dans le chapitre 5) et ré-injecté à l'aide du vibreur.
- **Pickup**, le signal mesuré au micro est ré-injecté à l'aide du vibreur.

Durant l'expérience, les guitaristes ont eu systématiquement à répondre qui de A, B ou C était différent des deux autres. Chaque participant a effectué 72 évaluations. Le test est divisé en deux grandes parties (*Phase*), où le mode de déclenchement des signaux est différent d'une partie à l'autre. Dans chaque phase, les évaluations sont effectuées sur six notes différentes. Pour chaque note, les guitaristes comparent six fois les signaux A, B et C. Derrière ces trois signaux, il y a des combinaisons de **Acc**, **FT** et **Pickup**, par exemple deux fois le signal **Acc** et une fois le signal **FT**, ou deux fois le signal **FT** et une fois le signal **Acc**.

Les différentes conditions de l'expérience sont alors au nombre de trois :

- *Phase*, avec 2 phases : **Sans Jeu**, où le guitariste n'excite pas lui-même les cordes et déclenche le signal au moment même d'appuyer sur le bouton (A, B ou C). Pour la condi-

tion **Avec Jeu**, le guitariste choisit le signal en appuyant sur le bouton et c'est au moment où il excite la corde sur la note imposée que les vibrations sont générées. La latence est suffisamment faible pour que les guitaristes associent l'ajout de vibration au retour vibratoire de l'instrument. L'ordre de présentation de la *Phase* est inversé d'un participant à l'autre.

- *Note*, avec 6 notes : une note par corde, numérotée de 1 à 6 (correspondant au numéro des cordes, voir tableau 6.1). L'ordre de présentation de chaque *Note* est aléatoire.
- *Signal*, avec 3 types de signaux : **Acc**, **FT**, **Pickup**. L'ordre de présentation est aléatoire. Il sera considéré que les paires de signaux sont présentées par triade (deux signaux identiques et un différent des deux autres).

6.3 Résultats

11 guitaristes ont participé à l'expérience, dont 10 hommes et 1 femme. Parmi les guitaristes, un seul participant est gaucher. Les participants sont âgés de 21 à 59 ans avec une expérience de pratique de la guitare variant de 2 à 18 ans.

Pour chaque évaluation à la présentation de trois signaux (nommés A, B et C), soit le participant a bien identifié le signal différent et sa réponse est considérée comme correcte, soit le participant a sélectionné un des deux autres signaux et sa réponse est considérée comme fausse. L'analyse des résultats prend en compte le nombre de bonnes réponses pour chaque triade de signaux pour conclure s'il y a des différences perceptibles entre les 3 types de signaux.

6.3.1 Facteurs et interactions

Il y a 4 facteurs à prendre en compte dans l'analyse : les facteurs *Note* (les 6 notes), *Phase* (**Sans Jeu** ou **Avec Jeu**), *Participant* (de P1 à P11) et le facteur *Paire*. Le facteur *Paire* est divisé en 6 possibilités³ :

- **Acc-FT 2** : la triade est composée de **Acc** comme intrus et de deux fois **FT** ;
- **Acc 2-FT** : la triade est composée de **FT** comme intrus et de deux fois **Acc** ;
- **Acc-Pickup 2** : la triade est composée de **Acc** comme intrus et de deux fois **Pickup** ;
- **Acc 2-Pickup** : la triade est composée de **Pickup** comme intrus et de deux fois **Acc** ;
- **FT-Pickup 2** : la triade est composée de **FT** comme intrus et de deux fois **Pickup** ;
- **FT 2-Pickup** : la triade est composée de **Pickup** comme intrus et de deux fois **FT**.

Chacun des onze participants a évalué les six paires, pour les six notes et les deux phases (72 évaluations par participant). Chaque évaluation fournit une bonne réponse (si le participant a identifié le signal différent) ou une mauvaise réponse (si le participant n'a pas identifié le signal différent).

6.3.1.1 Tests sur les interactions

Pour comparer le nombre de bonnes réponses en fonction des signaux proposés et ainsi évaluer les résultats du facteur *Paire*, il faut d'abord vérifier si le modèle nécessite de prendre en compte les interactions entre les facteurs. Le test adapté pour l'interaction est le test de *Likelihood Ratio* (LR), ou test du rapport des vraisemblances, tel que l'a décrit Fox [Fox15, page 346]. Le test de LR permet d'identifier les facteurs significatifs et les interactions (entre les facteurs)

3. Il y a 6 possibilités, et pas seulement 3 (**Acc-FT**, **Acc-Pickup** et **FT-Pickup**), pour la validité des tests binomiaux de la section 6.3.2.

significatives. Si un facteur ou une interaction est significative, il doit être conservé dans le modèle final à étudier. Le modèle final est construit pas à pas, en testant l'ajout d'une interaction ou la suppression d'un facteur. Le test de LR permet la comparaison de deux modèles. Le premier test effectué (voir tableau 6.2) compare un premier modèle, qui met en œuvre tous les facteurs (*Participant*, *Phase*, *Note* et *Paire*) et l'interaction *Phase/Participant*, avec un deuxième modèle qui met en œuvre les mêmes facteurs, mais sans l'interaction. Si le test LR est significatif⁴, alors l'interaction est significative et doit être prise en compte dans le modèle complet. Pour l'interaction *Phase/Participant*, ce n'est pas le cas. La comparaison suivante concerne alors d'une part un modèle qui met en œuvre tous les facteurs et l'interaction *Phase/Paire*, et d'autre part un modèle sans cette interaction. Le test révèle que l'interaction n'est pas significative, donc n'est pas à prendre en compte dans le modèle. Une interaction significative (comme *Paire/Note*) doit être prise en compte dans le modèle, car le test révèle que la proportion de bonnes réponses par note est dépendant de la paire étudiée.

	p-value (test LR)
Interaction	
<i>Phase/Participant</i>	0,265
<i>Phase/Paire</i>	0,3241
<i>Phase/Note</i>	0,9609
<i>Paire/Participant</i>	0,06675
<i>Paire/Note</i>	0,000286 *
<i>Participant/Note</i>	$4,574 \times 10^{-6}$ *
Facteur	
<i>Phase</i>	0,001296 *

TABLEAU 6.2 – Résultats des tests LR (*Likelihood Ratio*) sur les interactions entre les facteurs, et sur le facteur *Phase*. La présence de * signifie que le test montre une interaction significative ou un facteur significatif ($p\text{-value} < 0,05$). Comme les facteurs *Note*, *Participant* et *Paire* interviennent dans des interactions significatives, il n'est pas utile de regarder le résultat du test sur le facteur. Si l'on souhaite savoir s'il y a un effet du facteur *Paire* par exemple, alors il faudra le faire séparément par note. Si un facteur est impliqué dans une interaction, on garde le facteur dans le modèle.

6.3.1.2 Test sur les facteurs

Le modèle doit donc contenir les interactions *Participant/Note* et *Paire/Note*. Une fois les tests sur les interactions effectués, les tests sont effectués sur les facteurs. Chaque facteur impliqué dans une interaction significative doit être présent dans le modèle. Cela impose la conservation des facteurs *Participant*, *Note* et *Paire*. Le seul facteur n'étant pas impliqué dans une interaction significative est le facteur *Phase*. Un nouveau test de LR est donc effectué, entre un modèle comportant tous les facteurs et les interactions significatives précédemment identifiées et un modèle comportant les mêmes éléments sans le facteur *Phase*. Le résultat du test de LR indique que

4. Comme dans les autres chapitres, le terme « significatif » est directement emprunté au domaine des statistiques. Un test est statistiquement significatif lorsque le risque quantifié de se tromper, nommé p-value, est inférieur à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ (valeur classique), autrement appelé « erreur de type I ». Pour tout type de test, affirmer qu'un facteur, une interaction ou une différence sont significatifs se déduit d'une p-value inférieure à $\alpha = 0,05$. À l'inverse, une différence ne sera pas significative si la p-value du test est supérieure à 0,05.

le facteur *Phase* est significatif, il doit donc être conservé dans le modèle. Pour l'interprétation, cela veut dire que les conditions **Avec Jeu** et **Sans Jeu** sont significativement différentes.

En résumé : les interactions entre les facteurs sont étudiées et présentées dans le tableau 6.2. Les interactions avec la *Phase* ne sont pas significatives. Il y a une interaction significative entre *Participant* et *Note*. L'interaction *Note/Paire* est significative et à considérer dans le modèle. Les différences perçues entre les signaux d'une paire doivent être analysées séparément par note.

Les interactions *Paire/Note* et *Participant/Note* sont également significatives. Dans ces conditions, seul le facteur *Phase* n'est pas impliqué dans des interactions significatives. Le tableau 6.2 montre que ce facteur est significatif pour le modèle. La probabilité de reconnaître le signal différent des autres dépend de la phase de jeu (**Avec Jeu** ou **Sans Jeu**).

6.3.1.3 Comparaison par *Phase*

Les guitaristes de l'expérience ont trouvé, dans chaque triade, le signal différent des autres dans 62,6 % des cas pour la phase **Sans Jeu**, contre 52,5 % pendant la phase **Avec Jeu**. Cette différence est significative, comme montré dans le tableau 6.2 (p-value = 0,001296). La phase **Avec Jeu** est donc plus difficile que la phase **Sans Jeu** pour les guitaristes, lors d'une tâche de distinction des stimuli vibratoires. Cela s'explique par le fait de jouer en même temps que de chercher à ressentir les vibrations, et par la présence systématique des vibrations induites par le jeu. Les guitaristes sont concentrés sur leur geste en plus de la concentration sur les vibrations, ce qui est particulièrement inhabituel. Le signal à analyser dans la *Phase Avec Jeu* contient les vibrations générées, additionnées au retour vibratoire de l'instrument.

6.3.2 Taux de bonnes réponses

Le modèle final contient les facteurs *Participant*, *Phase*, *Note* et *Paire*, ainsi que les interactions *Participant/Note* et *Paire/Note*. Un des objectifs majeurs de cette expérience est de déterminer si les guitaristes distinguent les signaux vibratoires **FT** et **Pickup**. Le facteur *Paire* est impliqué dans une interaction significative, avec le facteur *Note*. Les résultats de *Paire* sont donc dépendants de *Note*, le modèle doit être divisé par *Note* pour étudier les paires. Le facteur *Phase* étant significatif, les conditions **Avec Jeu** et **Sans Jeu** sont également étudiées séparément.

Finalement, chaque paire doit être étudiée en fonction des notes et de la phase. Pour chaque paire, il y a donc une évaluation par participant. Il faut savoir alors si le nombre de bonnes réponses pour chaque condition (11 évaluations, pour une *Phase*, une *Note* et une *Paire* données) est suffisant pour conclure à une différence perceptible significative entre les signaux d'une paire. Un test adapté à cette étude est le test binomial (méthode classique pour un test triangulaire). Les tests binomiaux sont réalisés à titre indicatif et exploratoire. Les tests permettent d'avoir une idée dans quel cas il faut envisager qu'une différence est perceptible et dans quel cas il semble qu'une différence n'est pas perceptible.

Un test binomial exact⁵ est réalisé par *Paire*, par *Note* et par *Phase*. Au total, c'est donc 72 tests binomiaux qui sont effectués⁶, prenant chacun en compte 11 évaluations.

5. La loi binomiale s'exprime ainsi : $P(C = k) = \binom{N}{k} p^k (1 - p)^{N-k}$, avec P la p-value, C est la variable aléatoire, k est le nombre de réponses correctes pour un nombre N de réponses données et $p = \frac{1}{3}$ est la probabilité de succès avec une réponse au hasard. Si la p-value est inférieure à 0,05, on peut conclure qu'il y a une différence perceptible.

6. Considérant que les 72 comparaisons effectuées par chaque guitariste ne sont pas indépendantes, il faudrait appliquer une correction de Bonferroni aux tests binomiaux. Cette correction étant très sévère, elle empêche de voir un quelconque effet sur nos données. De plus, l'objectif est d'identifier les cas d'absence de perception de la différence. La correction de Bonferroni aura alors pour impact de trouver bien plus de cas, pour lesquels il

Le tableau 6.3 présente le taux de bonnes réponses des participants pour chaque condition, et le tableau 6.4 fait la synthèse des résultats des tests binomiaux (le détail des tests binomiaux est décrit en annexe I). On ne pourra pas conclure que la différence est perceptible pour les valeurs 0 (en gras dans le tableau). Chaque 2 dans le tableau 6.4 donne une indication sur une différence perceptible, et chaque 0 sur une absence éventuelle de différence (0 ne signifie pas que l'absence de différence est prouvée). Chaque 1 représente un cas intermédiaire pour l'interprétation des résultats. En effet, sur les deux tests binomiaux des paires contenant les mêmes signaux (par exemple, les triades **Acc-FT 2** et **Acc 2-FT** contiennent les signaux **Acc** et **FT**) l'un amène à la conclusion que la différence entre les signaux est perceptible (sans la correction de Bonferroni), alors que l'autre ne permet pas de conclure quant à la perception de la différence entre les signaux.

A la place de dire que le "1" pose problème, je suggère de dire qu'on se trouve dans un cas intermédiaire. "2" donne une indication sur une différence perceptible, "0" sur une absence éventuelle de différence, et "1" est intermédiaire. De toute manière, "0" ne signifie pas qu'on a prouvé l'absence.

	Acc-FT	Acc-Pickup	FT-Pickup
Sans Jeu			
Note 1	50,00	77,27	63,64
Note 2	68,18	63,64	45,45
Note 3	27,27	68,18	68,18
Note 4	90,91	72,73	54,55
Note 5	68,18	72,73	54,55
Note 6	54,55	68,18	59,09
Avec Jeu			
Note 1	50,00	54,55	45,45
Note 2	50,00	40,91	45,45
Note 3	27,27	45,45	54,55
Note 4	63,64	63,64	36,36
Note 5	54,55	77,27	31,82
Note 6	45,45	81,82	77,27

TABLEAU 6.3 – Pourcentage de bonnes réponses des participants par *Paire*, par *Note* et par *Phase*. Les valeurs du tableau correspondent au nombre de bonnes réponses divisé par le nombre total de tests (22 comparaisons par condition, 2 répétitions par participant et 11 participants).

La difficulté de la phase **Avec Jeu** par rapport à la phase **Sans Jeu** est globalement confirmée. Il y a une diminution des différences perceptibles dans tous les cas, sauf pour la note 6 et quand les signaux **FT** et **Pickup** sont présents.

Il a été globalement plus difficile pour les guitaristes de distinguer les signaux sur les trois notes aiguës que sur les trois notes graves, ce qui confirme une des hypothèses de départ.

6.3.2.1 Sans Jeu et Acc-FT

Pour la condition **Sans Jeu** (*Phase*) et **Acc-FT** (*Paire*), les différences entre les signaux sont généralement perceptibles, sauf pour les notes 3 et 6, pour lesquelles il n'est pas possible de conclure. Ces deux notes ont la particularité d'avoir leur fréquence fondamentale à proximité

n'y a pas de différence perceptible. Ceci étant, l'annexe I contient les résultats des mêmes tests binomiaux, avec correction de Bonferroni

	Acc-FT	Acc-Pickup	FT-Pickup
Sans Jeu			
Note 1	1	2	2
Note 2	2	1	0
Note 3	0	1	2
Note 4	2	2	1
Note 5	2	2	1
Note 6	0	2	1
Avec Jeu			
Note 1	0	0	0
Note 2	1	0	0
Note 3	0	0	1
Note 4	2	1	0
Note 5	1	2	0
Note 6	0	2	2

TABLEAU 6.4 – Synthèse des résultats des tests binomiaux par *Paire*, par *Note* et par *Phase*. Les valeurs du tableau correspondent au nombre de tests binomiaux avec une p-value inférieure à 0,05 sur les 2 paires de chaque binôme. Par exemple, les paires **Acc-FT 2** et **Acc 2-FT** font partie du binôme **Acc-FT**. Si la valeur dans le tableau est 2, alors la p-value est inférieure à 0,05 pour chacune des deux paires, donc les signaux sont perçus comme différents. Si la valeur est 1, alors une des deux paires donne une p-value inférieure à 0,05, l'autre une p-value supérieure à 0,05. Enfin, si la valeur est 0 (en gras, car mettant en valeur que les signaux du binôme ne sont pas différenciés par les guitaristes), alors les 2 paires donnent des tests binomiaux avec des p-values supérieures à 0,05.

de la fréquence d'un mode de structure. Ce résultat suggère que les guitaristes percevraient moins de différence entre les signaux qui sont les plus susceptibles de contenir des différences aux fréquences des modes de structure. Ce résultat constitue une confirmation supplémentaire du fait que les guitaristes ne seraient que peu sensibles aux fréquences des modes de structure.

6.3.2.2 Sans Jeu et Acc-Pickup

Pour la condition **Sans Jeu** et **Acc-Pickup**, la différence entre les signaux est perceptible dans presque tous les cas. Cette différence est moins perceptible pour les notes 2 et 3 que pour les autres notes. Les guitaristes sont sensibles aux différences entre les signaux du micro et les signaux d'origine purement vibratoire.

6.3.2.3 Sans Jeu et FT-Pickup

Dans la condition **Sans Jeu** et **FT-Pickup**, les résultats sont très différents d'une note à l'autre. Pour la note 2, on ne peut pas conclure qu'il y a une différence perceptible. Pour les notes 1 et 3, les différences sont perceptibles. Pour les notes 4, 5 et 6, les différences ne sont pas toujours perceptibles.

6.3.2.4 Avec Jeu et Acc-FT

La condition **Avec Jeu** et **Acc-FT** conforte notre hypothèse. Sur les 3 notes pour lesquelles il n'est pas possible de conclure qu'il y a une différence perceptible, la fréquence fondamentale de deux d'entre elles (notes 3 et 6) coïncide avec les fréquences des modes de structure. C'est encore une preuve que les musiciens ne perçoivent pas les fréquences de structure.

Les différences entre **Acc-FT** pour chaque phase (**Avec Jeu** et **Sans Jeu**) sont le moins perceptible quand la fréquence fondamentale de la note est proche des fréquences des modes de structure.

6.3.2.5 Avec Jeu et Acc-Pickup

Pour la condition **Avec Jeu** et **Acc-Pickup**, il y aurait une plus grande facilité à faire les distinctions dans le grave que dans l'aigu. En effet, on ne peut pas conclure qu'il y a une différence perceptible pour les trois notes aiguës, contrairement aux notes plus graves. Cela confirme l'hypothèse que les différences sont plus facilement perceptibles sur les notes graves que sur les notes aiguës.

6.3.2.6 Avec Jeu et FT-Pickup

La condition **Avec Jeu** et **FT-Pickup** permet de montrer que, dans la plupart des cas, la différence entre la réinjection des vibrations à partir de la mesure à l'accéléromètre avec la prise en compte de la fonction de transfert d'une part et le signal micro d'autre part n'est pas perceptible. Pour 4 notes sur les 6 (1, 2, 4 et 5), on peut conclure à une différence non perceptible. Pour la note 6, la différence est nettement perceptible. Pour la note 3, la différence n'est pas systématiquement perceptible. Il est donc tout sauf évident pour les musiciens de faire la différence entre l'utilisation de l'accéléromètre et l'utilisation directe du micro.

6.4 Conclusion

L'expérience présentée dans ce chapitre a permis de clarifier les différences perceptibles entre les signaux vibratoires issus de mesures à l'accéléromètre (**Acc**), ceux issus de mesures au micro (**Pickup**) et ceux issus de mesures à l'accéléromètre avec la prise en compte de la fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre (**FT**). Les comparaisons entre signaux ont été effectuées selon que les guitaristes jouaient ou non, sur différentes notes.

Les hypothèses faites en début de chapitre ont été discutées :

- Les guitaristes sont plus performants (ils identifient le signal différent des autres) **Sans Jeu** qu'**Avec Jeu**. Le fait de jouer en même temps qu'analyser les vibrations est une tâche complexe et inhabituelle. Cette hypothèse est confirmée.
- Pour plusieurs notes dans la phase **Avec Jeu**, rien ne permet de conclure qu'il y a une différence perceptible entre **FT** et **Pickup**. Cette hypothèse est généralement confirmée.
- Entre **FT** et **Acc**, rien ne permet de conclure qu'il y a une différence perceptible pour les notes dont la fréquence du fondamental est proche de celle d'un des modes de structure. Cette hypothèse est invalidée dans la plupart des cas.
- Il y a des différences perceptibles entre **Pickup** et **Acc**. Les guitaristes sont donc capables de différencier, en vibrations, un signal de l'accéléromètre d'un signal du micro. Il n'y a pas de différence perceptible dans la phase **Avec Jeu** pour les notes aiguës. Cette hypothèse n'est confirmée que pour les notes aiguës.
- Les distinctions sont plus faciles à faire sur les cordes graves que sur les cordes aiguës. Cela se vérifie pour toutes les conditions, à l'exception de la comparaison **FT** et **Pickup** pour la phase **Sans Jeu**. Cette hypothèse est vérifiée.

Les guitaristes n'ont pas su différencier systématiquement les signaux **FT** et **Pickup**. Comme dans certaines conditions ils parviennent à différencier les signaux, l'analyse du retour vibrotactile et de la perception de ce retour nécessite la présence de l'accéléromètre. Dans les cas où une différence est perçue (minorité des cas), il n'est pas certain que **FT** soit plus similaire au retour vibrotactile que **Pickup**. Dans les autres cas, où il n'a pas été montré qu'une différence est perçue (majorité des cas), le signal **Pickup** peut être considéré comme « assez similaire » au retour vibrotactile en situation de jeu, au même titre que le signal **FT**. Ainsi, dans l'objectif d'augmenter la guitare en vibration, rien n'interdit d'utiliser le signal **Pickup** plutôt que **FT**.

Les participants étaient moins influencés par des différences d'intensité pendant l'expérience, mais certains ont quand même comparé les signaux sur la base de différences d'intensité. La normalisation des signaux s'avère donc très délicate. Une autre piste, qui n'a pas été testée dans le cadre de ce travail, est de faire l'étape de normalisation en utilisant une pondération basée sur la perception de l'amplitude des vibrations (la perception de l'amplitude des vibrations a été mesurée par Verrillo [VFS69]).

Modification des vibrations en situation de jeu

Sommaire du présent chapitre

7.1	Expérience	115
7.1.1	Configuration	115
7.1.2	Modification des retours sensoriels	115
7.1.3	Tâche des participants	117
7.2	Analyse	118
7.3	Résultats	119
7.3.1	Identification du retour vibrotactile	119
7.3.2	Utilisation de l'interface	120
7.3.3	Verbalisations	121
7.4	Conclusion	123

Les chapitres 5 et 6 m'ont permis de montrer que les stimuli et le protocole expérimental de génération de vibrations (contenant l'intégralité du spectre et contenant les informations sur la vibration de la corde et de la structure) en situation de jeu pouvaient être simplifiés. Malgré certaines conditions non écologiques¹, il n'a pas pu être montré que des signaux ne contenant que les fréquences des trois premiers partiels étaient perçus avec un niveau différent de similarité que celui auquel étaient perçus des signaux contenant l'intégralité du spectre et contenant les informations sur la vibration de la corde et de la structure². De plus, en situation de jeu, il a été observé que les guitaristes ne faisaient pas une distinction systématique entre signaux, qu'ils soient fidèlement reproduits ou qu'ils proviennent du micro.

Ces résultats sont utilisés dans ce chapitre, pour l'élaboration d'un test perceptif avec modification de vibration, mais également pour l'élaboration d'un test avec modifications sonores

1. Masquage de l'audition par un casque avec du bruit blanc, notes préalablement choisies et présence de l'accéléromètre sur le manche.

2. Cette génération de vibrations est présentée dans l'annexe F comme étant l'utilisation du signal d'accélération avec application d'une fonction de transfert entre la position du vibreur et la position de l'accéléromètre près de la main des guitaristes.

et visuelles³. En effet, lors de l'étude des phénomènes d'intégration multisensorielle tel que le jeu d'un instrument, la question de la contribution (relative) des différents sens sur l'évaluation globale de l'instrument est pertinente. Pour répondre à cette question, il est envisagé dans ce chapitre de contrôler certains retours sensoriels, à savoir auditif et vibrotactile, indépendamment des autres types de retour.

Sur la base des données des travaux de Navarret [Nav13] et Paté [Pat+12; Pat+15], il est fait l'hypothèse que voir et toucher un instrument de musique déclenche des références à des expériences antérieures et a une influence sur les attentes des musiciens.

La perception de l'amplitude des vibrations est-elle affectée par un effet audio ? Le musicien adapte-t-il son geste au retour vibratoire de l'instrument ? Le test approfondi de ces questions nécessiterait une configuration expérimentale robuste et des enquêtes plus systématiques et paramétriques, et dépasserait donc le cadre de ce chapitre. Je fais ici une synthèse des éléments étudiés pour décrire la perception du retour vibrotactile et franchir une première étape vers l'évaluation de la faisabilité et de la validité écologique de la modification du retour auditif et du retour vibrotactile d'un instrument de musique, en l'occurrence la guitare électrique.

Ainsi, le but de l'étude menée dans ce chapitre est :

- a. de tester la modification simultanée des retours auditif et vibrotactile ;
- b. d'analyser l'utilisation des catégories de mots de la partie I ;
- c. de recueillir des données qualitatives et de premières tendances en ce qui concerne l'utilisation et l'expression du retour vibrotactile.

Des méthodes sont proposées pour modifier les retours audio et vibrotactile de la guitare électrique, et les guitaristes sont observés lorsqu'ils jouent avec ces retours.

Les modifications vibrotactiles proposées s'inspirent de réalisations dans le domaine des instruments de musique augmentés, par exemple utiliser des capteurs et des actionneurs pour modifier le comportement vibratoire des instruments à cordes [Ben+15] ou des barres de xylophone [BBP15], ou pour exciter des cordes de piano [McP10]. Cette approche a l'avantage de minimiser les modifications des instruments, de préserver leurs qualités sonores et le geste expert des musiciens. Les conclusions des chapitres 5 et 6 valident en partie le fait d'utiliser le signal du micro pour le retour vibrotactile dans ce septième chapitre.

La section 7.1 présente l'expérience, avec la notation suivante pour les retours :

- **A** pour le retour audio ;
- **V** pour le retour vibrotactile.

La section 7.2 présente la méthode d'analyse des données recueillies au cours de l'expérience, et la section 7.3 présente les résultats.

Le travail présenté dans ce chapitre a été rendu possible grâce au projet VITAMIN (VIsual and TActile Modifications of an INstrument). Ce projet a été soutenu par l'IRCICA (Institut de Recherche sur les Composants logiciels et matériels pour l'Information et la Communication Avancée) *via* un financement accordé à Florent Berthaut et Arthur Paté. Ce projet a fait l'objet de plusieurs présentations en conférence et d'articles :

- Une présentation au workshop *Multimodal Augmentation of Haptic Touch Input* (IEEE World Haptics Conference 2021) ;
- Un article soumis le 6 octobre 2022 au *Journal of New Music Research* : Paté Arthur, Cambourian Paul, Berthaut Florent et Légal Boris, "Audio, vibrotactile, and visual augmentation of an electric guitar : A pilot study".

3. Ces dernières modifications avec un retour visuel ne seront pas traitées dans ce chapitre, car le retour visuel sort du cadre du sujet de ce travail de thèse.

- Un article publié suite à la conférence *New Interfaces for Musical Expression 2022* : Arslan Cagan, Berthaut Florent, Beuchey Anthony, Cambourian Paul, Paté Arthur, “Vibrating shapes : Design and evolution of a spatial augmented reality interface for actuated instruments” [Ars+22] (ne relevant pas directement de ce travail de thèse)

7.1 Expérience

7.1.1 Configuration

Une vue schématique détaillée de la configuration expérimentale est donnée dans la figure 7.1. Une guitare électrique *solid body Squier Classic Vibe '50s Telecaster* est utilisée. Son signal de sortie (micro) est envoyé à une interface sonore *Focusrite Scarlett 2i2* (fréquence d'échantillonnage 44100 Hz, 16 bits) et traité par un ordinateur pour la génération du retour audio et du retour vibrotactile. Une sortie de l'interface sonore envoie le signal audio modifié à l'amplificateur *Fender Blues Junior IV Série Hot Rod*. L'autre sortie de l'interface audio envoie le signal vibrotactile vers un vibreur *Dayton Audio DAEX25CT-4* (diamètre 25 mm, 10 W, 4 Ω).

Une interface MIDI *Novation Launch Control XL* (voir figure 7.2) permet à l'utilisateur de contrôler le retour dans les deux modalités, à travers les paramètres décrits dans la section 7.1.2 ci-après. Chaque retour peut être activé et désactivé avec un bouton, sa quantité ou son volume (**A/vol**, **V/vol**) peuvent être contrôlés avec un curseur dédié, et l'effet qui lui est appliqué (**A/eff**, **V/eff**) peut être contrôlé avec un autre curseur.

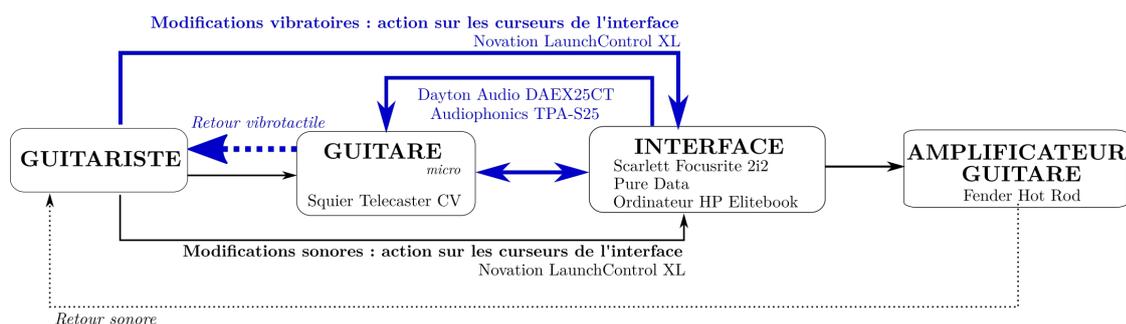


FIGURE 7.1 – Vue schématique de l'expérience, reprise de la figure 1.3, avec le détail du matériel de l'expérience. La chaîne de modification du retour vibrotactile est mise en valeur (traits plus épais en bleu).

7.1.2 Modification des retours sensoriels

Les retours proposés ici sont produits à partir de l'injection directe de signaux synthétisés partageant certains attributs avec le signal de captation (hauteur, évolution temporelle de l'énergie), dans la ligne de l'approche de Berdahl *et al.* [BBS05] et conforme aux résultats des chapitres 5 et 6. Le choix est fait de faire varier les retours audio et vibrotactile de l'instrument en termes de « rugosité ». La rugosité acoustique est généralement associée à l'effet de la modulation d'amplitude dans une plage de fréquence donnée (comme c'est le cas dans les travaux de Daniel et Weber [DW97]), donc à l'application d'une modulation d'amplitude sur le signal du capteur avant injection dans l'amplificateur. La rugosité vibrotactile peut être décrite comme la sensation de se déplacer le long d'une surface plus ou moins régulière, sensation qui a été traduite pour



FIGURE 7.2 – L’interface MIDI utilisée pendant l’expérience. De gauche à droite, les colonnes 1-2, 3-4 contrôlent respectivement le retour audio et le retour vibrotactile. Les curseurs 1 et 3 contrôlent le volume de sortie et les curseurs 2 et 4 contrôlent la quantité d’effet du retour audio et du retour vibrotactile, respectivement. Les boutons situés sous les curseurs activent et désactivent chaque retour, devenant respectivement verts et rouges.

cette expérience en termes de vibrations comme un signal dont la régularité, ou le bruit, varie entre un signal très périodique et une série irrégulière d’impulsions. La rugosité est régulièrement utilisée dans les travaux sur le sens du toucher comme une des dimensions perceptives relative aux textures [ONY13, page 84]. Cependant, le vocable « rugosité » n’a pas été employé par les expérimentateurs avec les participants à l’étude présentée dans ce chapitre, de sorte que ces derniers restent libres de penser (ou non) à cette notion lors de la description de leur expérience, et de trouver (ou non) un lien entre les modalités de retours sensoriels.

Le langage *Pure Data* [Puc96] est utilisé pour générer les retours audio et vibrotactile à partir du signal du micro de la guitare, et pour traiter les actions des participants sur l’interface MIDI.

7.1.2.1 Réglages audio (**A/vol**, **A/eff**)

Le premier réglage du retour audio est un volume audio, appelé **A/vol**. Les valeurs du curseur **A/vol** (entiers de 0 à 127) sont réduites à l’intervalle $[0 : 1]$ avec une progression logarithmique⁴. Une valeur **A/vol** de 0 signifie qu’aucun signal n’est envoyé à l’amplificateur (amplitude nulle), et une valeur de 1 correspond au signal envoyé à l’amplificateur à pleine amplitude.

Le deuxième paramètre est un effet audio connu sous le nom de « trémolo », appelé **A/eff**. La sortie audio envoyée dans l’amplificateur est calculée à partir du signal d’entrée comme une modulation d’amplitude paramétrée avec la valeur F du curseur **A/eff**, réduite à l’intervalle $[0 : 1]$. L’amplitude de la modulation est paramétrée à $0,6F$ (valeurs comprises entre 0 et 0,6), et la fréquence de modulation est paramétrée à $10F^{1/3}$ (valeurs comprises entre 0 et 10 Hz).

L’hypothèse faite ici est qu’avec le curseur **A/eff** réglé au minimum ($F = 0$), le signal correspond à un retour audio « lisse », tandis qu’avec le curseur au maximum ($F = 1$), le signal correspond au retour audio le plus « rugueux » possible.

4. Passage de l’intervalle linéaire à logarithmique avec la formule $x \rightarrow \frac{\log(x+1)}{\log(2)}$ où x représente la valeur du curseur entre 0 et 1.

7.1.2.2 Réglages vibrotactiles (V/vol , V/eff)

Le premier réglage du retour vibrotactile correspond à un volume vibrotactile (V/vol) : comme pour le volume audio, les valeurs du curseur V/vol sont réduites à l'intervalle $[0 : 1]$, avec une progression logarithmique. Comme pour A/vol , une valeur V/vol de 0 signifie qu'aucun signal n'est envoyé au vibreur, et une valeur de 1 signifie que le signal vibratoire à pleine échelle (le plus fort possible) est envoyé.

Le deuxième paramètre est un effet vibrotactile. La fréquence fondamentale f_0 du signal du micro est extraite avec l'objet `fiddle~` [PAZ98] de *Pure Data*. Avec V/eff au minimum, le signal est basé sur les sons de Shepard [She64] avec des fréquences $k \times f_0$ ($k = 1/8, 1/4, 1/2, 1, 2, 4, 8, 16$) et sur une enveloppe spectrale gaussienne centrée à 200 Hz, avec un écart-type de 200 Hz afin de générer un signal sur la plage de sensibilité la plus élevée de la peau humaine [Ver92]. Contrairement aux dispositions prises aux chapitres 5 et 6 :

- le signal généré n'est pas issu des mesures vibratoires, ni d'une copie du signal du micro. Ainsi, une des perspectives du chapitre 5 est explorée, à savoir la génération de signaux sur la base de sinusoides (signal numérique) ;
- le signal ainsi généré n'utilise le micro que pour le calcul de la fréquence fondamentale ;
- les fréquences des sous-harmoniques sont ajoutées. La présence de nombreux harmoniques et sous-harmoniques évitent que les guitaristes ressentent les « sauts » dus à la détection parfois délicate du signal avec `fiddle~`.

Il est fait l'hypothèse que la présence des sous-harmoniques augmente la sensation de vibration. Ce signal est le retour vibrotactile dit « lisse ».

Avec V/eff au maximum, le signal est un train d'impulsions où la largeur et la fréquence des impulsions changent cycliquement (voir figure 7.3). Ce signal correspond au retour vibrotactile dit « rugueux ».

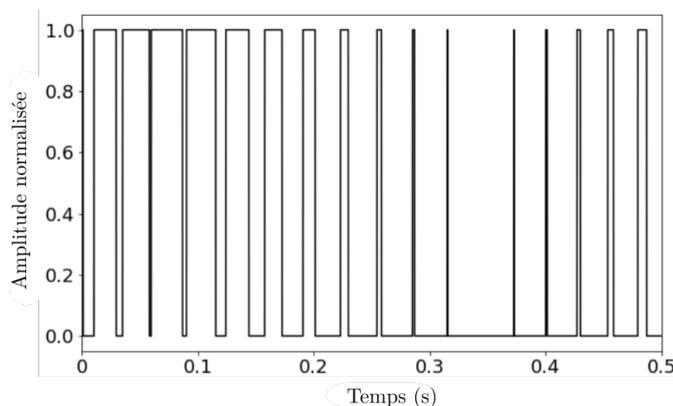


FIGURE 7.3 – Train d'impulsions avec une variation cyclique de la largeur et de la fréquence, utilisé comme signal « rugueux » envoyé au vibreur pour le retour vibrotactile.

Les valeurs du curseur V/eff sont réduites à l'intervalle $[0 : 1]$ et la quantité relative de chaque signal (Shepard et trains d'impulsions) est calculée en fonction des valeurs des curseurs.

7.1.3 Tâche des participants

L'expérience se déroule dans une pièce sans traitement acoustique particulier, et est divisée en deux phases.

La phase 1 consiste en une tâche de jeu libre et de verbalisation libre. Chaque participant se voit présenter la guitare connectée à l'amplificateur. Des instructions minimales sur l'interface de contrôle MIDI sont données (voir les consignes ci-après). Au début, le musicien est invité à régler le bouton de volume de l'amplificateur pour atteindre un niveau sonore qui lui convient. Le musicien est ensuite invité à jouer librement de la guitare, à manipuler librement l'interface de contrôle et à verbaliser ses impressions, ses sentiments, etc. Les expérimentateurs peuvent poser des questions de temps en temps, afin de relancer la conversation, ou demander des explications sur des formulations antérieures du participant. Aucune nouvelle formulation n'est introduite par les expérimentateurs, afin de ne pas influencer la perception du participant. La phase 1 a duré 27 minutes en moyenne (de 9 à 49 minutes). Les consignes de la phase 1 sont :

Voici à présent une interface de contrôle où vous pouvez allumer ou éteindre les retours audio et tactile. Quand c'est allumé, ces deux curseurs contrôlent le retour audio, ces deux curseurs le retour tactile. Vous êtes maintenant libre de jouer comme vous voulez avec la guitare et l'interface de contrôle. Vous êtes libre de nous faire part de vos commentaires et remarques! [Après une familiarisation d'une dizaine de minutes] Nous vous demandons maintenant de produire autant de réglages des curseurs que vous le souhaitez et de nous les décrire.

Dans la phase 2, un des curseurs d'effet est fixé au minimum ou au maximum, le participant pouvant manipuler les autres curseurs en continuant de s'exprimer librement sur son ressenti. Il y a donc 4 conditions distinctes :

- **A0**, où **A/eff** est fixé à sa valeur minimum (signal « lisse », sans trémolo) ;
- **A1**, où **A/eff** est fixé à sa valeur maximum (signal « rugueux », avec trémolo) ;
- **V0**, où **V/eff** est fixé à sa valeur minimum (signal « lisse », signal de Shepard) ;
- **V1**, où **V/eff** est fixé à sa valeur maximum (signal « rugueux », trains d'impulsions) ;

Pour chaque condition, le musicien est invité à ajuster le curseur correspondant à l'effet de l'autre retour sensoriel, à une configuration qu'il considère comme cohérente avec le réglage fixé. L'ordre de présentation de ces 4 conditions est aléatoire et équilibré entre les participants. La phase 2 a duré 33 minutes en moyenne (de 19 à 44 minutes). Les consignes de la phase 2 sont :

*Nous allons à présent passer à la deuxième phase de la séance. Peux-tu positionner les curseurs suivants [montrant **A/vol**, **V/vol**] à un niveau qui te paraît typique et confortable ? Nous allons à présent te fixer un retour et tu devras ajuster l'autre afin de produire un réglage qui te semble cohérent.*

Cinq participants (numérotés de P1 à P5) ont participé à l'étude (âge moyen 23 ans, de 18 à 30 ans). Tous sont des guitaristes électriques amateurs, mais expérimentés (9 années de pratique en moyenne, de 4 à 15 ans).

7.2 Analyse

J'ai focalisé mon analyse sur l'impact du retour vibrotactile, et la comparaison de cette modalité avec le retour audio. Chaque utilisation de l'interface MIDI par un participant est enregistrée, par une ligne dans un fichier texte, chaque ligne contenant comme information : l'heure, le nom du curseur et sa valeur (entre 0 et 1).

Les productions verbales des 5 entretiens sont retranscrites (durée moyenne des entretiens : 63 minutes, de 53 à 82 minutes). Afin de permettre une analyse fine, les transcriptions gardent trace des hésitations, des paroles non entièrement prononcées, des silences, etc., à l'instar des transcriptions étudiées dans la partie I. Elles contiennent également des horodatages et des

informations sur la phase et la condition en cours, ainsi que des commentaires sur le style de jeu⁵.

7.3 Résultats

7.3.1 Identification du retour vibrotactile

Les verbalisations permettent d'évaluer si les participants identifient ou non l'objet de chaque curseur proposé, à savoir **vol** et **eff** pour chaque retour sensoriel. Les réglages du volume audio, **A/vol**, ont été parfaitement compris par eux. **A/vol** est décrit par exemple comme un *bouton de volume* (P3) ou un *volume général* (P5). **A/eff**, la modulation d'amplitude dit effet « trémolo », est identifiée par tous les participants, soit explicitement par certains d'entre eux (*un trémolo* (P3), *espèce de trémolo* (P5)) ou non (*cette espèce de vibration, de son saccadé* (P2)). Cela peut s'expliquer par le fait que l'effet trémolo est un effet classique pour le guitariste électrique, bien connu, abordable et facilement disponible dans de nombreuses pédales, racks ou par le biais d'une implémentation logicielle.

Le volume vibrotactile **V/vol** a été identifié explicitement par P1 et P3 (*intensité* (P1), *volume* (P3), *avec ça, j'ai l'impression qu'on ressent mieux les vibrations* (P3)). Cependant, 4 participants sur 5 (tous les participants sauf P3) ont trouvé la différence entre **V/vol** et **V/eff** peu claire :

- (P1) *Le 3, j'ai l'impression que c'est l'intensité. Ah non, le 4 aussi ;*
- (P4) *Celui-là ça va être plutôt un sustainer du coup ? Le 4 nan ? Ou le 3 ?*
- (P4) *je sais pas si c'est le même, si c'est le même esprit entre le 3 et le 4, ou bien... ou bien si le 4 il peut faire vraiment quelque chose tout seul ;*
- (P5) *Là pour moi, par exemple là c'est pas confortable. je sais pas c'est lequel des deux qu'est trop fort.*

Les trois exemples précédents montrent également que les participants (en l'occurrence P1, P2, P4 et P5) perçoivent que **V/eff** contrôle en partie le niveau des vibrations. Il n'est cependant pas clair pour eux si ce niveau est augmenté pour des valeurs plus élevées sur le curseur, ou l'inverse.

Mettant en évidence cette confusion entre **V/vol** et **V/eff**, P4 trouve une interaction entre les deux paramètres :

- (P4) *Le 4 a pas vraiment d'intérêt sans le 3 à fond j'trouve ;*
- (P4) *Je sais pas si c'est le même, si c'est le même esprit entre le 3 et le 4, ou bien si le 4 il peut faire vraiment quelque chose tout seul.*

Quant à **V/eff**, les participants le trouvent très difficile à comprendre :

- (P1) *J'ai du mal à deviner ce sur quoi le potar 4 influe ;*
- (P3) *J'comprends de moins en moins c'que fait le curseur 4 ;*
- (P4) *Ah c'est horrible, j'arrive pas à savoir euh comment le faire marcher.*

Néanmoins, la difficulté à comprendre l'objet de l'effet vibrotactile n'empêche pas la production d'explications et de descriptions par les participants, mais celles-ci sont très diverses, comme on peut le voir tableau 7.1. La grande diversité dans le vocabulaire utilisé pour parler de retour vibrotactile est frappante (15 mots différents pour décrire **V/eff**), par comparaison

5. Les commentaires sur le style de jeu sont par exemple : *rock, blues*, notes simples, arpèges, accords, lorsque le guitariste montre quelque chose avec ses doigts ou dessine des formes dans l'air pendant le processus d'explication de sa perception.

A/vol	<i>volume</i>
A/eff	<i>trémolo, LFO, fréquence des vibrations, saccadé</i>
V/vol	<i>intensité, volume, fait les vibrations</i>
V/eff	<i>fréquence de la vibration, modulation d'amplitude de la vibration, effet de chute, effet de creux, lancer des notes à fond, ça le calme, ça le réchauffe, donne les impulsions, donne la puissance, sustainer, rajoute des vibrations dans le manche, contrôler des vibrations au niveau de la tête, la source de la vibration, intensité, vibrato</i>

TABLEAU 7.1 – Liste des mots utilisés pour désigner les curseurs du retour audio et du retour vibrotactile sur l'interface.

avec le vocabulaire utilisé pour décrire le retour audio (4 mots différents pour décrire **A/eff**, voir sur le tableau 7.1). Le retour vibrotactile est un paramètre sur lequel les guitaristes n'ont généralement aucun contrôle, contrairement au retour sonore (réglages possibles sur l'amplificateur ou les pédales d'effets).

7.3.2 Utilisation de l'interface

Le tableau 7.2 montre le grand nombre d'actions sur le retour vibrotactile (**vol** et **eff**). Cela indique que les guitaristes ont particulièrement testé ce retour. Ce résultat constitue une démonstration supplémentaire de l'intérêt de la démarche appliquée dans ce chapitre.

Participant	Retour	Nombre d'actions sur le curseur vol	Nombre d'actions sur le curseur eff
P1	A	6	26
	V	23	42
P2	A	1	6
	V	14	18
P3	A	26	71
	V	69	62
P4	A	12	29
	V	26	59
P5	A	7	30
	V	52	38

TABLEAU 7.2 – Suivi des actions sur l'interface MIDI de tous les participants pendant la phase 1. Les colonnes 3 et 4 indiquent le nombre d'actions effectuées sur chaque curseur, respectivement pour les curseurs **vol** et **eff**.

7.3.3 Verbalisations

7.3.3.1 Ré-emploi des catégories de l'étude linguistique

Le tableau 7.3 montre que les guitaristes emploient certains mots des catégories identifiées dans la partie I. Le plus frappant est le très grand nombre d'occurrences de VIBRATION, justifié par la présence du retour vibrotactile⁶. Les guitaristes ont fortement cherché à décrire les vibrations. L'absence de DYNAMIQUE dans les transcriptions de ce test va encore plus loin que la tendance observée au chapitre 4, à savoir que l'utilisation de DYNAMIQUE est très dépendante des guitaristes présents, aucun guitariste de cette expérience n'a utilisé DYNAMIQUE. TOUCHER n'est utilisé qu'une fois sous la forme nominale, et reste peu employé par les guitaristes. Les relances des expérimentateurs se sont appuyées sur la catégorie RESENTI pour favoriser l'ESI (expérience sensible immédiate, voir section 2.4), justifiant la présence de mots de cette catégorie dans le discours des musiciens.

	Phase 1	Phase 2
CONFORT	2	3
DYNAMIQUE	0	0
RÉPONSE	4	1
RESENTI	30	27
TOUCHER	3	7
VIBRATION	98	106

TABLEAU 7.3 – Occurrences des catégories de l'analyse linguistique (chapitre 2), dans les transcriptions de l'expérience de ce chapitre.

7.3.3.2 Expression de la modalité vibrotactile

Les mentions spécifiques du retour vibrotactile ainsi que les énoncés relatifs au sens du toucher ont été identifiés. Le discours des guitaristes a été divisé en énoncés, selon que les guitaristes décrivent le retour audio, le retour vibrotactile, ou une combinaison de ces retours. Le décompte des énoncés est présenté dans le tableau 7.4, révélant un nombre particulièrement élevé d'énoncés sur le retour vibrotactile. Cette modalité est celle qui fait le plus parler les guitaristes, car elle procure sans doute le plus de sensations nouvelles (alors que le retour audio présenté aux guitaristes est plus habituel, ces derniers pouvant habituellement modifier le retour sonore de leur instrument).

Retour	Nombres d'énoncés
Audio	13
Audio-vibrotactile	18
Vibrotactile	89

TABLEAU 7.4 – Nombre d'énoncés pour chaque type de retour (audio, vibrotactile, ou combinaison de plusieurs retours).

6. L'utilisation de VIBRATION provient au départ des guitaristes, car c'est le terme *tactile* qui est utilisé dans les consignes.

7.3.3.3 Appréciation du retour vibrotactile

Les guitaristes ont exprimé leur appréciation très positive du retour vibrotactile :

- (P1) *Le retour vibratoire, c'est vraiment géant. [...] On... est tout de suite beaucoup plus impliqué dans, dans c'qu'on fait et euh beaucoup plus concentré, j'dirais... enfin...*
- (P2) *J'trouve que c'est plus sympa d'jouer avec, parce que... ça nous met plus dans... justement dans c'qu'est... bah... quand on joue, euh, vraiment dans l'atmosphère etc. Et ça nous permet euh de rendre mieux compte des choses.*
- (P3) *Bah j'trouve ça agréable, tu vois, la vibration... euh, ça... peut-être que c'est parce que c'est nouveau, mais euh... ça... t'as envie de jouer avec, et c'est dommage de s'en passer. Euh... ouais! Ça ajoute vraiment un plaisir au fait de jouer. J'ai pas l'impression que tu pourrais t'en lasser.*
- (P4) *le 3 [V/vol] il est incroyable. On a l'impression que l'ampli il est carrément... dans... dans la guitare quoi. Avec euh... bah j' imagine que c'est ce... le truc [vibreur] derrière ouais.*

Même s'il s'agit d'une nouvelle façon de contrôler la guitare, certains musiciens se sont rapidement habitués à l'ajout de vibrations, voire ont exprimé une certaine frustration à l'idée de devoir se passer de vibration :

- (P1) *Ouais, on ressent beaucoup moins le... la vibration. C'est moins marrant! du coup, ouais, on a tout de suite envie de se calmer, d'un point de vue psychédélique, et euh... au niveau du solo, bin c'est moins... riche en son euh... ouais. On a moins de facilité à, à s'accompagner tout seul, en fait...*
- (P5) *Par contre ouais ça a un côté... comme tu disais c'est... quand t'enlèves la vibration finalement il t'manque... t'as l'impression qu'il t'manque quelque chose. Tu t'habitues très vite à ça.*

Ces vibrations amènent directement certains participants à se sentir comme s'ils étaient sur scène, en concert :

- (P1) *Bah, moi honnêtement, là, la première chose qui me vient à l'esprit, c'est que je retrouve un peu des sensations comme si j'étais en... sur scène, en fait. Avec la scène qui... des gros amplis qui sont derrière moi, la scène qui tremble, et j'ai tout le corps qui tremble au début, au tout début d'un concert.*
- (P3) *Quand tu joues le mi grave, ça donne un... ça donne du punch à la guitare, et c'est euh... euh... ça donne un peu l'effet t'sais quand tu vas en concert, tu... j'pense que tu prends du plaisir aussi à... à ressentir les vibrations.*
- (P3) *Ouais, sur les, sur les notes graves c'est vraiment flagrant, ça fait un truc euh, ça t'redonne une sensation d'énergie, de... [...] ça redonne un, un punch qui est...*

De plus, la présence des vibrations favorise la concentration des participants sur leur ressenti :

- (P1) *Ah oui! c'est... on... est tout de suite beaucoup plus impliqué dans, dans c'qu'on fait et euh beaucoup plus concentré, j'dirais... enfin...*
- (P4) *Et là, le jouer avec euh... la vibration comme ça, à fond... euh... bah ça fait euh... on se concentre plus [+] sur carrément le ressenti que vraiment, l'audio entre guillemets.*

L'ensemble des commentaires des guitaristes sur le retour vibrotactile invite à poursuivre l'étude du retour vibrotactile et la possibilité de le modifier.

7.4 Conclusion

Cette expérience de test perceptif avec modification des vibrations a permis de vérifier que les guitaristes électriques peuvent jouer avec ladite modification des vibrations, et exprimer leur ressenti des vibrations qu'ils perçoivent. Au cours de ce test, cinq guitaristes électriques ont joué sur une guitare électrique augmentée, et leur interaction avec cet instrument a été observée. L'originalité de l'instrument présenté est double. Premièrement, son « augmentation » implique deux modalités sensorielles : audio et vibrotactile. Deuxièmement, le retour de l'instrument dans ces deux modalités peut être contrôlé directement par le participant. Habituellement, seul le retour audio peut être contrôlé par le musicien, soit en faisant varier la technique de jeu, soit en manipulant des dispositifs tels que des pédales d'effet. En pratique, une interface est fournie au participant, qui lui permet de contrôler le volume et la quantité d'effet pour chacune des deux modalités. Pour le retour audio, le participant contrôle le volume d'entrée de l'amplificateur, ainsi que l'amplitude et la fréquence d'une modulation d'amplitude (c'est-à-dire un effet de « trémolo ») sur le signal du micro. Pour le retour vibrotactile, le participant contrôle l'intensité du signal envoyé au vibreur (monté sur la tête de la guitare), et l'équilibre entre un signal vibratoire régulier et lisse et un signal rugueux et irrégulier. Des entretiens sont menés pendant le jeu de cet instrument et les actions des participants sur l'interface de contrôle sont enregistrées.

Les résultats de cette expérience sont basés sur la participation de seulement 5 guitaristes amateurs (mais confirmés). Par conséquent, les résultats peuvent ou non être typiques de la population des guitaristes électriques. Cependant, il s'agit là d'une étude pilote qui apporte des résultats encourageants sur la faisabilité et la pertinence d'une augmentation simultanée audio et vibrotactile d'un instrument de musique, et donne des perspectives utiles pour de futures recherches dans ce sens, qu'elles soient dans le domaine scientifique (par exemple la recherche sur la perception multisensorielle) ou dans le domaine artistique (par exemple la recherche sur les instruments de musique augmentés).

Tout d'abord, la configuration choisie pour l'expérience est globalement bien accueillie par les participants. Le principe de pouvoir modifier le retour vibrotactile est apprécié par les participants, qui en soulignent les usages possibles. Bien sûr, cela s'accompagne de quelques difficultés, par exemple : le retour vibrotactile s'avère difficile à comprendre et à contrôler. Ces problèmes peuvent être dus au manque d'expérience des participants au contact de ces dispositifs très nouveaux, mais aussi aux choix qui ont été faits de ne pas impliquer les participants lors de l'élaboration du retour vibrotactile (par exemple, l'effet vibrotactile qui était trop fort et générerait souvent un effet larsen).

L'ajout d'un retour vibrotactile à l'instrument peut être utilisé pour augmenter la sensation d'immersion, donnant au musicien l'impression d'être sur scène, ou au contraire pour l'aider à se concentrer.

À l'avenir, l'augmentation simultanée d'un instrument de musique sur plusieurs modalités, qui s'avère acceptée par les participants, pourrait être utilisée dans une variété de contextes et d'applications. Dans le domaine scientifique, ce dispositif est bien adapté pour l'étude de la perception multisensorielle et de l'intégration multisensorielle : les différents retours sensoriels peuvent être contrôlés de manière indépendante ou congruente, dans le cadre de la tâche complexe et précise qui consiste à jouer d'un instrument de musique. Avec d'autres effets vibrotactiles, il est possible d'étudier les effets comportementaux de la modification du retour vibratoire de l'instrument.

Sur le plan artistique, cette étude pilote indique que les instruments augmentés selon plusieurs modalités sensorielles (son, toucher, etc.) offrent de nouveaux moyens d'expression aux musiciens : ils contrôleraient non seulement le son, mais aussi le toucher de leurs instruments. On peut imaginer que cette modalité vibrotactile puisse être intégrée à la performance artistique, le public

touchant des objets sur lesquels les vibrations contrôlées par l'interprète peuvent être détectées, étendant la performance musicale aux autres sens (voir par exemple [Bri21 ; Gio+15 ; TWW20]).

Le retour vibrotactile est un paramètre sur lequel les guitaristes n'ont généralement aucun contrôle, contrairement au retour sonore (réglages possibles sur l'amplificateur ou les pédales d'effets). La possibilité de modifier le comportement vibrotactile de l'instrument peut changer la donne pour le musicien lui-même : un retour audio et vibrotactile congruent peut améliorer la concentration du musicien, augmenter son sentiment d'immersion, et peut-être l'aider à interagir avec d'autres musiciens, par exemple en utilisant le retour vibrotactile comme complément aux enceintes de retour de scène et transmettre des informations aux autres musiciens, comme l'ont suggéré Paté *et al.* [Pat+22]. Dans un avenir plus lointain, il est possible d'envisager que les instruments bas de gamme moins chers soient améliorés avec des vibrations imitant celles d'instruments plus appréciés et plus chers, permettant ainsi aux musiciens débutants et moins riches de jouer des instruments plus intéressants et plus vivants.

Conclusion et perspectives de l'étude du ressenti des vibrations

Plusieurs expériences ont été menées dans cette partie avec des guitaristes, dans le but d'étudier les possibilités de modification du retour vibrotactile de la guitare électrique. Il a été montré que le protocole de reproduction des vibrations pouvait être simplifié, tant sur les aspects matériels que sur le traitement du signal. Cette partie a permis la mise en œuvre d'une expérience au cours de laquelle les guitaristes ont pu agir sur le retour vibrotactile de la guitare électrique en situation de jeu.

Hypothèses

Plusieurs hypothèses ont été discutées dans cette partie, principalement :

- Il est possible de simplifier le contenu fréquentiel du signal vibratoire sans altérer la perception des guitaristes, en ne conservant que le fondamental de la note jouée (et certains partiels). Cette hypothèse a été confirmée au chapitre 5.
- Les guitaristes perçoivent plus de différences entre les signaux vibratoires sans jouer qu'ils n'en perçoivent en situation de jeu. Cette hypothèse a été confirmée au chapitre 6.
- Le signal vibratoire peut directement être remplacé par le signal du micro, généré avec un vibreur. Cette hypothèse n'a pas été confirmée, les guitaristes étant en mesure de percevoir les différences entre les signaux selon qu'ils étaient issus de la mesure à l'accéléromètre ou du micro. Ceci étant, dans le chapitre 6, rien ne permet d'affirmer qu'un signal est plus apprécié que l'autre par les guitaristes (ou plus adapté à la perception des vibrations). L'expérience du chapitre 7 confirme que le signal provenant du micro ne pose pas problème aux guitaristes.
- Les guitaristes sont à l'aise avec la possibilité de modification du retour vibratoire de leur instrument. Cette hypothèse est confirmée par le chapitre 7. La possibilité de modifier le retour vibrotactile de la guitare électrique a été appréciée par les guitaristes.

Contenu fréquentiel

Une expérience portant sur l'influence du contenu fréquentiel sur la perception des vibrations a été menée. La réinjection du signal de l'accéléromètre (avec fonction de transfert) est jugée « assez similaire » aux vibrations perçues en situation de jeu par les guitaristes. À partir de cette réinjection vibratoire, il est envisagé de simplifier le signal en ne conservant que les trois premiers partiels de la note jouée, car aucune différence significative sur la similarité des différents signaux avec les vibrations ressenties pendant le jeu n'a pu être montrée.

Montage expérimental

Une expérience portant sur la distinction de signaux vibratoires a été menée dans le but de simplifier le montage expérimental à mettre en place lors des expériences sur le retour vibrotactile. Il a été montré que dans la plupart des cas, il n'est pas possible de conclure à une différence perceptible entre la réinjection du signal d'accéléromètre (contenant l'intégralité du spectre et les informations sur la vibration de la corde et de la structure) et la génération de vibrations à partir du signal du micro.

Modifications du retour vibrotactile

Une dernière expérience a permis de vérifier que les guitaristes électriques peuvent jouer avec modification des vibrations, et exprimer leur ressenti des vibrations. Le retour de l'instrument dans les modalités audio et vibrotactile peut être contrôlé directement par le participant. La configuration choisie pour l'expérience a été bien accueillie par les participants, et le principe de pouvoir modifier le retour vibrotactile a été apprécié par les participants, qui en ont souligné les usages possibles.

Normalisation de signaux vibratoires

Il était attendu par la normalisation en énergie que les signaux soient perçus avec la même intensité, ce qui n'a pas été le cas selon les participants aux expériences des chapitres 5 et 6. Une autre manière de faire serait de considérer les courbes établies par Verrillo [Ver84]. La normalisation en énergie pourrait tenir compte de ces courbes, et les signaux seraient alors normalisés selon l'énergie perçue.

Contrôle du retour vibrotactile

Le retour vibrotactile s'avère difficile à comprendre et à contrôler par les participants. Ces problèmes peuvent être dus au manque d'expérience des participants avec ces dispositifs très novateurs, mais aussi aux choix qui ont été faits sans impliquer les participants (par exemple, le choix d'un effet vibrotactile qui était trop fort et générait souvent un effet larsen, tout comme le choix des signaux de Shepard ou des trains d'impulsions et la décision de s'intéresser à la « rugosité » des signaux).

Perspectives artistiques

Sur le plan artistique, les résultats de cette deuxième partie indiquent que les instruments augmentés sur plusieurs modalités sensorielles offrent de nouveaux moyens d'expression aux musiciens : ils contrôleraient non seulement le son, mais aussi le toucher de leurs instruments. On peut également imaginer que cette modalité vibrotactile puisse être ajoutée à la performance artistique, le public touchant des objets sur lesquels les vibrations contrôlées par l'interprète peuvent être détectées, étendant la performance musicale aux autres sens.

Un retour vibrotactile bien choisi peut améliorer la concentration du musicien, augmenter son sentiment d'immersion, et peut-être l'aider à interagir avec d'autres musiciens.

Perspectives scientifiques

Dans le domaine scientifique, le dispositif de modification vibrotactile est bien adapté pour l'étude de la perception multisensorielle et de l'intégration multisensorielle : les différents retours sensoriels peuvent être contrôlés de manière indépendante (ou congruente) en situation de jeu.

Avec d'autres effets vibrotactiles, l'influence des modifications vibrotactiles sur le comportement des musiciens peut être alors étudiée.

Troisième partie

Conclusion générale

Conclusion

Une approche pluridisciplinaire de caractérisation et de perception du retour vibrotactile par les musiciens a été présentée dans ce manuscrit, dans le cas de la guitare électrique *solid body*. Cette démarche a été l'occasion de laisser la possibilité aux musiciens de modifier eux-mêmes les vibrations de leur instrument, comme rappelé par la figure 8.1

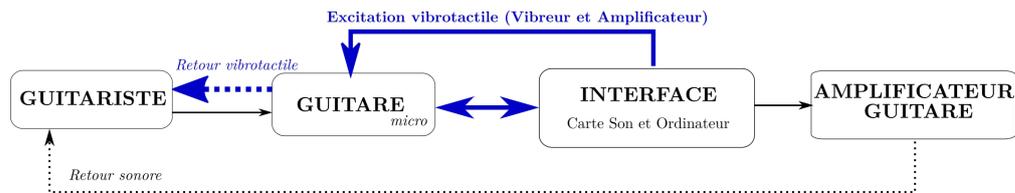


FIGURE 8.1 – Reprise de la figure 1.3. L'ajout de la modification vibratoire effectuée lors des expériences que j'ai menées est figuré en bleu.

Dans une première partie, une méthodologie d'analyse de verbalisations a été développée, puis appliquée au discours des musiciens lors d'expériences s'inscrivant dans les principes de l'approche écologique et de la perception située. Cette analyse robuste a permis d'identifier certains mots comme appartenant au lexique de la perception vibrotactile et de souligner le rôle des chercheurs menant les expériences quant à l'implication des musiciens dans leur discours (vérifier si les musiciens s'expriment directement sur leur ressenti ou sur leur expérience passée).

Dans la deuxième partie, les expériences menées dans le but de percevoir les modifications du retour vibrotactile de l'instrument ont été décrites. De telles modifications ont été obtenues à partir d'une reproduction du signal vibratoire en situation de jeu. Tout l'intérêt des guitaristes pour le contrôle des vibrations en situation de jeu a été montré, la présence des vibrations favorisant la concentration des musiciens en situation de jeu et la restitution des sensations de concert pour les musiciens.

J'ai cherché à développer des outils méthodologiques, nécessaires à l'étude du retour vibrotactile, qui ont été appliqués à la guitare électrique. L'application de ces méthodes a ainsi permis une meilleure compréhension de la perception des vibrations par les musiciens et du vocabulaire dont ils se servaient pour exprimer leur ressenti concernant ce retour. Ces méthodes offrent de nouvelles perspectives à la recherche sur l'interaction multisensorielle en apportant la possibilité de modifier le comportement vibratoire d'un instrument en conditions écologiques. La modification sonore, déjà présente et contrôlée par les guitaristes (avec l'utilisation d'amplificateurs et de

pédales d'effet), a été associée à la modification vibratoire.

Principaux résultats

Une méthode d'analyse linguistique a été développée pour l'étude du sens du toucher. J'ai mené une analyse linguistique, avec un regard particulier sur l'identification de la présence du sens du toucher dans le discours des musiciens. Trois indicateurs ont été systématiquement analysés dans les énoncés à étudier : le « rapport au toucher », l'« objet qualifié » et l'« implication dans le discours ». Certaines caractéristiques linguistiques ont été identifiées pour faciliter l'analyse du sens du toucher : association avec des parties du corps (main gauche), association avec des éléments de guitare (manche et corps). L'approche linguistique ainsi menée répond à l'objectif d'identifier les situations favorisant le rapport au toucher.

Cette méthode a été présentée au Forum Acusticum 2020, accompagnée d'un article : Cambourian Paul, Paté Arthur, Cance Caroline, Navarret Benoît, Vasseur Jérôme, "Investigating the Vocabulary Used by Electric Guitar Players to Speak about Touch", *Proceedings of the e-Forum Acusticum*, 2020, Lyon, p. 1029-1036 [Cam+20].

Les musiciens s'expriment sur le sens du toucher avec un vocabulaire spécifique. Six catégories de mots ont été étudiées à partir de transcriptions de tests perceptifs subis par des guitaristes électriques. L'application de la méthode d'analyse a confirmé que CONFORT, TOUCHER, et VIBRATION permettent aux musiciens de s'exprimer sur le sens du toucher. J'ai vérifié si les mots choisis étaient bien des descripteurs de l'interaction musicien-instrument, car les études existantes classant ces mots comme décrivant l'interaction musicien-instrument ne donnent pas d'argument particulier à cette classification. J'ai identifié que CONFORT est intimement lié à l'interaction musicien-instrument. Les autres mots permettent de parler de cette interaction à l'échelle d'un énoncé (regroupement de plusieurs phrases, donnant un contexte suffisant pour comprendre le mot étudié et l'emploi de ce mot). J'ai étudié le type d'expérimentation et l'implication des guitaristes dans leur discours. J'ai analysé les énoncés produits pour savoir si les guitaristes s'exprimaient majoritairement sur leur ressenti pendant le test ou sur leur expérience personnelle hors test. J'ai confirmé que les musiciens en situation de jeu s'expriment spontanément sur leur ressenti (et non sur des *a priori*). Sur la base de cette analyse, j'ai pu montrer que les musiciens (ici les guitaristes électriques) parlent du sens du toucher malgré un instrument vibrant peu et même si l'expérience ne porte pas spécifiquement sur le toucher.

Les résultats de l'application de la méthode linguistique ont fait l'objet d'un article publié dans la revue internationale à comité de lecture *Acta Acustica* : Cambourian Paul, Paté Arthur, Cance Caroline, Navarret Benoît, Vasseur Jérôme, "Vocabulary to Speak about Touch : Analysis of the Discourse of Electric Guitar Players", *Acta Acustica*, volume 6.2, 2022 [Cam+22].

Le jeu libre et la verbalisation libre favorisent l'expression du ressenti des musiciens. La robustesse de la méthode d'analyse a été discutée. À partir de cette analyse, des recommandations visant à améliorer la méthode ont été formulées, dans le cadre de la perception située avec verbalisation libre. Il est recommandé de s'intéresser à la description de l'interaction musicien-instrument et de la guitare en tant qu'objet pour un discours sur le toucher. Il est du rôle des expérimentateurs de relancer les musiciens pour permettre à ces derniers de s'exprimer au sujet de l'instrument qu'ils sont en train de jouer. Cela a pour but de favoriser l'expérience sensible immédiate dans le discours des musiciens, de s'assurer que les verbalisations à analyser portent bien sur l'expérience réalisée, et non sur l'internalisation en mémoire des expériences

passées (voire des savoirs partagés par la communauté, pas forcément issus d'une expérience vécue personnellement).

Un protocole de reproduction fidèle des vibrations a été mis en place. Ayant montré que les guitaristes peuvent parler directement du sens du toucher, je me suis intéressé aux vibrations de la guitare électrique. J'ai proposé d'utiliser des mesures vibratoires en situation de jeu et de réinjecter ces mesures lors de tests perceptifs. Le signal alors reproduit contient l'intégralité du spectre des mesures vibratoires ainsi que les informations sur la vibration de la corde et de la structure.

Le protocole ainsi mis en place a été présenté en conférence internationale avec article (et avec comité de lecture) : Cambourian Paul, Gal Oscar, Paté Arthur, Benacchio Simon, Vasseur Jérôme, "Understanding the Vibrotactile Feedback of the Electric Guitar : Methodology for a Physical and Perceptual Study", *Proceedings of Audio Mostly*, Trento, Italie, 2021, p. 268-271 [Cam+21].

Les signaux vibratoires peuvent être simplifiés. Une expérience ayant pour objet l'influence du contenu fréquentiel sur la perception des vibrations a été menée. La réinjection du signal de l'accéléromètre (avec fonction de transfert) a été jugée par les guitaristes « assez similaire » aux vibrations perçues en situation de jeu. À partir de cette réinjection vibratoire, il a été possible de simplifier le signal en ne conservant que les trois premiers partiels de la note jouée, ce qui a créé trop peu de différence de similarité avec les vibrations ressenties pendant le jeu pour pouvoir conclure à une différence significative. De plus, il a été confirmé que la main est une zone privilégiée pour le ressenti du retour vibrotactile pour la guitare électrique, sans pour autant négliger les autres zones de contact (bras, buste et cuisse). Pour de futures expériences, il est envisagé de simplifier davantage les signaux réinjectés et le montage expérimental, et d'aller jusqu'à créer numériquement les réinjections de vibrations.

L'expérience ayant abouti à ces résultats a fait l'objet d'une présentation orale lors du Congrès Français d'Acoustique (CFA) en avril 2022, intitulée « Étude du ressenti des guitaristes pour une guitare électrique augmentée en vibration ».

Le micro peut être utilisé pour générer des signaux vibratoires. Dans la plupart des cas de figure, il n'est pas possible, lorsqu'ils sont injectés *via* un vibreur sur la tête de la guitare, de différencier les signaux issus des mesures vibratoires des signaux issus des mesures au micro. Comme dans certaines conditions les guitaristes parviennent à différencier les signaux vibratoires (issus des mesures vibratoires ou issus des mesures au micro), l'analyse du retour vibrotactile et de la perception de ce retour nécessite, en toute rigueur, la présence de l'accéléromètre. Ceci étant, les différences perçues sont relativement faibles, et cela permet d'envisager le retrait du capteur d'accélération pour des besoins et enjeux artistiques. Ainsi donc, rien n'interdit d'utiliser le signal du micro pour augmenter la guitare en vibration.

Je suis en train d'écrire un article sur ces résultats, et l'article sera soumis à une revue internationale à comité de lecture.

La possibilité de modification des vibrations intéresse les musiciens. Les guitaristes n'ont aucun souci à jouer avec une guitare « augmentée en vibration » et le retour vibrotactile a été fort apprécié. La modification des vibrations est donc compatible avec les conditions écologiques. Le retour de l'instrument (sonore et vibrotactile) peut être contrôlé directement par l'instrumentiste. Dans cette situation, les guitaristes lorsqu'ils s'expriment utilisent majoritairement la catégorie VIBRATION et un peu celle de CONFORT. L'étude menée a apporté des résultats encourageants sur la faisabilité et la pertinence d'une augmentation simultanée auditive

et vibrotactile d'un instrument de musique. Cette étude donne des perspectives utiles pour de futures études sur ce sujet, qu'elles soient dans le domaine scientifique (par exemple la recherche sur la perception multisensorielle) ou dans le domaine artistique (par exemple les instruments de musique augmentés).

Le projet associé à cette étude a fait l'objet d'une présentation au workshop "Multimodal Augmentation of Haptic Touch Input" (IEEE World Haptics Conference 2021). Un article a été soumis le 6 octobre 2022 au *Journal of New Music Research* : Paté Arthur, Cambourian Paul, Berthaut Florent et Légal Boris, "Audio, vibrotactile, and visual augmentation of an electric guitar : A pilot study". D'autre part, un article a été publié suite à la conférence *New Interfaces for Musical Expression* : Arslan Cagan, Berthaut Florent, Beuchey Anthony, Cambourian Paul, Paté Arthur, "Vibrating Shapes : Design and Evolution of a Spatial Augmented Reality Interface for Actuated Instruments", 2022 [Ars+22].

Perspectives : analyse de verbalisations

Lexique vibrotactile Il a été fait le choix de limiter l'étude à six catégories de mots. La liste pourrait être étendue. J'ai identifié (à partir des études présentées en section 1.1.4.2) d'autres mots et catégories de mots qui pourraient être étudiés : « sensation », « interaction », « contact », « jouabilité », « ergonomie », « agréable », « vivant » font partie des exemples possibles (voir tableau 1.2 p. 11 pour une liste étendue des possibilités). De tels travaux viendraient compléter le lexique disponible en vue de l'étude du sens du toucher. De plus, la méthode développée dans la partie I peut directement être employée pour ces mots-là.

Lexique du toucher en acoustique musicale Lors de l'analyse linguistique, j'ai étudié des mots relevant du retour vibrotactile pour les instruments de musique. L'exploration du lexique vibrotactile pourrait être étendue au vocabulaire des vibrations et du sens du toucher en général en acoustique musicale, par exemple la perception de la texture des essences de bois, l'éventuelle sensation de chaleur des vernis et des bois, la sensation de frottement, le retour de force, etc. Autant de choses qui pourraient être étudiées par la suite, avec les méthodes que j'ai pu mettre en place. L'analyse de l'objet qualifié pourrait être adaptée à l'objet d'étude (ici la guitare électrique, en situation de jeu), car je me suis particulièrement intéressé à l'interaction musicien-instrument alors que dans le cas de la perception des textures l'objet ne vibre pas. Il faudrait dans ce cas détailler l'objet qualifié selon les gestes des musiciens (l'objet étant *a priori* inerte).

Études complémentaires L'analyse s'est basée sur des expériences menées avec des guitaristes électriques. L'objectif principal des expériences menées pour cette analyse était de comparer des guitares électriques en fonction de modifications d'éléments de lutherie. Il est possible d'approfondir ces recherches :

- sur d'autres instruments, et d'étudier les similitudes dans l'expression du toucher : peut-on généraliser les résultats obtenus avec les guitaristes électriques aux autres instrumentistes ?
- il aurait été possible de décider de s'appuyer sur les tests de guitare issus des magazines spécialisés (tests effectués par des professionnels), sur les forums de guitaristes (avec des réflexions par des non-professionnels), et ainsi de faire le relevé de phrases portant sur le sens du toucher. Est-ce que le niveau d'expertise joue un rôle important dans le choix du vocabulaire et le taux obtenu de rapport au toucher ?
- il sera intéressant d'étudier ces mots dans des expériences portant spécifiquement sur le sens du toucher (les expériences menées par Navarret [Nav13] et Paté [Pat14] (sur lesquelles

la partie I est basée) portaient sur la perception sonore et non pas tactile). Conservent-ils leurs propriétés de rapport au toucher ?

Nouvelles expériences sur le sens du toucher Avec les résultats présentés dans l'analyse, il est possible à tout expérimentateur d'étudier le sens du toucher dans des verbalisations. L'utilisation de CONFORT, TOUCHER et VIBRATION est à conseiller pour orienter le discours des guitaristes vers le sens du toucher. Pour ne pas introduire de nouveaux mots en tant qu'expérimentateurs, il est possible d'orienter les musiciens vers leur interaction avec l'instrument ou directement vers l'instrument. Avec de nouvelles expériences, il serait possible d'interroger les conditions dans lesquelles les guitaristes parlent du sens du toucher. Par exemple, il pourrait être envisagé de comparer des guitares électriques en fonction de leur retour vibrotactile et d'inviter les guitaristes à s'exprimer avec les catégories CONFORT et VIBRATION. Autre exemple, qui peut correspondre à l'expérience menée dans le chapitre 7 : il est possible d'avoir un instrument sur lequel le retour vibrotactile est modifié et d'interroger des guitaristes sur leur ressenti. Avec les données issues des verbalisations, la méthode développée et présentée dans cette partie pourrait être appliquée. Le lien entre le ressenti des guitaristes et le type de modification du retour vibrotactile pourrait alors être déterminé avec plus de précision.

Perspectives : perception et modification des vibrations

Normalisation Les participants étaient influencés par des différences d'intensité pendant les expériences menées. La normalisation des signaux s'avère donc très délicate : la normalisation en énergie n'est pas satisfaisante, et la normalisation « subjective » (effectuée manuellement) conduit malgré tout les guitaristes à percevoir des différences importantes d'intensité. En tant qu'expérimentateur, je me suis occupé de la normalisation des signaux, et les participants ont eu un ressenti très différent. La normalisation des signaux en intensité aurait pu être effectuée par les participants eux-mêmes (cette possibilité avait été écartée pour ne pas allonger la durée du test et ne pas augmenter la fatigue des participants). Il faudrait pouvoir faire un test préliminaire avec chaque participant, qui pourrait normaliser lui-même les signaux. L'enjeu d'un tel test serait d'obtenir les informations pour la normalisation en peu de temps (5 minutes), sans que ce soit une tâche fastidieuse.

Une autre manière de faire serait de considérer les courbes de Verrillo [Ver84], qui établissent l'isosensibilité en amplitude en fonction de la fréquence. La normalisation en énergie pourrait tenir compte de ces courbes, et les signaux seraient alors normalisés selon l'énergie perçue.

Fonctions de transfert La fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre a été mesurée pour chaque participant aux expériences menées. En systématisant la position de l'accéléromètre, peu de différences ont été observées entre les mesures. Il faudrait vérifier que ces différences ne sont pas perceptibles, ce qui permettrait de ne faire qu'une mesure de fonction de transfert, ensuite appliquée à tous les participants. Ainsi, la fonction de transfert utilisée serait une fonction de transfert « générique », confirmant que les musiciens exercent une influence non perceptible sur le comportement vibratoire de l'instrument.

Réalisme des instruments numériques Une particularité de ma recherche a été d'envisager les vibrations comme un signal complexe à simplifier, et de prendre alors le retour vibrotactile mesuré comme point de départ des signaux réinjectés. J'ai montré que le signal pouvait être simplifié à seulement ses trois premiers partiels. La démarche de simplification des signaux pourrait aller jusqu'à n'utiliser que des signaux de synthèse (sinusoïdes) basés sur les fréquences des

partiels des notes jouées en étudiant la perception des différences ou l'évaluation de la similarité avec le retour vibrotactile.

Instruments augmentés À l'avenir, l'augmentation simultanée d'un instrument de musique sur plusieurs modalités, qui s'avère acceptée par les participants, pourrait être utilisée dans une grande diversité de contextes et d'applications.

Sur le plan artistique, l'étude pilote du chapitre 7 indique que les instruments augmentés sur plusieurs modalités sensorielles offrent de nouveaux moyens d'expression aux musiciens : ces derniers contrôleraient en effet non seulement le son, mais aussi le toucher de leurs instruments. On peut imaginer que cette modalité vibrotactile puisse être intégrée à la performance artistique, étendant la performance musicale aux autres sens, comme l'ont suggéré Briceno [Bri21], Giordano [Gio+15], et Turchet *et al.* [TWW20], le public touchant des objets sur lesquels les vibrations contrôlées par l'interprète peuvent être détectées.

Transmission d'information Le retour vibrotactile est un paramètre sur lequel les guitaristes n'ont généralement aucun contrôle, contrairement au retour sonore (réglages possibles sur l'amplificateur ou les pédales d'effets). La possibilité de modifier le comportement vibrotactile de l'instrument peut changer la donne pour le musicien lui-même : un retour audio et vibrotactile congruent peut améliorer la concentration du musicien, augmenter son sentiment d'immersion, et peut-être l'aider à interagir avec d'autres musiciens (par exemple en utilisant le retour vibrotactile comme complément aux enceintes de retour de scène) et transmettre des informations aux autres musiciens, comme le propose Paté [Pat+22].

Qualité vibratoire des instruments de musique Dans un avenir plus lointain, il est possible d'envisager que les instruments bas de gamme soient améliorés avec des vibrations imitant celles d'instruments plus appréciés et plus chers, ce qui permettrait aux musiciens débutants et moins riches de jouer des instruments plus intéressants et plus vivants.

Intégration multisensorielle Dans le domaine scientifique, le dispositif de modification vibrotactile est bien adapté pour l'étude de la perception multisensorielle et de l'intégration multisensorielle : les différents retours sensoriels peuvent être contrôlés de manière indépendante (ou congruente) en situation de jeu. Avec d'autres effets vibrotactiles, l'influence des modifications vibrotactiles sur le comportement des musiciens peut être étudiée.

Contrôle du retour vibrotactile Le retour vibrotactile s'avère difficile à comprendre et à contrôler. Les problèmes qui se posent peuvent être dus au manque d'expérience des participants au contact de ces dispositifs très nouveaux, mais aussi aux choix qui ont été faits sans demander l'avis des participants et sans les impliquer dans la démarche de création du retour vibrotactile (par exemple, un effet vibrotactile trop fort générerait souvent un effet larsen).

À l'avenir, l'élaboration des signaux pour le retour vibrotactile pourrait être effectuée en collaboration avec les musiciens. Cette démarche, incluant les musiciens, permettrait aux musiciens d'exprimer leurs envies, que ce soit sur le placement de l'effet vibrotactile (sur la guitare, sur le musicien), ou sur l'effet lui-même (volume, forme d'onde, lié au signal audio ou non, transmission d'informations).

Création d'un effet tactile Pour poursuivre le travail sur les modifications du retour vibrotactile de la guitare électrique, une série d'effets tactiles pourrait être créée, à l'image des nombreux effets audio (*boost, wah, octaver, overdrive, fuzz, phaser, chorus, delay, reverb*, etc.).

Ces effets pourraient prendre la forme de pédales (boîtiers actionnables au pied) ou d'un plug-in (format logiciel, géré depuis un ordinateur). Il pourrait être proposé aux guitaristes de jouer avec une pédale d'effet vibrotactile, sur la base des effets audio, ou sur la base de critères perceptifs (confort par exemple). Cette perspective tant artistique que technique permettrait de créer une interface proche du guitariste, avec création d'un *plug-in tactile* sur la base de critères perceptifs.

Bibliographie

- [Ahv19] P. AHVENAINEN. « Anatomy and Mechanical Properties of Woods Used in Electric Guitars ». *IAWA Journal*, *Volume* 40.1 (2019), 106-S6 (dans ce manuscrit, voir page 14).
- [AG03] R. ALKHATIB et M. F. GOLNARAGHI. « Active Structural Vibration Control : A Review ». *The Shock and Vibration Digest*, *Volume* 35.5 (2003), pp. 367-383 (dans ce manuscrit, voir page 179).
- [AB15] U. ARIDOGAN et I. BASDOGAN. « A Review of Active Vibration and Noise Suppression of Plate-like Structures with Piezoelectric Transducers ». *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *Volume* 26.12 (2015), pp. 1455-1476 (dans ce manuscrit, voir page 171).
- [Ars+22] C. ARSLAN, F. BERTHAUT, A. BEUCHEY, P. CAMBOURIAN et A. PATÉ. « Vibrating Shapes : Design and Evolution of a Spatial Augmented Reality Interface for Actuated Instruments ». *Actes de : New Interfaces for Musical Expression*. Auckland, New Zealand, (2022) (dans ce manuscrit, voir pages 12, 115, 134).
- [Bar+10] M. BARTHET, P. GUILLEMAIN, R. KRONLAND-MARTINET et S. YSTAD. « From Clarinet Control to Timbre Perception ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 96.4 (2010), pp. 678-689 (dans ce manuscrit, voir pages 2, 33).
- [Bas+20] C. BASDOGAN, F. GIRAUD, V. LEVESQUE et S. CHOI. « A Review of Surface Haptics : Enabling Tactile Effects on Touch Surfaces ». *IEEE Transactions on Haptics*, *Volume* 13.3 (2020), pp. 450-470 (dans ce manuscrit, voir page 7).
- [Bas+00] C. BASDOGAN, C. HO, M. SLATER et M. SRINIVASAN. « The Role of Haptic Communication in Shared Virtual Environments ». *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, *Volume* 7.4 (2000), pp. 443-460 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [BP12] O. BAU et I. POUPYREV. « REVEL : Tactile Feedback Technology for Augmented Reality ». *ACM Transactions on Graphics*, *Volume* 31.4 (2012), pp. 1-11 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [BH04] S. BAUMANN et J. HALLORAN. « An Ecological Approach to Multimodal Subjective Music Similarity Perception ». *Actes de : Conference on Interdisciplinary Musicology*. Graz, Autriche, (2004) (dans ce manuscrit, voir pages 5, 25).
- [Ben14] S. BENACCHIO. « Contrôle Actif Modal Appliqué Aux Instruments de Musique à Cordes ». Thèse de doctorat. Université Pierre et Marie Curie, (2014) (dans ce manuscrit, voir pages 12, 177-179).

- [Ben+15] S. BENACCHIO, B. CHOMETTE, MAMOU-MANI et V. FINEL. « Mode Tuning of a Simplified String Instrument Using Time-Dimensionless State-Derivative Control ». *Journal of Sound and Vibration*, *Volume* 334 (2015), pp. 178-189 (dans ce manuscrit, voir page 114).
- [Ben+16] S. BENACCHIO, A. MAMOU-MANI, B. CHOMETTE et V. FINEL. « Active Control and Sound Synthesis — two Different Ways to Investigate the Influence of the Modal Parameters of a Guitar on Its Sound ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 139.3 (2016), pp. 1411-1419 (dans ce manuscrit, voir page 10).
- [BBS05] E. BERDAHL, S. BACKER et J. SMITH. « If I Had A Hammer : Design And Theory Of An Electromagnetically-Prepared Piano ». Actes de : International Computer Music Conference. Barcelone, Espagne, (2005) (dans ce manuscrit, voir page 115).
- [BI06] E. BERDAHL et J. O. S. III. « Active Damping of a Vibrating String. » Actes de : The Sixth International Symposium on Active Noise and Vibration Control. Adelaide, Australie, (2006) (dans ce manuscrit, voir page 171).
- [BS09] E. BERDAHL et J. SMITH. « Using Haptic Devices to Interface Directly with Digital Waveguide-Based Musical Instruments ». Actes de : New Interfaces for Musical Expression. Pittsburgh, PA, (2009), pp. 183-186 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [BSO08] E. BERDAHL, H.-C. STEINER et C. OLDHAM. « Practical Hardware and Algorithms for Creating Haptic Musical Instruments ». Actes de : New Interfaces for Musical Expression. Genova, Italie, (2008), pp. 61-66 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [BT11] M. BERNAYS et C. TRAUBE. « Verbal Expression of Piano Timbre : Multidimensional Semantic Space of Adjectival Descriptors ». Actes de : International Symposium on Performance Science. Utrecht, Pays-Bas, (2011), pp. 299-304 (dans ce manuscrit, voir pages 2, 33).
- [BO07] G. BISSINGER et D. OLIVER. « 3-D Laser Vibrometry on Legendary Old Italian Violins ». *Sound and Vibration*, *Volume* 41.7 (2007), pp. 10-15 (dans ce manuscrit, voir pages 32, 181).
- [Bor85] A. BORILLO. « Discours ou métadiscours ? » *Documentation et Recherche en Linguistique Allemande Contemporain - Vincennes*, *Volume* 32.1 (1985), pp. 47-61 (dans ce manuscrit, voir page 46).
- [Bou11] H. BOUTIN. « Méthodes de contrôle actif d'instruments de musique. Cas de la lame de xylophone et du violon. » Thèse de doctorat. Paris, France : Université Pierre et Marie Curie, (2011) (dans ce manuscrit, voir pages 85, 185).
- [BBP15] H. BOUTIN, C. BESNAÏNOU et J.-D. POLACK. « Modifying the Resonances of a Xylophone Bar Using Active Control ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 101.2 (2015), pp. 408-420 (dans ce manuscrit, voir pages 10, 114).
- [Bri21] A. BRICENO. « La Musique Au-Delà Des Réductionnismes Sensoriels : L'expérience Musicale Des Sourds Comme Fondement d'un Nouveau Paradigme ». *Journal de Recherches en Éducation musicale*, *Volume* 12.2 (2021), pp. 36-46 (dans ce manuscrit, voir pages 8, 124, 136).
- [BCD89] J. S. BROWN, A. COLLINS et P. DUGUID. « Situated Cognition and the Culture of Learning ». *Educational Researcher*, *Volume* 18.1 (1989), pp. 32-42 (dans ce manuscrit, voir pages 5, 21).
- [Bru56] E. BRUNSWIK. *Perception and the Representative Design of Psychological Experiments*. University of California Press, (1956). 178 pages (dans ce manuscrit, voir page 4).

- [Cam+21] P. CAMBOURIAN, O. GAL, A. PATÉ, S. BENACCHIO et J. VASSEUR. « Understanding the Vibrotactile Feedback of the Electric Guitar : Methodology for a Physical and Perceptual Study ». Actes de : Audio Mostly. Trento, Italie, (2021), pp. 268-271 (dans ce manuscrit, voir pages 133, 183).
- [Cam+20] P. CAMBOURIAN, A. PATÉ, C. CANCE, B. NAVARRET et J. VASSEUR. « Investigating the Vocabulary Used by Electric Guitar Players to Speak about Touch ». Actes de : E-Forum Acusticum. Lyon, France, (2020), pp. 1029-1036 (dans ce manuscrit, voir pages 38, 132).
- [Cam+22] P. CAMBOURIAN, A. PATÉ, C. CANCE, B. NAVARRET et J. VASSEUR. « Vocabulary to Speak about Touch : Analysis of the Discourse of Electric Guitar Players ». Acta Acustica, *Volume* 6.2 (2022) (dans ce manuscrit, voir pages 32, 132).
- [Can+21] C. CANCE, D. DUBOIS, A. PATÉ et M. COLER. « From Stimulation to Stimuli Construction and Selection ». *Sensory Experiences : Exploring Meaning and the Senses*. Sous la direction de D. DUBOIS, C. CANCE, M. COLER, A. PATÉ et C. GUASTAVINO. Chap. 12. John Benjamins Publishing, 2021, pp. 440-473 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [Cha93] C. CHAFE. « Tactile Audio Feedback ». Actes de : International Computer Music Conference. Tokyo, (1993), pp. 76-79 (dans ce manuscrit, voir page 181).
- [CK13] S. CHOI et K. J. KUCHENBECKER. « Vibrotactile Display : Perception, Technology, and Applications ». Proceedings of the IEEE, *Volume* 101.9 (2013), pp. 2093-2104 (dans ce manuscrit, voir pages 7, 171).
- [Cla97] W. J. CLANCEY. *Situated Cognition : On Human Knowledge and Computer Representations*. Cambridge University Press, (1997) (dans ce manuscrit, voir pages 5, 25).
- [Cla05] E. F. CLARKE. *Ways of Listening : An Ecological Approach to the Perception of Musical Meaning*. Oxford University Press, (2005) (dans ce manuscrit, voir page 5).
- [DW97] P. DANIEL et R. WEBER. « Psychoacoustical Roughness : Implementation of an Optimized Model ». Acta Acustica united with Acustica, *Volume* 83.1 (1997), pp. 113-123 (dans ce manuscrit, voir page 115).
- [Dub09] D. DUBOIS. *Le Sentir et Le Dire*. L'Harmattan. (2009) (dans ce manuscrit, voir page 5).
- [Dub+21] D. DUBOIS, C. CANCE, M. COLER et A. PATÉ. « Empirical Considerations for Questioning Sensory Experience ». *Sensory Experiences : Exploring Meaning and the Senses*. Sous la direction de D. DUBOIS, C. CANCE, M. COLER, A. PATÉ et C. GUASTAVINO. Chap. 10. John Benjamins Publishing, 2021, pp. 371-401 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [E18] E18 COMMITTEE. *Test Method for Sensory Analysis—Triangle Test*. Designation : E1885 — 04. ASTM International (dans ce manuscrit, voir pages 101, 103).
- [Eli12] B. ELIE. « Caractérisation vibratoire et acoustique des instruments à cordes - Application à l'aide à la facture instrumentale ». Thèse de doctorat. Université du Maine, (2012) (dans ce manuscrit, voir page 2).
- [Ewi00] D. J. EWINS. *Modal Testing : Theory, Practice and Application*. 2^e édition. Mechanical Engineering Research Studies Engineering Dynamics Series 10. Research Studies Press, (2000). 562 pages (dans ce manuscrit, voir page 182).

- [Fle05] H. FLEISCHER. « Vibration of an Electric Bass Guitar ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 91 (2005), pp. 247-260 (dans ce manuscrit, voir pages 32, 181).
- [FZ98] H. FLEISCHER et T. ZWICKER. « Mechanical Vibrations of Electric Guitars ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 84.4 (1998), pp. 758-765 (dans ce manuscrit, voir pages 13, 32, 53, 181, 182).
- [FZ99] H. FLEISCHER et T. ZWICKER. « Investigating Dead Spots Of Electric Guitars ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 85 (1999), pp. 128-135 (dans ce manuscrit, voir pages 2, 13, 181).
- [FGT18] M. FLÜCKIGER, T. GROSSHAUSER et G. TRÖSTER. « Influence of Piano Key Vibration Level on Players' Perception and Performance in Piano Playing ». *Applied Sciences*, *Volume* 8.12 (2018), pp. 2697-2707 (dans ce manuscrit, voir pages 3, 12, 77).
- [FGT19] M. FLÜCKIGER, T. GROSSHAUSER et G. TRÖSTER. « The Actuated Violin : Variable Vibrotactile Feedback in the Violinist-Violin Interaction ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 105.2 (2019), pp. 350-355 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [Fon+15] L. FONTAN, J. TARDIEU, P. GAILLARD, V. WOISARD et R. RUIZ. « Relationship Between Speech Intelligibility and Speech Comprehension in Babble Noise ». *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *Volume* 58.3 (2015), pp. 977-986 (dans ce manuscrit, voir page 103).
- [Fon+18] F. FONTANA, S. PAPETTI, H. JARVELAINEN, F. AVANZINI et B. L. GIORDANO. « Perception of Vibrotactile Cues in Musical Performance ». *Musical Haptics*. Sous la direction de S. PAPETTI et C. SAITIS. Springer International Publishing, 2018, pp. 49-72 (dans ce manuscrit, voir page 32).
- [Fon+17] F. FONTANA, S. PAPETTI, H. JÄRVELÄINEN et F. AVANZINI. « Detection of Keyboard Vibrations and Effects on Perceived Piano Quality ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 142.5 (2017), pp. 2953-2967 (dans ce manuscrit, voir pages 32, 181).
- [Fox15] J. FOX. *Applied Regression Analysis and Generalized Linear Models*. Sage Publications, (2015) (dans ce manuscrit, voir page 105).
- [Fri+12] C. FRITZ, A. F. BLACKWELL, I. CROSS, J. WOODHOUSE et B. C. J. MOORE. « Exploring Violin Sound Quality : Investigating English Timbre Descriptors and Correlating Resynthesized Acoustical Modifications with Perceptual Properties ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 131.1 (2012), pp. 783-794 (dans ce manuscrit, voir pages 9-11, 33).
- [Fri+08] C. FRITZ, A. F. BLACKWELL, I. CROSS, B. C. MOORE et J. WOODHOUSE. « Investigating English Violin Timbre Descriptors ». *Actes de : 10th International Conference on Music Perception and Cognition*. (2008) (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [FD15] C. FRITZ et D. DUBOIS. « Perceptual Evaluation of Musical Instruments : State of the Art and Methodology ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 101.2 (2015), pp. 369-381 (dans ce manuscrit, voir pages 5, 8, 33).
- [FMD10] C. FRITZ, A. MUSLEWSKI et D. DUBOIS. « A Situated and Cognitive Approach of Violin Quality ». *Actes de : The 20th International Symposium on Music Acoustics*. Australia, (2010) (dans ce manuscrit, voir pages 2, 5, 9, 25, 33).
- [FB15] M. FRITZ et P. D. BERGER. *Improving the User Experience through Practical Data Analytics : Gain Meaningful Insight and Increase Your Bottom Line*. Elsevier, (2015) (dans ce manuscrit, voir page 93).

- [FEN96] C. C. FULLER, S. J. ELLIOTT et P. A. NELSON. *Active Control of Vibration*. Academic Press, (1996). 345 pages (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [Gal21] O. GAL. « Étude vibroacoustique d’une guitare électrique et modification de son retour vibratoire ». Mémoire de master. Université de technologie de Compiègne, (2021) (dans ce manuscrit, voir page 177).
- [GA03] A. GALEMBO et A. ASKENFELT. « Quality Assesment Of Musical Instruments - Effects of Multimodality ». Actes de : The 5th Triennial Conference of the European Society for the Cognitive Sciences of Music. Hanover, Allemagne, (2003), pp. 441-444 (dans ce manuscrit, voir pages 3, 77).
- [Gar02] B. GARNIER. « Contrôle actif des vibrations ». *Techniques de l’ingénieur* (2002), page 23 (dans ce manuscrit, voir page 177).
- [GVW10] G. A. GESCHIEDER, R. T. VERRILLO et J. H. WRIGHT. *Information-Processing Channels in the Tactile Sensory System : A Psychophysical and Physiological Analysis*. Psychology Press, (2010). 135 pages (dans ce manuscrit, voir page 5).
- [Gib60] J. J. GIBSON. « The Concept of the Stimulus in Psychology ». *The American Psychologist*, (1960), pp. 694-703 (dans ce manuscrit, voir pages 4, 33).
- [Gio16] M. GIORDANO. « Vibrotactile Feedback and Stimulation in Music Performance ». Thèse de doctorat. Montréal, Québec Canada : McGill University, (2016) (dans ce manuscrit, voir page 171).
- [Gio+15] M. GIORDANO, I. HATTWICK, I. FRANCO, D. C. EGLOFF, E. FRID et V. LAMONTAGNE. « Design and Implementation of a Whole-Body Haptic Suit for “Ilinx”, a Multisensory Art Installation ». Actes de : The 12th International Conference on Sound and Music Computing. Maynooth, Irlande, (2015), pp. 169-175 (dans ce manuscrit, voir pages 124, 136).
- [GSW18] M. GIORDANO, J. SULLIVAN et M. M. WANDERLEY. « Design of Vibrotactile Feedback and Stimulation for Music Performance ». *Musical Haptics*. Sous la direction de S. PAPETTI et C. SAITIS. Springer International Publishing, 2018, pp. 193-214 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [GW13] M. GIORDANO et M. M. WANDERLEY. « Measuring the Haptic Behavior of an Acoustic Guitar as Perceived by the Player by Means of a Vibrating Actuator ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 133.5 (2013), pp. 3233-3241 (dans ce manuscrit, voir pages 32, 85, 181, 185).
- [GMZ21] G. S. GIRI, Y. MADDAHI et K. ZAREINIA. « An Application-Based Review of Haptics Technology ». *Robotics*, *Volume* 10.29 (2021) (dans ce manuscrit, voir page 7).
- [GBF14] W. GOEBL, R. BRESIN et I. FUJINAGA. « Perception of Touch Quality in Piano Tones ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 136.5 (2014), pp. 2839-2850 (dans ce manuscrit, voir pages 3, 32, 33, 181).
- [GT74] L. H. GOLDISH et H. E. TAYLOR. « The Optacon : A Valuable Device for Blind Persons ». *Journal of Visual Impairment & Blindness*, *Volume* 68.2 (1974), pp. 49-56 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Gou14] C. GOUGH. « Musical Acoustics ». *Springer Handbook of Acoustics*. Sous la direction de T. D. ROSSING. Springer Handbooks. New York, NY : Springer, 2014, pp. 567-701 (dans ce manuscrit, voir page 181).

- [Gra+19] B. L. GRANT, P. C. YIELDER, T. A. PATRICK, B. KAPRALOS, M. WILLIAMS-BELL et B. A. MURPHY. « Audiohaptic Feedback Enhances Motor Performance in a Low-Fidelity Simulated Drilling Task ». *Brain Sciences*, *Volume* 10.1 (2019) (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Gua03] C. GUASTAVINO. « Étude sémantique et acoustique de la perception des basses fréquences dans l'environnement sonore urbain ». Thèse de doctorat. Paris, France : Université Paris 6, (2003) (dans ce manuscrit, voir page 25).
- [Gua09] C. GUASTAVINO. « Validité Écologique Des Dispositifs Expérimentaux ». *Le Sentir et Le Dire*. Sous la direction de D. DUBOIS. L'Harmattan. 2009, pp. 233-252 (dans ce manuscrit, voir pages 4, 25, 33).
- [Gua21] C. GUASTAVINO. « Exploring Soundscapes ». *Sensory Experiences : Exploring Meaning and the Senses*. Sous la direction de D. DUBOIS, C. CANCE, M. COLER, A. PATÉ et C. GUASTAVINO. John Benjamins Publishing, 2021, pp. 139-167 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [Gua+04] C. GUASTAVINO, B. F. G. KATZ, J.-D. POLACK, D. J. LEVITIN et D. DUBOIS. « Ecological Validity of Soundscape Reproduction ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 91.2 (2004), pp. 333-341 (dans ce manuscrit, voir page 25).
- [GO03] E. GUNTHER et S. O'MODHRAN. « Cutaneous Grooves : Composing for the Sense of Touch ». *Journal of New Music Research*, *Volume* 32.4 (2003), pp. 369-381 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Hay13] L. HAYES. « Haptic Augmentation of the Hybrid Piano ». *Contemporary Music Review*, *Volume* 32.5 (2013), pp. 499-509 (dans ce manuscrit, voir pages 12, 13).
- [Hay+04] V. HAYWARD, O. R. ASTLEY, M. CRUZ-HERNANDEZ, D. GRANT et G. ROBLES-DE-LA-TORRE. « Haptic Interfaces and Devices ». *Sensor Review*, *Volume* 24.1 (2004), pp. 16-29 (dans ce manuscrit, voir page 7).
- [Hee78] G. HEET. « String Instrument Vibration Initiator and Sustainer ». Brevet 4,075,921. 1978 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [HM09] N. G. HORTON et T. R. MOORE. « Modeling the Magnetic Pickup of an Electric Guitar ». *American Journal of Physics*, *Volume* 77.2 (2009), pp. 144-150 (dans ce manuscrit, voir page 13).
- [Hut08] E. HUTCHINS. *Cognition in the wild*. Tome 05. 2. MIT Press, (2008). 391 pages (dans ce manuscrit, voir page 5).
- [Kar+10] M. KARAM, C. BRANJE, G. NESPOLI, N. THOMPSON, F. A. RUSSO et D. I. FELS. « The Emoti-Chair : An Interactive Tactile Music Exhibit ». *Actes de : The 28th of the International Conference on Human Factors in Computing Systems*. Atlanta, USA, (2010), pp. 3069-3074 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Läh10] O. LÄHDEOJA. « Une approche de l'instrument augmenté : la guitare électrique ». Thèse de doctorat. Université Paris 8, (2010) (dans ce manuscrit, voir pages 12-15).
- [Läh+10] O. LÄHDEOJA, B. NAVARRET, S. QUINTANS et A. SEDES. « The Electric Guitar : An Augmented Instrument and a Tool for Musical Composition ». *Journal of Interdisciplinary Music Studies*, (2010), pp. 37-54 (dans ce manuscrit, voir pages 13, 181).
- [Lak17] D. LAKENS. « Equivalence Tests : A Practical Primer for *t* Tests, Correlations, and Meta-Analyses ». *Social Psychological and Personality Science*, *Volume* 8.4 (2017), pp. 355-362 (dans ce manuscrit, voir page 97).

- [Lav13] M. LAVOIE. « Conceptualisation et communication des nuances de timbre à la guitare classique ». Thèse de doctorat. Université de Montréal, (2013) (dans ce manuscrit, voir pages 2, 33).
- [LCP14] J.-L. LE CARROU, B. CHOMETTE et A. PATÉ. « Influence of the Instrumentalist on the Electric Guitar Vibratory Behaviour ». Actes de : International Symposium on Musical Acoustics. Le Mans, France, (2014) (dans ce manuscrit, voir pages 14, 187).
- [LPC19] J.-L. LE CARROU, A. PATÉ et B. CHOMETTE. « Influence of the Player on the Dynamics of the Electric Guitar ». The Journal of the Acoustical Society of America, *Volume* 146.5 (2019), pp. 3123-3130 (dans ce manuscrit, voir pages 14, 32, 181, 182, 187).
- [LL07] G. LEMARQUAND et V. LEMARQUAND. « Calculation Method of Permanent-Magnet Pickups for Electric Guitars ». IEEE Transactions on Magnetics, *Volume* 43.9 (2007), pp. 3573-3578 (dans ce manuscrit, voir page 13).
- [Lew43] K. LEWIN. « Defining the “Field at a given Time” ». Psychological Review, *Volume* 50 (1943), pp. 292-310 (dans ce manuscrit, voir page 4).
- [LLB14] P. LOTTON, B. LIHOREAU et E. BRASSEUR. « Experimental Study of a Guitar Pickup ». Actes de : The International Symposium on Musical Acoustics. Le Mans, France, (2014), pp. 355-360 (dans ce manuscrit, voir page 13).
- [MPS12] A. MAMOU-MANI, L. PLACIDO et D. SHARP. « Physical and Perceptual Differences between Two Trumpets of the Same Model Type ». Actes de : Acoustics. Nantes, France, (2012), pp. 2689-2694 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [MW06] M. T. MARSHALL et M. WANDERLEY. « Vibrotactile Feedback in Digital Musical Instruments ». Actes de : New Interfaces for Musical Expression. Paris, France, (2006) (dans ce manuscrit, voir pages 12, 32).
- [Max09] L. MAXIM. « Du Métadiscours Aux Métaconnaissances ». D. DUBOIS. *In: Le Sentir et Le Dire*. L’Harmattan. (2009), pp. 339-358 (dans ce manuscrit, voir page 46).
- [McP10] A. MCPHERSON. « The Magnetic Resonator Piano : Electronic Augmentation of an Acoustic Grand Piano ». Journal of New Music Research, *Volume* 39.3 (2010), pp. 189-202 (dans ce manuscrit, voir pages 12, 114).
- [MA20] S. MERCHEL et M. E. ALTINSOY. « Psychophysical Comparison of the Auditory and Tactile Perception : A Survey ». Journal on Multimodal User Interfaces, *Volume* 14.3 (2020), pp. 271-283 (dans ce manuscrit, voir page 6).
- [Nan+09] S. NANAYAKKARA, E. TAYLOR, L. WYSE et S. H. ONG. « An Enhanced Musical Experience for the Deaf : Design and Evaluation of a Music Display and a Haptic Chair ». Actes de : The 27th International Conference on Human Factors in Computing Systems. Boston, MA, USA, (2009), pp. 337-346 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Nav13] B. NAVARRET. « Caractériser la guitare électrique : définitions, organologie et analyse de données verbales ». Thèse de doctorat. Université Paris 8, (2013) (dans ce manuscrit, voir pages 9-11, 13, 14, 19, 20, 23, 24, 32-36, 114, 134).
- [Neu04] J. NEUHOFF. *Ecological Psychoacoustics*. Elsevier Academic Press, (2004) (dans ce manuscrit, voir pages 4, 25).

- [Nic+13] H. NICOLAU, J. GUERREIRO, T. GUERREIRO et L. CARRIÇO. « UbiBraille : Designing and Evaluating a Vibrotactile Braille-reading Device ». Actes de : The 15th International ACM SIGACCESS Conference on Computers and Accessibility. Washington, USA : ACM, (2013), pp. 1-8 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Nø189] H. NØLKE. « Pertinence et modalisateurs d'énonciation ». Actes de : 4e Colloque de Pragmatique de Genève. Librairie Droz, (1989), pp. 105-126 (dans ce manuscrit, voir page 45).
- [Nov+16] A. NOVAK, L. GUADAGNIN, B. LIHOREAU, P. LOTTON, E. BRASSEUR et L. SIMON. « Non-Linear Identification of an Electric Guitar Pickup ». Actes de : The 19th International Conference on Digital Audio Effects. Brno, République tchèque, (2016), pp. 241-246 (dans ce manuscrit, voir page 13).
- [ONY13] S. OKAMOTO, H. NAGANO et Y. YAMADA. « Psychophysical Dimensions of Tactile Perception of Textures ». IEEE Transactions on Haptics, *Volume* 6.1 (2013), pp. 81-93 (dans ce manuscrit, voir page 116).
- [OBH11] D. OVERHOLT, E. BERDAHL et R. HAMILTON. « Advancements in Actuated Musical Instruments ». Organised Sound, *Volume* 16.2 (2011), pp. 154-165 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [Par09] C. PARISSÉ. « La morphosyntaxe : Qu'est ce qu'est ? — Application au cas de la langue française ? » Rééducation orthophonique, *Volume* 47.238 (2009), pp. 7-20 (dans ce manuscrit, voir page 39).
- [Pat14] A. PATÉ. « Lutherie de la guitare électrique solid body : aspects mécaniques et perceptifs ». Thèse de doctorat. Paris, France : Université Pierre et Marie Curie, (2014). 398 pages (dans ce manuscrit, voir pages 9-11, 14, 15, 19, 20, 23, 32-36, 134, 181, 182).
- [Pat+22] A. PATÉ, N. d'ALESSANDRO, A. GRÉCIET et C. BRUGGEMAN. « TOuch ThE Music : Displaying Live Music into Vibration ». Actes de : Haptic and Audio Interaction Design. Sous la direction de C. SAITIS, I. FARKHATDINOV et S. PAPETTI. Lecture Notes in Computer Science. London, Angleterre : Springer International Publishing, (2022), pp. 3-13 (dans ce manuscrit, voir pages 8, 124, 136, 171).
- [Pat+17] A. PATÉ, A. GIVOIS, S. L. CONTE, J.-L. LE CARROU, M. CASTELLENGO et S. VAIEDELICH. « Perception of Harpsichord Plectra Voicing ». Acta Acustica united with Acustica, *Volume* 103.4 (2017), pp. 685-704 (dans ce manuscrit, voir page 3).
- [PLF13] A. PATÉ, J.-L. LE CARROU et B. FABRE. « Ebony vs. Rosewood : Experimental Investigation about the Influence of the Fingerboard on the Sound of a Solid Body Electric Guitar ». Actes de : Musical Acoustics Conference. Stockholm, Suède, (2013), pp. 182-187 (dans ce manuscrit, voir page 2).
- [PLF14] A. PATÉ, J.-L. LE CARROU et B. FABRE. « Predicting the Decay Time of Solid Body Electric Guitar Tones ». The Journal of the Acoustical Society of America, *Volume* 135.5 (2014), pp. 3045-3055 (dans ce manuscrit, voir pages 14, 53).
- [Pat+12] A. PATÉ, J.-L. LE CARROU, B. NAVARRET, D. DUBOIS et B. FABRE. « A Vibro-Acoustical and Perceptive Study of the Neck-to-Body Junction of a Solid-Body Electric Guitar ». Actes de : Acoustics. Nantes, France, (2012), pp. 2717-2722 (dans ce manuscrit, voir pages 34, 114, 181).

- [Pat+15] A. PATÉ, J.-L. LE CARROU, B. NAVARRET, D. DUBOIS et B. FABRE. « Influence of the Electric Guitar's Fingerboard Wood on Guitarists' Perception ». *Acta Acustica united with Acustica*, *Volume* 101.2 (2015), pp. 347-359 (dans ce manuscrit, voir pages 9-11, 32, 35, 36, 114).
- [Pen+20] Y.-H. PENG, C. YU, S.-H. LIU, C.-W. WANG, P. TAELE, N.-H. YU et M. Y. CHEN. « WalkingVibe : Reducing Virtual Reality Sickness and Improving Realism While Walking in VR Using Unobtrusive Head-mounted Vibrotactile Feedback ». *Actes de : Human Factors in Computing Systems*. Honolulu, USA, (2020), pp. 1-12 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [PIN16] B. PETRY, T. ILLANDARA et S. NANAYAKKARA. « MuSS-bits : Sensor-Display Blocks for Deaf People to Explore Musical Sounds ». *Actes de : The 28th Australian Conference on Computer-Human Interaction*. Launceston, Tasmania, Australia, (2016), pp. 72-80 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [PLV03] F. PINARD, B. LAINE et H. VACH. « Musical Quality Assessment of Clarinet Reeds Using Optical Holography ». *Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 113.3 (2003), pp. 1736-1742 (dans ce manuscrit, voir page 2).
- [PMS11] L. PLACIDO, A. MAMOU-MANI et D. SHARP. « Investigating Perceptual Differences between Two Trumpets of the Same Model Type ». *Applied Acoustics*, *Volume* 72.12 (2011), pp. 907-914 (dans ce manuscrit, voir page 3).
- [Puc96] M. S. PUCKETTE. « Pure Data : Another Integrated Computer Music Environment ». *Actes de : The Second Intercollege Computer Music Concerts*. (1996), pp. 37-41 (dans ce manuscrit, voir page 116).
- [PAZ98] M. S. PUCKETTE, T. APEL et D. D. ZICARELLI. « Real-Time Audio Analysis Tools for Pd and MSP ». *Actes de : International Computer Music Conference*. Michigan, USA, (1998) (dans ce manuscrit, voir page 117).
- [Riz99] N. RIZET. « Contrôle actif de vibrations utilisant des matériaux piézo-électriques ». Thèse de doctorat. Lyon : Institut National des sciences appliquées (INSA), (1999) (dans ce manuscrit, voir pages 85, 185).
- [RR14] W. H. ROBERTS et B. E. RICHARDSON. « Perceptual Thresholds for String-Body Coupling in Plucked-String Instruments ». *Actes de : International Symposium on Musical Acoustics*. Le Mans, France, (2014), pp. 465-470 (dans ce manuscrit, voir page 181).
- [RAF12] F. A. RUSSO, P. AMMIRANTE et D. I. FELS. « Vibrotactile Discrimination of Musical Timbre. » *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, *Volume* 38.4 (2012), pp. 822-826 (dans ce manuscrit, voir pages 7, 10, 99).
- [Sai+17] C. SAITIS, C. FRITZ, G. P. SCAVONE, C. GUASTAVINO et D. DUBOIS. « Perceptual Evaluation of Violins : A Psycholinguistic Analysis of Preference Verbal Descriptions by Experienced Musicians ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 141.4 (2017), pp. 2746-2757 (dans ce manuscrit, voir pages 9-11).
- [Sai+12] C. SAITIS, B. L. GIORDANO, C. FRITZ et G. P. SCAVONE. « Perceptual Evaluation of Violins : A Quantitative Analysis of Preference Judgments by Experienced Players ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 132.6 (2012), pp. 4002-4012 (dans ce manuscrit, voir pages 4, 5, 9-11, 22, 32, 35, 36).

- [SJF18] C. SAITIS, H. JÄRVELÄINEN et C. FRITZ. « The Role of Haptic Cues in Musical Instrument Quality Perception ». *Musical Haptics*. Sous la direction de S. PAPETTI et C. SAITIS. Springer International Publishing, 2018, pp. 73-93 (dans ce manuscrit, voir pages 3, 9-11, 32, 181).
- [SM14] O. S. SCHNEIDER et K. E. MACLEAN. « Improvising Design with a Haptic Instrument ». Actes de : IEEE Haptic Symposium. Houston, USA, (2014), pp. 327-332 (dans ce manuscrit, voir page 12).
- [She64] R. N. SHEPARD. « Circularity in Judgments of Relative Pitch ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 36.12 (1964), pp. 2346-2353 (dans ce manuscrit, voir page 117).
- [Sol58] L. N. SOLOMON. « Semantic Approach to the Perception of Complex Sounds ». *The Journal of the Acoustical Society of America*, *Volume* 30.5 (1958), pp. 421-425 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [SW89] L. STAHLÉ et S. WOLD. « Analysis of Variance (ANOVA) ». *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *Volume* 6.4 (1989), pp. 259-272 (dans ce manuscrit, voir page 91).
- [Tar+09] J. TARDIEU, P. SUSINI, F. POISSON, H. KAWAKAMI et S. MCADAMS. « The Design and Evaluation of an Auditory Way-Finding System in a Train Station ». *Applied Acoustics*, *Volume* 70.9 (2009), pp. 1183-1193 (dans ce manuscrit, voir page 103).
- [Tar+08] J. TARDIEU, P. SUSINI, F. POISSON, P. LAZAREFF et S. MCADAMS. « Perceptual Study of Soundscapes in Train Stations ». *Applied Acoustics*, *Volume* 69.12 (2008), pp. 1224-1239 (dans ce manuscrit, voir page 103).
- [Tra04] C. TRAUBE. « An Interdisciplinary Study of the Timbre of the Classical Guitar. » Thèse de doctorat. Montreal, Canada : McGill University, (2004) (dans ce manuscrit, voir page 2).
- [TWW20] L. TURCHET, T. WEST et M. M. WANDERLEY. « Touching the Audience : Musical Haptic Wearables for Augmented and Participatory Live Music Performances ». *Personal and Ubiquitous Computing*, *Volume* 25.4 (2020), pp. 749-769 (dans ce manuscrit, voir pages 8, 124, 136).
- [VL19] D. VALKOV et L. LINSEN. « Vibro-Tactile Feedback for Real-world Awareness in Immersive Virtual Environments ». Actes de : IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces. Osaka, Japan, (2019), pp. 340-349 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [VGB18] Y. VARDAR, B. GÜÇLÜ et C. BASDOGAN. « Tactile Masking by Electro vibration ». *IEEE Transactions on Haptics*, *Volume* 11.4 (2018), pp. 623-635 (dans ce manuscrit, voir page 10).
- [Ver16] B. VERINE. « Le vocabulaire tactile existe, je l'ai entendu ». Actes de : Sensorialité et handicap : Toucher pour apprendre, toucher pour communiquer. Paris, France, (2016) (dans ce manuscrit, voir page 36).
- [Ver21] B. VERINE. *Le Toucher par les mots et par les textes*. L'Harmattan, (2021) (dans ce manuscrit, voir pages 9, 22).
- [Ver84] R. T. VERRILLO. « Psychophysics of Vibrotactile Stimulation ». *The Journal of The Acoustical Society of America*, *Volume* 77.1 (1984), page 8 (dans ce manuscrit, voir pages 5, 6, 81, 94, 97, 126, 135).

- [Ver92] R. T. VERRILLO. « Vibration Sensation in Humans ». *Music Perception, Volume 9.3* (1992), pp. 281-302 (dans ce manuscrit, voir pages 5, 6, 85, 117).
- [VFS69] R. T. VERRILLO, A. J. FRAIOLI et R. L. SMITH. « Sensation Magnitude of Vibrotactile Stimuli ». *Perception and Psychophysics, Volume 6.6* (1969), pp. 366-372 (dans ce manuscrit, voir pages 5, 6, 111).
- [Vio04] R. VION. « Dialogisme et polyphonie ». Actes de : Colloque de Cerisy. Tome 29. *Dialogisme, polyphonie : approches linguistiques*, (2004), pp. 143-157 (dans ce manuscrit, voir page 45).
- [WK18] Z. WALLMARK et R. A. KENDALL. « Describing Sound : The Cognitive Linguistics of Timbre ». *The Oxford Handbook of Timbre*. Sous la direction d'E. I. DOLAN et A. REHDING. 1^{re} édition. Oxford University Press, 2018, pp. 578-608 (dans ce manuscrit, voir page 2).
- [Wei77] G. WEINREICH. « Coupled Piano Strings ». *The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 62.6* (1977), pp. 1474-1484 (dans ce manuscrit, voir page 181).
- [Wes+19] T. J. WEST, A. BACHMAYER, S. BHAGWATI, J. BERZOWSKA et M. M. WANDERLEY. « The Design of the Body : Suit :Score, a Full-Body Vibrotactile Musical Score ». *Human Interface and the Management of Information. Information in Intelligent Systems*. Springer International Publishing, 2019, pp. 70-89 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [Win17] W. L. WINDSOR. « Instruments, Voices, Bodies and Spaces Towards an Ecology of Performance ». *Body, Sound and Space in Music and Beyond : Multimodal Explorations*. Sous la direction de C. WÖLLNER. Routledge, 2017, pp. 111-128 (dans ce manuscrit, voir page 4).
- [Wol13] I. WOLLMAN. « Perception Bimodale Des Violonistes En Situation de Jeu : Influence Des Retours Auditif et Vibrotactile Sur l'évaluation Du Violon ». Thèse de doctorat. Université Paris 6, (2013) (dans ce manuscrit, voir page 32).
- [WFP14] I. WOLLMAN, C. FRITZ et J. POITEVINEAU. « Influence of Vibrotactile Feedback on Some Perceptual Features of Violins ». *The Journal of the Acoustical Society of America, Volume 136.2* (2014), pp. 910-921 (dans ce manuscrit, voir pages 3, 32, 181).
- [Wol+14] I. WOLLMAN, C. FRITZ, J. POITEVINEAU et S. MCADAMS. « Investigating the Role of Auditory and Tactile Modalities in Violin Quality Evaluation ». *PLoS ONE, E112552 Volume 9.12* (2014) (dans ce manuscrit, voir pages 3, 9-11, 32, 33, 35, 36, 77, 181).
- [Woo04a] J. WOODHOUSE. « On the Synthesis of Guitar Plucks ». *Acta Acustica united with Acustica, Volume 90* (2004), pp. 928-944 (dans ce manuscrit, voir page 181).
- [Woo04b] J. WOODHOUSE. « Plucked Guitar Transients : Comparison of Measurements and Synthesis ». *Acta Acustica united with Acustica, Volume 90* (2004), pp. 945-965 (dans ce manuscrit, voir page 181).
- [Yao+10] L. YAO, Y. SHI, H. CHI, X. JI et F. YING. « Music-Touch Shoes : Vibrotactile Interface for Hearing Impaired Dancers ». Actes de : The Fourth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction. Cambridge, Massachusetts, USA, (2010), pp. 275-276 (dans ce manuscrit, voir page 8).
- [YMW15] G. YOUNG, D. MURPHY et J. WEETER. « Vibrotactile Discrimination of Pure and Complex Waveforms ». Actes de : The 12th Sound and Music Computing Conference. Maynooth, Irlande, (2015), pp. 359-362 (dans ce manuscrit, voir pages 7, 10).

- [YMW13] G. YOUNG, D. MURPHY et J. WEETER. « Audio-Tactile Glove ». Actes de : The 16th International Conference on Digital Audio Effects. Maynooth, Irlande, (2013) (dans ce manuscrit, voir page 7).
- [Zac+11] A. ZACHARAKIS, K. PASTIADIS, G. PAPADELIS et J. D. REISS. « An Investigation of Musical Timbre : Uncovering Salient Semantic Descriptors and Perceptual Dimensions. » Actes de : International Society for Music Information Retrieval. Miami, Florida, USA, (2011), pp. 807-812 (dans ce manuscrit, voir page 33).
- [ZFO21] Z. ZOOK, J. FLECK et M. K. O'MALLEY. « Effect of Tactile Masking on Multi-Sensory Haptic Perception ». IEEE Transactions on Haptics, *Volume* 15.1 (2021), pp. 212-221 (dans ce manuscrit, voir page 10).

Liste des tableaux

1.1	Quelques résultats sur les capacités humaines de perception vibrotactile, selon le bilan dressé par Merchel et Altinsoy [MA20]. Le JND (<i>Just Noticeable Difference</i>), autrement appelé « seuil de discrimination », est défini comme le plus petit changement dans un stimulus pouvant être détecté par un individu.	6
1.2	Mots identifiés dans les études des instruments de musique (références dans la première colonne) comme n'étant pas associés au son émis par l'instrument. La classification par catégorie définie le cas échéant par les auteurs figure dans la deuxième colonne. Les mots de ce tableau sont traduits des mots présentés dans les articles lorsque ceux-ci étaient en anglais.	11
2.1	Présentation générale des deux études : l'étude Nav13 et l'étude Pat14	23
2.2	Proportion des énoncés décrivant l'interaction à deux niveaux de contexte (contexte morpho-syntaxique et énoncé), par étude et sur l'ensemble du corpus. En élargissant le contexte, il y a une forte augmentation de l'interaction pour chaque étude.	28
2.3	Proportion des types d'expérimentation complexes (ESI-GDP,GDP-DOXA,ESI-DOXA,ESI-DOXA-GDP) à deux niveaux de contexte (phrase et énoncé), par étude et sur l'ensemble du corpus.	30
3.1	Articles using the words chosen for this work.	35
3.2	Words in the corpus for each category, their specific string characters (used to the semi-automatic research) and nature of words (adjective abbr. adj., noun or verb).	37
3.3	Number of occurrences (abbr. # occ.) of each category, percentage of participants having used the words from each category (%), (abbr. # part.), and maximum number of occurrences for a single participant (abbr. Max. # occ. by part.).	38
3.4	Grouping of guitar parts used in the corpus in French with their English translations.	43
3.5	Personal marks in the corpus in French by the kind of subjects, with a proposition of English translation.	45
3.6	Observed parameters (relationship with the sense of touch abbr. Touch, qualified object abbr. Qo., and implication in discourse abbr. Id.) and helpful linguistic features.	47
3.7	Number of utterances (abbr. #utt.) for each group of guitar parts in the corpus.	49
3.8	Distribution of the qualified object in utterances for each category (qualified object for each category with more than 25% of utterances of the category).	50
3.9	Relationship with the sense of touch of utterances by implication in discourse, in percentage. ISE corresponds to immediate sensory experience, GOP corresponds to generalization of practices, and DOXA corresponds to doxa.	52

4.1	Synthèse des résultats de l'étude linguistique du chapitre 3. La première colonne indique la catégorie de mot, la deuxième indique la proportion d'énoncés en lien avec le sens du toucher, la troisième donne l'« objet qualifié » le plus représenté, et la dernière la proportion d'ESI, de GDP et de DOXA pour l'« implication dans le discours » (dont la somme peut dépasser 100% en présence de combinaison de plusieurs possibilités comme ESI-GDP qui est alors compté deux fois, une fois en ESI, une fois en GDP.)	56
4.2	Liste des participants de chaque étude et correspondances entre les participants de l'étude Nav13 revenant dans l'étude Pat14 . Les participants d'une même ligne sont une même personne ayant participé aux 2 expériences.	57
4.3	Comparaison générale des contributions des deux études pour le corpus. * Les énoncés sélectionnés contiennent une occurrence des mots des catégories analysées dans le chapitre 3, CONFORT, DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI, TOUCHER, VIBRATION.	58
4.4	Nombre d'occurrences des mots des catégories par étude.	59
4.5	Pourcentage de participants utilisant les différentes catégories. Ce pourcentage correspond au nombre de participants utilisant au moins un mot de la catégorie sur le nombre total de participant.	59
4.6	Nombre d'occurrences et « rapport au toucher » de la catégorie VIBRATION par les participants employant cette catégorie dans le corpus. Par *, il est rappelé que NavP4 et PatP4 sont la même personne. Aucun autre guitariste présent pour les deux études n'utilise la catégorie VIBRATION dans les deux entretiens. En vert, les 3 participants utilisant le plus VIBRATION dans l'ensemble du corpus.	60
4.7	Pourcentage d'énoncés de chaque étude se rapportant ou non au sens du toucher.	61
4.8	Pourcentage d'énoncés présentant un rapport avec le sens du toucher par catégorie et par étude.	62
4.9	Pourcentage d'énoncés par « objet qualifié » dans chaque étude du corpus. G. en général correspond à une description globale de la guitare. G. objet correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. G. son correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son. La couleur verte met en évidence l'« objet qualifié » le plus décrit dans chaque étude.	64
4.10	Objet qualifié le plus représenté par catégorie dans chaque étude. G. en général correspond à une description globale de la guitare. G. objet correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. G. son correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son.	64
4.11	Pourcentage d'énoncés se rapportant au sens du toucher par « objet qualifié » et par étude. 58,2% des énoncés décrivant la guitare en tant qu'objet ont un rapport avéré avec le sens du toucher. Parler de la guitare en tant qu'objet ou de l'interaction sont un bon moyen de parler du sens du toucher. <i>G. en général</i> correspond à une description globale de la guitare. <i>G. objet</i> correspond à une description de la guitare en tant qu'objet physique. <i>G. son</i> correspond à une description de la guitare en tant qu'émettrice de son.	65
4.12	Pourcentage d'énoncés par « implication dans le discours » dans chaque étude du corpus. La couleur verte permet d'identifier l'étude dans laquelle la proportion de chaque « implication dans le discours » est majoritaire.	65

4.13	Pourcentage du nombre d'énoncé par participant selon le type d'expérimentation. Les participants d'une même ligne sont la même personne, par exemple NavP1 et PatP10, ou NavP9 et PatP3. Le pourcentage d'ESI est plus élevé pour Pat14 , sauf pour le participant NavP8-NavP6, dont le pourcentage est en rouge dans Pat14 . Les traits de NavP3 rappellent qu'il n'a utilisé aucun mot des catégories.	68
5.1	Les notes choisies pour l'expérience. Une note a été choisie par corde, en haut du manche sur les premières cases. La présence de * indique la coïncidence des fréquences d'un partiel de la note avec au moins une fréquence d'un mode de structure (différence de fréquence inférieure à 5 Hz), qu'il s'agisse du fondamental ⁽¹⁾ ou d'un des partiels suivants ⁽² ou ³⁾	83
5.2	Les différents types de filtres appliqués au signal de l'accéléromètre. Les filtres choisis sont des filtres IIR (<i>infinite impulse response</i>).	87
5.3	Présentation des résultats du modèle comprenant les facteurs avec les interactions. Le facteur <i>Participant</i> décrit un facteur aléatoire. La présence de * indique si le facteur implique <i>a priori</i> des différences significatives. L'analyse a été effectuée avec le logiciel <i>Matlab</i>	93
5.4	Critères d'évaluation des guitaristes pour distinguer les signaux. Les chiffres entre parenthèses correspondent au nombre de guitaristes ayant employé le mot qui précède. Chaque catégorie est un regroupement arbitraire, et n'est pas issu d'une analyse sémantique.	95
5.5	Parties du corps décrites par les guitaristes comme zones de ressenti des vibrations. Le numéro du participant est donné entre parenthèse avant le détail des zones de ressenti.	96
6.1	Les notes choisies pour l'expérience. Une note a été choisie par corde, en haut du manche sur les premières cases. La présence de * indique la coïncidence des fréquences d'un partiel de la note avec au moins une fréquence d'un mode de structure (différence inférieure à 5 Hz), selon qu'il s'agit du fondamental ⁽¹⁾ ou d'un des partiels suivants ⁽² ou ³⁾	102
6.2	Résultats des tests LR (<i>Likelihood Ratio</i>) sur les interactions entre les facteurs, et sur le facteur <i>Phase</i> . La présence de * signifie que le test montre une interaction significative ou un facteur significatif (p-value < 0,05). Comme les facteurs <i>Note</i> , <i>Participant</i> et <i>Paire</i> interviennent dans des interactions significatives, il n'est pas utile de regarder le résultat du test sur le facteur. Si l'on souhaite savoir s'il y a un effet du facteur <i>Paire</i> par exemple, alors il faudra le faire séparément par note. Si un facteur est impliqué dans une interaction, on garde le facteur dans le modèle. 106	
6.3	Pourcentage de bonnes réponses des participants par <i>Paire</i> , par <i>Note</i> et par <i>Phase</i> . Les valeurs du tableau correspondent au nombre de bonnes réponses divisé par le nombre total de tests (22 comparaisons par condition, 2 répétitions par participant et 11 participants).	108

6.4	Synthèse des résultats des tests binomiaux par <i>Paire</i> , par <i>Note</i> et par <i>Phase</i> . Les valeurs du tableau correspondent au nombre de tests binomiaux avec une p-value inférieure à 0,05 sur les 2 paires de chaque binôme. Par exemple, les paires Acc-FT 2 et Acc 2-FT font partie du binôme Acc-FT . Si la valeur dans le tableau est 2, alors la p-value est inférieure à 0,05 pour chacune des deux paires, donc les signaux sont perçus comme différents. Si la valeur est 1, alors une des deux paires donne une p-value inférieure à 0,05, l'autre une p-value supérieure à 0,05. Enfin, si la valeur est 0 (en gras, car mettant en valeur que les signaux du binôme ne sont pas différenciés par les guitaristes), alors les 2 paires donnent des tests binomiaux avec des p-values supérieures à 0,05.	109
7.1	Liste des mots utilisés pour désigner les curseurs du retour audio et du retour vibrotactile sur l'interface.	120
7.2	Suivi des actions sur l'interface MIDI de tous les participants pendant la phase 1. Les colonnes 3 et 4 indiquent le nombre d'actions effectuées sur chaque curseur, respectivement pour les curseurs vol et eff	120
7.3	Occurrences des catégories de l'analyse linguistique (chapitre 2), dans les transcriptions de l'expérience de ce chapitre.	121
7.4	Nombre d'énoncés pour chaque type de retour (audio, vibrotactile, ou combinaison de plusieurs retours).	121
A.1	Éléments de guitare présents dans le corpus, par groupe. Les termes anglais <i>maple</i> pour l'érable et <i>rosewood</i> pour le palissandre sont présentés dans ce tableau, car utilisés par les locuteurs français.	163
A.2	Nombre d'occurrences pour les groupes d'éléments de guitare, par étude.	164
A.3	Pourcentage d'énoncés avec la mention d'un élément de guitare, pour chaque groupe d'éléments de guitare. 11,4% des énoncés de Nav13 contiennent des éléments du groupe <i>Bois</i>	164
A.4	Pourcentage d'énoncés en rapport avec le sens du toucher par groupe d'éléments de guitare. 38,5% des énoncés contenant un mot du groupe <i>Bois</i> ont un rapport avec le sens du toucher. Le tiret pour <i>Corps</i> dans l'étude Pat14 met en évidence qu'aucun élément de ce groupe n'est présent dans les énoncés extraits de Pat14	165
B.1	Nombre d'occurrences par catégorie de mots et par participant. Les tirets indiquent qu'aucune mention de la catégorie n'est présente pour le participant concerné, notamment dans le cas de NavP3 qui n'emploie aucun des mots des catégories choisies.	168
C.1	Détail sur l'utilisation de la catégorie TOUCHER dans l'étude Pat14 . En gras, les questions des chercheurs avec TOUCHER. En première colonne, la référence de participant, et en deuxième colonne le détail du nombre d'occurrences et des questions posées par l'expérimentateur.	170

F.1	Déformées modales avec les fréquences de résonance correspondantes (Hz) et les amortissements (%) de la guitare <i>Squier Classic Vibe '50s Telecaster</i> , calculés en faisant une analyse modale, implémentée dans la fonction <i>modalfit</i> de <i>Matlab</i> . Les déformées sont présentées en rouge, en comparaison à l'état de la guitare au repos (en gris). Ce tableau est repris de Cambourian Paul, Gal Oscar, Paté Arthur, Benacchio Simon et Vasseur Jérôme, « Understanding the vibrotactile feedback of the electric guitar : Methodology for a physical and perceptual study », <i>The proceedings of Audio Mostly, 2021</i> [Cam+21].	183
H.1	Comparaisons multiples par paires pour les participants. Test post-hoc de Tukey.	196
H.2	Comparaisons multiples par paires pour les filtres. Test post-hoc de Tukey.	197
I.1	Résultats des test binomiaux par <i>Paire</i> . La p-value est donnée dans le cas « unilatéral », c'est-à-dire dans le cas où il est vérifié, dans chaque condition, si la probabilité de donner une bonne réponse est supérieure au hasard (1/3). La présence de * indique que le test binomial conclut à une différence significative, avec la correction de Bonferroni.	200

Liste des figures

1.1	Courbe du seuil de perception des vibrations en fonction de la fréquence du signal vibratoire, présentée par Verrillo [Ver84, page 229].	6
1.2	Schéma d'une guitare électrique <i>solid body</i> , sur le modèle de guitare <i>Telecaster</i> de <i>Fender</i> , et dénomination des parties utiles à la compréhension des différents chapitres de cette thèse.	13
1.3	Schéma simplifié de la chaîne électro-acoustique de la guitare électrique, inspirée de Lähdeoja [Läh10] et de Paté [Pat14], avec l'ajout de la modification vibratoire envisagée pour ce travail de thèse (en bleu). L'interface (carte son et ordinateur) n'est pas utilisée dans le cas habituel d'utilisation de la guitare électrique (où la guitare est directement branchée à l'amplificateur).	15
2.1	Guitare de type <i>Les Paul Junior</i> , utilisée pour l'étude Nav13 [Nav13]	24
2.2	Vues de dessus (guitare photographiée de face) des trois jonctions manche/corps caractéristiques de chacun des trois types de guitares fabriqués. Ces photos sont directement issues de la thèse de Benoît Navarret [Nav13]. De gauche à droite : manche collé (cas classique pour la <i>Gibson Les Paul Junior</i>), manche vissé et manche traversant.	24
2.3	Manches avec différents matériaux de touche, (a) représente une touche en bois d'ébène (noire) et (b) une touche en bois de palissandre (marron). Les deux images proviennent du lien suivant : https://www.bax-shop.fr/blog/guitare/quelle-est-limportance-du-bois-dune-touche-de-guitare/ (consultation le 16 octobre 2022)	24
3.1	Percentage of utterances in relationship with the sense of touch for each category.	48
3.2	Percentage of utterances in relationship with the sense of touch by guitar parts group.	49
3.3	Percentage of each qualified object for each category of words : musician, interaction, guitar (abbr. g.) as sound, g. as object, g. in general.	50
3.4	Percentage of different implication in discourse for each category, with the analysis on sentence context. ISE corresponds to immediate sensory experience, GOP corresponds to generalization of practices, and DOXA corresponds to doxa.	51
4.1	Objet qualifié par étude et par catégorie.	64
4.2	Implication dans le discours pour chaque étude. L'axe radial définit le pourcentage d'énoncés en fonction de chaque possibilité. ESI correspond à de l'expérience sensible immédiate, GDP à de la généralisation des pratiques et DOXA correspond à de la doxa.	66

5.1	Photo d'un guitariste en situation de jeu. Les zones en rouge mettent en évidence les zones de contact entre le guitariste et la guitare.	80
5.2	Vibreux <i>Dayton Audio DAEX19CT-4</i> placé sur la tête de la guitare et accéléromètre <i>B&K 4393</i> placé derrière le manche, mis en évidence par les zones en rouge.	82
5.3	Spectre du signal vibratoire mesuré lors du jeu de la note 4 ($Ré_2$, 146,8 Hz) par le participant P4. Les lignes verticales pointillées, fines, noires, sont aux fréquences des modes de structure, les lignes verticales pointillées, épaisses, bleues sont aux fréquences des premiers partiels (fréquence du fondamental et des harmoniques suivants). La fréquence du troisième partiel est très proche de la fréquence d'un autre mode de structure (moins de 5 Hz), qui n'est pas visible sur le spectre, car il est d'amplitude trop faible par rapport à l'amplitude du partiel.	84
5.4	Fonction de transfert mesurée pour le participant P5 de l'expérience.	85
5.5	Spectres relatifs aux 5 types de filtres appliqués aux signaux. La réponse en fréquence est affichée en trait plein bleu en fonction de l'entrée (balayage fréquentiel linéaire généré par <i>Matlab</i> avec la fonction <code>chirp</code> , de 1 Hz à 1000 Hz), affichée elle en trait plein rouge, pour chacun des filtres.	86
5.6	Mise en situation du guitariste pendant la phase d'évaluation.	89
5.7	Interface logicielle proposée aux participants.	89
5.8	Moyennes (de tous les participants et toutes les notes), $\pm ET$ (l'écart type de tous les participants, à partir de la moyenne des notes, croix bleues) et l'IC (intervalle de confiance, entre les traits horizontaux rouges) des scores de similarité des différents filtres avec les vibrations ressenties en situation de jeu. Les traits noirs rappellent que <i>PB 900 Hz</i> et <i>PB fondamentale</i> sont chacun présent deux fois (pour chaque série de 7 stimuli).	90
5.9	Graphique quantile-quantile sur les résidus (normalité). La droite en pointillés rouge représente la loi normale, et les croix bleues sont les résidus des données de l'expérience.	92
5.10	Graphique des résidus (homoscédasticité). Les croix bleues sont les résidus des données.	92
6.1	Spectre des trois types de signaux (Acc , FT , Pickup), décalés de 20 dB pour faciliter la lecture, avec la note Si_1 (corde 5, case 2, 123,5 Hz).	100
6.2	Positions, indiquées par les cercles rouges, du vibreur et de l'accéléromètre pendant l'étape de mesure.	102
6.3	Position des mains d'un guitariste pendant la mesure de la fonction de transfert. La main droite étouffe les cordes.	103
6.4	Interface MIDI <i>Novation Launchpad MIDI</i> avec laquelle les guitaristes interagissent. En haut, le numéro de la note à jouer est indiqué (de 1 à 6), les boutons au milieu en rouge ou en vert permettent de choisir le signal généré (A, B ou C) et les boutons en jaune en dessous permettent aux guitaristes de répondre en déterminant le signal qu'ils pensent être différent des autres. Les boutons en bas à gauche indiquent le mode de déclenchement des signaux (voir l'explication de la <i>Phase</i> dans cette section), et le bouton en bas à droite permet d'enregistrer la réponse pour passer aux signaux suivants.	104
7.1	Vue schématique de l'expérience, reprise de la figure 1.3, avec le détail du matériel de l'expérience. La chaîne de modification du retour vibrotactile est mise en valeur (traits plus épais en bleu).	115

7.2	L'interface MIDI utilisée pendant l'expérience. De gauche à droite, les colonnes 1-2, 3-4 contrôlent respectivement le retour audio et le retour vibrotactile. Les curseurs 1 et 3 contrôlent le volume de sortie et les curseurs 2 et 4 contrôlent la quantité d'effet du retour audio et du retour vibrotactile, respectivement. Les boutons situés sous les curseurs activent et désactivent chaque retour, devenant respectivement verts et rouges.	116
7.3	Train d'impulsions avec une variation cyclique de la largeur et de la fréquence, utilisé comme signal « rugueux » envoyé au vibreur pour le retour vibrotactile.	117
8.1	Reprise de la figure 1.3. L'ajout de la modification vibratoire effectuée lors des expériences que j'ai menées est figuré en bleu.	131
D.1	Vibreux posé sur une table en bois, en position pour le calcul de l'impédance.	172
D.2	Mesures d'impédance des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX19CT-4</i> et V25 aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX25CT-4</i> . Zoom sur la résonance de chaque vibreur. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.	173
D.3	Mesures d'impédance des vibreurs au niveau de la fréquence de résonance des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX19CT-4</i> et V25 aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX25CT-4</i> . Zoom sur la résonance de chaque vibreur. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.	173
D.4	Position des vibreurs sur la tête de la guitare pour les mesures.	174
D.5	Mesure des fonctions de transfert pour chaque vibreur, autour de la fréquence de résonances des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX19CT-4</i> et V25 (+20dB) aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX25CT-4</i> . Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.	174
D.6	Mesure des fonctions de transfert pour chaque vibreur. Il s'agit de l'observation entre 20 Hz et 200 Hz de la figure D.5. V19 correspond aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX19CT-4</i> et V25 aux vibreurs <i>Dayton Audio DAEX25CT-4</i> . Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.	175
E.1	Principe de fonctionnement d'un contrôle de type <i>feedback</i> . Ce schéma est issu de [Ben14, page 15].	178
E.2	Guitare posée sur un stand, avec vibreur placé sur la tête, et accéléromètre placé derrière le manche.	179
E.3	Efficacité du contrôle actif modal (rouge) sur la réponse vibratoire de la structure (bleu si non contrôlé) lorsque cette dernière est perturbée par un sinus glissant de 1 à 1000 Hz. Ces résultats sont obtenus pour une multiplication par 2 du coefficient d'amortissement du 1 ^{er} mode et par 3 du coefficient d'amortissement des 2 ^e et 3 ^e modes (les fréquences des 3 premiers modes sont illustrés par les lignes verticales en pointillés bleus).	180
F.1	Installation pour l'analyse modale. Les carrés jaunes représentent les 59 points de frappe pour les mesures.	184
F.2	Position du guitariste au niveau du manche de la guitare, avec accéléromètre. L'accéléromètre est placé derrière le manche de la guitare au niveau de la main du guitariste. Le vibreur est placé sur la tête de la guitare.	184
F.3	Tête de la guitare, avec le placement de l'accéléromètre pour les mesures en situation de jeu. Il est placé derrière le manche de la guitare au niveau de la main du guitariste. Le vibreur est placé sur la tête de la guitare.	185

F.4	Position de la main d'un participant et spectre de la fonction de transfert calculée.	186
F.5	Différentes position de l'accéléromètre en fonction des participants.	186
F.6	Moyenne des fonctions de transfert (en noir) pour les participants de chaque expérience, (a) du chapitre 5 (9 participants), et (b) du chapitre 6 (11 participants). La moyenne est encadrée par les valeurs maximum (bleu) et minimum (rouge). Les fréquences de résonance sont mises en valeur par les lignes verticales en pointillé.	188
F.7	Position de la main de chaque participant tenant le manche et fonction de transfert mesurée pour l'expérience présentée au chapitre 5.	189
F.8	Spectres des mesures à l'accéléromètre en situation de jeu (excitation au médiateur, en bleu) ou en réinjection (réinjection de la mesure à l'accéléromètre avec fonction de transfert, à l'aide du vibreur, en vert), pour la note sol# (corde 3, case 1). . .	191
G.1	Superposition des réponses temporelles et fréquentielles d'une même mesure pour la carte d'acquisition <i>NI-9223</i> (en rouge) et la carte son <i>Focusrite Scarlett 2i2</i> (en bleu). Le rapport entre les deux signaux est présenté en noir en fréquentiel. . . .	194

Annexes

Les éléments de guitare dans l'étude linguistique

Cette annexe est un complément du chapitre 4. Il est fait référence à cette annexe dans la section 4.2.1. Cette annexe donne le détail de l'étude des mentions des éléments de guitare dans le corpus. Leur présence est un argument fort pour la discrimination des énoncés sur la base de leur rapport au toucher.

A.0.0.1 Nombre d'énoncés mentionnant chaque partie de la guitare

Au total, 173 énoncés font mention d'éléments de guitare sur les 370 du corpus (124 dans **Nav13** et 49 dans **Pat14**). Les éléments de guitare rencontrés dans les énoncés du corpus sont inscrits dans le tableau A.1 et triés par groupes. Comme vu dans le chapitre 3, les éléments de guitare sont répartis en 6 groupes : *Bois*, *Corde*, *Corps*, *Électronique*, *Équipement* et *Manche*.

<i>Bois</i>	<i>Corde</i>	<i>Corps</i>	<i>Électronique</i>	<i>Équipement</i>	<i>Manche</i>
Bois	Action	Caisse	Ampli	Accastillage	Barrette
Ébène	Corde	Chanfrein	Bobinage	Attache de courroie	En D
Érable	Diapason	Corps	Double	Capo	Frette
<i>Maple</i>	Échelle	Planche	Micro	Chevalet	Manche
Lutherie	Nylon	Table	Pédale	Cordier	Sillet (de tête)
Matériaux	Tirant		Plot	Médiator	Touche
Palissandre			Potard	Vibrato	
<i>Rosewood</i>			Sélecteur		

TABLEAU A.1 – Éléments de guitare présents dans le corpus, par groupe. Les termes anglais *maple* pour l'érable et *rosewood* pour le palissandre sont présentés dans ce tableau, car utilisés par les locuteurs français.

La question posée dans cette annexe est de savoir si, relativement aux six catégories de mots, les éléments de guitare sont évoqués à la même fréquence d'une étude à l'autre. Les tableaux A.2 et A.3 montrent que les guitaristes de l'étude **Nav13** ont eu davantage tendance à se référer à des éléments de guitare que ceux de l'étude **Pat14**.

	Nav13	Pat14	TOTAL des 2 études
<i>Bois</i>	26	9	35
<i>Corde</i>	54	13	67
<i>Corps</i>	25	0	25
<i>Électronique</i>	43	10	53
<i>Équipement</i>	10	6	16
<i>Manche</i>	33	25	58
TOTAL	124	49	173

TABLEAU A.2 – Nombre d'occurrences pour les groupes d'éléments de guitare, par étude.

%	Nav13	Pat14	TOTAL des 2 études
<i>Bois</i>	11,4	6,4	9,5
<i>Corde</i>	23,6	9,2	18,1
<i>Corps</i>	10,9	0,0	6,8
<i>Électronique</i>	18,8	7,1	14,3
<i>Équipement</i>	4,4	4,3	4,3
<i>Manche</i>	14,4	17,7	15,7
TOTAL	54,1	34,8	46,8

TABLEAU A.3 – Pourcentage d'énoncés avec la mention d'un élément de guitare, pour chaque groupe d'éléments de guitare. 11,4% des énoncés de **Nav13** contiennent des éléments du groupe *Bois*.

Il est intéressant d'observer, avec le groupe *Bois*, que le changement de matériau de la touche pour l'étude **Pat14** n'ait pas amené plus de mentions sur le bois que l'étude **Nav13**. Dans l'étude **Pat14**, *Bois* n'est que très minoritairement employé. Il s'agit peut être d'un effet du choix des mots pour ce corpus, et du fait que les catégories CONFORT, DYNAMIQUE, RÉPONSE, RESENTI, TOUCHER et VIBRATION ne sont pas utilisées en association avec les éléments du groupe *Bois*. *Corde* et *Électronique* sont les deux groupes les plus mentionnés dans l'étude **Nav13**. Il est difficile d'expliquer pourquoi *Électronique* est fortement utilisé dans l'étude **Nav13**. Dans l'étude **Pat14**, lorsque le matériau de la touche change d'une guitare à l'autre, le groupe *Manche* est le plus utilisé. Aucune mention du groupe *Corps* n'est présente dans les énoncés de l'étude **Pat14**, ce qui est surprenant.

Le détail des études nous montre que l'étude **Nav13** a été plus propice à parler des éléments de guitare que l'étude **Pat14**, pour les groupes *Bois*, *Corde*, *Corps* et *Électronique*. Il n'y a pas d'explication identifiée pour justifier cette différence.

A.0.0.2 Rapport au toucher des éléments de guitare

Le tableau A.4 montre que, dans les énoncés du corpus, la mention d'éléments de guitare induit un fort rapport avec le sens du toucher pour chaque groupe d'éléments de guitare, à l'exception d'*Électronique*. Les mentions du *Manche* garantissent un fort taux d'énoncés en rapport avec le sens du toucher, contrairement aux mentions d'*Électronique*, pour lesquels le taux d'énoncés en rapport avec le sens du toucher est faible.

Il est confirmé que la mention d'éléments de guitare permet d'identifier le « rapport au toucher » dans les énoncés, qu'il s'agisse du groupe *Manche* dans le cas d'un lien avec le sens du

	Nav13	Pat14	TOTAL des 2 corpus
<i>Bois</i>	38,5	100,0	54,3
<i>Corde</i>	52,8	92,3	60,6
<i>Corps</i>	66,7	—	66,7
<i>Électronique</i>	14,0	20,0	15,1
<i>Équipement</i>	30,0	83,3	50,0
<i>Manche</i>	84,8	100,0	91,4

TABLEAU A.4 – Pourcentage d'énoncés en rapport avec le sens du toucher par groupe d'éléments de guitare. 38,5% des énoncés contenant un mot du groupe *Bois* ont un rapport avec le sens du toucher. Le tiret pour *Corps* dans l'étude **Pat14** met en évidence qu'aucun élément de ce groupe n'est présent dans les énoncés extraits de **Pat14**.

toucher, ou du groupe *Électronique* pour vérifier qu'il n'y a pas de lien avec le sens du toucher. Le groupe *Corps* est fréquemment utilisé dans les énoncés parlant du toucher, malgré l'absence de comparaison possible entre les deux études. Dans le cas des autres groupes, à savoir *Bois*, *Corde* et *Équipement*, les résultats sont très différents d'une étude à l'autre.

Annexe **B**

Nombre d'occurrences par catégorie et par participant

Cette annexe est un complément de la discussion de la section 4.2.2. Le tableau B.1 présente le détail du nombre d'occurrences par catégorie et par participant sur l'ensemble du corpus. Il met en évidence que les mots étudiés ne sont pas tous employés par tous les guitaristes. Le participant NavP3 n'emploie d'ailleurs aucun mot des catégories étudiées.

À l'inverse, certains participants ont beaucoup utilisé certains mots. C'est le cas de NavP10 pour VIBRATION.

Il a été noté assez peu de variations du nombre d'occurrences des catégories chez les participants revenant pour les deux tests, sauf pour RÉPONSE (NavP2-PatP5) et pour TOUCHER (NavP9-PatP3).

Occurrences	CONFORT	DYNAMIQUE	RÉPONSE	RESSENTI	TOUCHER	VIBRATION	TOTAL
NavP1	1	–	2	1	5	3	12
NavP2	7	–	10	–	1	–	18
NavP3	–	–	–	–	–	–	–
NavP4	–	7	–	2	1	2	12
NavP5	2	–	3	5	1	1	12
NavP6	3	–	–	2	–	2	7
NavP7	–	–	17	6	–	4	27
NavP8	–	–	12	4	–	2	18
NavP9	–	1	2	1	1	–	5
NavP10	–	–	10	11	4	26	51
NavP11	2	–	5	1	8	–	16
NavP12	1	1	4	5	11	10	32
NavP13	2	2	2	1	3	9	19
PatP1	6	–	6	2	2	–	16
PatP2	2	13	1	2	2	3	23
PatP3	–	–	10	3	9	–	22
PatP4	–	11	1	–	5	1	18
PatP5	4	–	1	–	4	–	9
PatP6	1	–	14	2	1	–	18
PatP7	–	–	–	1	1	–	2
PatP8	1	2	5	2	6	1	17
PatP9	–	–	1	2	3	–	6
PatP10	3	–	6	–	1	–	10
TOTAL	35	37	112	53	69	64	370

TABLEAU B.1 – Nombre d'occurrences par catégorie de mots et par participant. Les tirets indiquent qu'aucune mention de la catégorie n'est présente pour le participant concerné, notamment dans le cas de NavP3 qui n'emploie aucun des mots des catégories choisies.

Occurrences de TOUCHER

Cette annexe est un complément de la section 4.2.2. Elle détaille les énoncés de la catégorie TOUCHER de l'étude **Pat14**. Tous les participants à l'étude **Pat14** utilisent la catégorie TOUCHER, contrairement à ce que font les participants à l'étude **Nav13**. Cela peut s'expliquer par une question systématiquement posée par les chercheurs sur le toucher. De nombreuses occurrences de TOUCHER sont prononcées par les participants à la suite d'une question des chercheurs utilisant ce terme. Le détail sur les occurrences de TOUCHER est présenté par participant (à l'étude **Pat14**) dans le tableau C.1¹. Dans chaque étude, certains guitaristes n'auraient certainement pas employé TOUCHER si les expérimentateurs ne les avaient pas eux-mêmes employés.

En retirant les énoncés de TOUCHER qui font suite à des questions des chercheurs utilisant le terme, il ne reste que 61% des participants de l'étude **Nav13** qui l'utilisent de façon libre et 80% des participants de l'étude **Pat14**. Dans les énoncés de TOUCHER, c'est aussi le verbe « toucher » qui est utilisé, dans le sens de « bouger », « manipuler », « faire varier », en parlant principalement des réglages électroniques sur l'amplificateur ou la pédale d'effet. C'est un détail qui a son importance, comme montré dans le chapitre 3, section 3.5, les occurrences du verbe « toucher » ne sont que très peu liées au sens du toucher. L'utilisation du verbe « toucher » est très présente dans l'étude **Pat14**. Le nom « toucher » n'est que peu utilisé par les guitaristes pour s'expliquer sur le sens du toucher et sur le retour vibrotactile de leur instrument.

1. Il est précisé que TOUCHER contient les occurrences du nom « toucher » et du verbe « toucher », mais pas les occurrences du nom « touche », faisant référence à la touche de la guitare.

Part.	Détail sur l'emploi de TOUCHER
PatP1	2 occurrences du verbe
PatP2	1 occurrence du nom suite à la question : Est-ce que tu as constaté des différences de toucher entre les guitares ? 1 occurrence du verbe
PatP3	2 occurrences suite à la question : est-ce que tu as constaté des différences de toucher entre ces quatre guitares ? 7 occurrences du verbe
PatP4	3 occurrences du nom suite à la question : Oui, très bien. Euh, on a une dernière question, est-ce que t'as eu, t'as ressenti des différences de toucher entre ces quatre guitares. 2 occurrences du verbe
PatP5	1 occurrence du nom suite à la question : On cherche aussi à savoir si tu as ressenti des différences de toucher entre les guitares, mais tu en as déjà parlé. Tu as parlé du manche de la 4. Je crois qu'il y a un des manches que tu as trouvé plus fin, c'était la 6, non ? 1 occurrence du nom suite à la question : Et sinon, quand on te parle de toucher, qu'est-ce que ça englobe pour toi, est-ce que c'est un terme pour toi qui, enfin quand on te dit de parler du toucher de l'instrument, est-ce que, quels sont les aspects que tu mettrais dans ce terme-là, est-ce que toi tu privilégierais peut-être un autre terme, plutôt que de parler de toucher ? 1 occurrence du verbe après la question : Comment on peut être amené à être sensible à un toucher de touche alors qu'a priori on ne la touche pas, cette touche ? 1 occurrence du verbe après la question : Donc le toucher tu ne l'as pas trop, par contre tu nous as précisé qu'entre une touche ébène et une touche palissandre, au niveau de la réponse. . . Tu as dit touche ébène plus précis, touche palissandre plus chaud. . .
PatP6	1 occurrence du verbe
PatP7	0 occurrence suite à la question : Par rapport à ces guitares, on n'a pas abordé la question, mais la question du toucher... 0 occurrence suite à la question : est-ce qu'il y a des choses que t'aurais à dire à propos du toucher sur... sur chacune des guitares... 1 occurrence du nom suite à la question : Disons que quand on te parle de toucher, c'est peut-être pas le terme qui te parle le plus. A quoi tu associerais le toucher ? Quand on parle de toucher, à quoi tu l'associes ? C'est peut-être nous qui n'avons pas le terme qui correspond... 0 occurrence suite à la question : C'est pas un aspect, finalement, qui t'a... quand on te parle de toucher, ou de confort, ou, c'est pas...
PatP8	5 occurrences du nom et 1 occurrence du verbe suite à la question : Euh, il y a juste une question euh finale, subsidiaire, est-ce que, on voudrait vérifier, est-ce que t'as ressenti des différences de toucher ?
PatP9	1 occurrence du verbe 2 occurrences du nom en fin de test sur la remarque des changements de matériaux de touche
PatP10	1 occurrence du nom, suite à une question sur CONFORT

TABLEAU C.1 – Détail sur l'utilisation de la catégorie TOUCHER dans l'étude **Pat14**. En gras, les questions des chercheurs avec TOUCHER. En première colonne, la référence de participant, et en deuxième colonne le détail du nombre d'occurrences et des questions posées par l'expérimentateur.

Excitateur électrodynamique

Il existe un grand nombre d'excitateurs utilisables pour des applications vibrotactiles, comme en atteste la liste dressée par Choi et Kuchenbecker [CK13]. Les excitateurs peuvent être classés en 3 grandes catégories :

- électromagnétiques linéaires (EML), comme les haut-parleurs ;
- électromagnétiques à rotation (EMR), comme les moteurs à masse excentrique ;
- piézo-électriques (PE), comme les polymères électro-actifs.

D.0.0.1 Choix de l'excitateur

Les excitateurs EMR ne permettent de diffuser qu'une fréquence à la fois, directement liée à la vitesse de rotation de l'excitateur. De tels excitateurs offrent des possibilités limitées pour générer des signaux complexes : bande passante limitée, amplitude de sortie dépendante de la fréquence. Ils ne peuvent donc pas être utilisés dans ce travail, qui nécessite des signaux complexes : soit à fréquence variable, soit comportant différentes fréquences. Les excitateurs EML permettent de générer les signaux que l'on souhaite, tout comme les PE, très utilisés pour le contrôle actif des vibrations (comme le font Aridogan et Bascogan [AB15, tableau I. p. 17] sur des architectures avec excitateurs piézo-électriques pour la suppression du bruit de structures en plaque). Cependant, les PE ne sont pas adaptés aux impédances des cordes de guitare électrique, comme expliqué par Berdahl [BI06]. Les EML sont donc plus adaptés aux applications de ce travail, ce qui est confirmé par le travail de thèse de Giordano, qui a étudié les différents actionneurs [Gio16]. Il est possible d'utiliser des signaux audio avec les excitateurs EML, ce qui présente plusieurs avantages [Pat+22] :

- génération de signaux complexes : les signaux vibrotactiles sont aussi complexes que les signaux audio, donc les excitateurs EML sont, normalement, également adaptés pour les applications vibratoires ;
- les logiciels utilisés pour le traitement audio (par exemple *Pure Data*) peuvent être utilisés pour contrôler des excitateurs EML, et alors pour le traitement tactile.

Dans ce travail, le retour vibrotactile est généré par un excitateur électrodynamique (appelé vibreur dans ce travail). Les vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* (diamètre 19 mm, 5 W, 4 Ω) sont utilisés dans le cadre du chapitre 5, et des vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4* (diamètre 25 mm, 10 W, 4 Ω) sont utilisées pour les chapitres 6 et 7.

D.0.0.2 Réponse en fréquence des vibreurs

La réponse électrique en fréquence des vibreurs est mesurée à l'impédancemètre *Keysight E4990A*. La position du vibreur est montrée figure D.1.



FIGURE D.1 – Vibreur posé sur une table en bois, en position pour le calcul de l'impédance.

La réponse en fréquence des différents vibreurs (voir figure D.2) montre une résonance pour chacun, autour de 38 Hz pour les trois *Dayton Audio DAEX25CT-4* et 102 Hz (valeur médiane sur les trois vibreurs) pour les trois *Dayton Audio DAEX19CT-4*. Ces fréquences sont beaucoup plus faibles que les fréquences de résonance annoncées par les constructeurs. Cela s'explique par la position du vibreur pendant la mesure, et alors par les conditions aux limites. Dans le cas présenté, l'équipage mobile est constitué de la partie métallique du vibreur, de masse importante, la membrane étant fixée au support. En retournant le vibreur, la membrane constitue l'équipage mobile, la partie métallique étant fixée au support. La réponse mesurée par les constructeurs doit être effectuée avec le vibreur dans l'autre sens.

En s'intéressant davantage à ces résonances (figure D.3), les différences de valeur des fréquences de résonance sont de l'ordre de 10% pour les vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* et moins de 0.1% pour les vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4*.

D.0.0.3 Sur la guitare

Une fonction de transfert est mesurée pour chaque vibreur, définie comme le rapport entre l'accélération mesurée et la tension électrique envoyée au vibreur, entre le vibreur (positionné sur la tête de la guitare) et l'accéléromètre (placé derrière le manche). La position des vibreurs est présentée en figure D.4 et les fonctions de transfert sont présentées figure D.5.

Au niveau des fréquences de résonance (figure D.6), beaucoup de bruit est observé pour les vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4* entre 90 Hz et 100 Hz. De plus, l'amplitude au niveau de la résonance (38 Hz) est aussi élevée que l'amplitude au niveau de la fréquence du mode à 180 Hz.

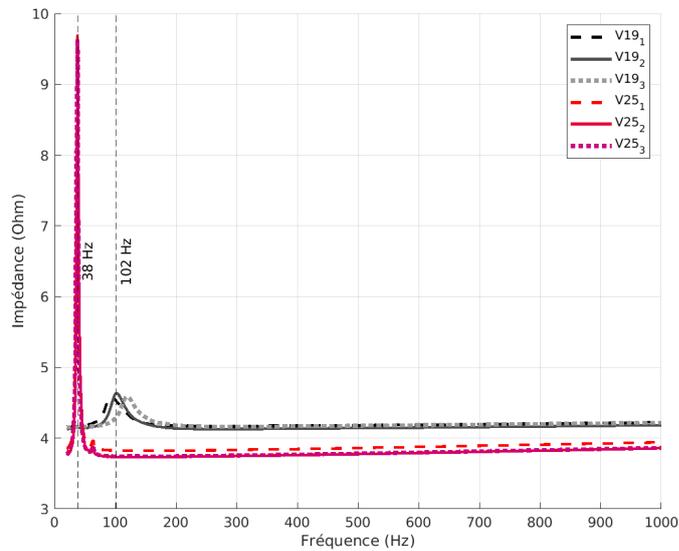


FIGURE D.2 – Mesures d'impédance des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* et V25 aux vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4*. Zoom sur la résonance de chaque vibreur. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.

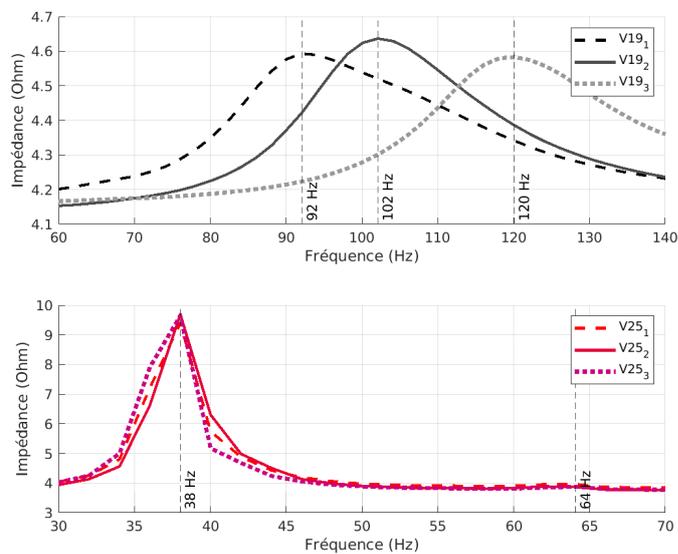


FIGURE D.3 – Mesures d'impédance des vibreurs au niveau de la fréquence de résonance des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* et V25 aux vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4*. Zoom sur la résonance de chaque vibreur. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.

(a) *Dayton Audio DAEX19CT-4*(b) *Dayton Audio DAEX25CT-4*

FIGURE D.4 – Position des vibreurs sur la tête de la guitare pour les mesures.

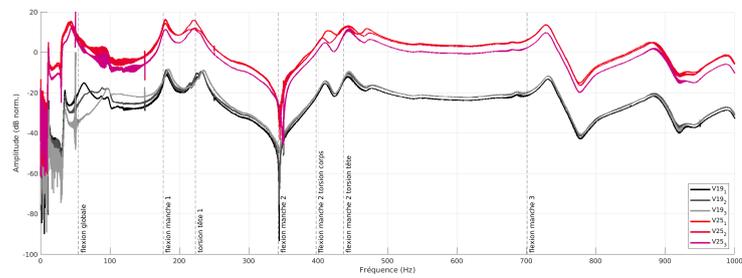


FIGURE D.5 – Mesure des fonctions de transfert pour chaque vibreur, autour de la fréquence de résonances des vibreurs. V19 correspond aux vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* et V25 (+20dB) aux vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4*. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.

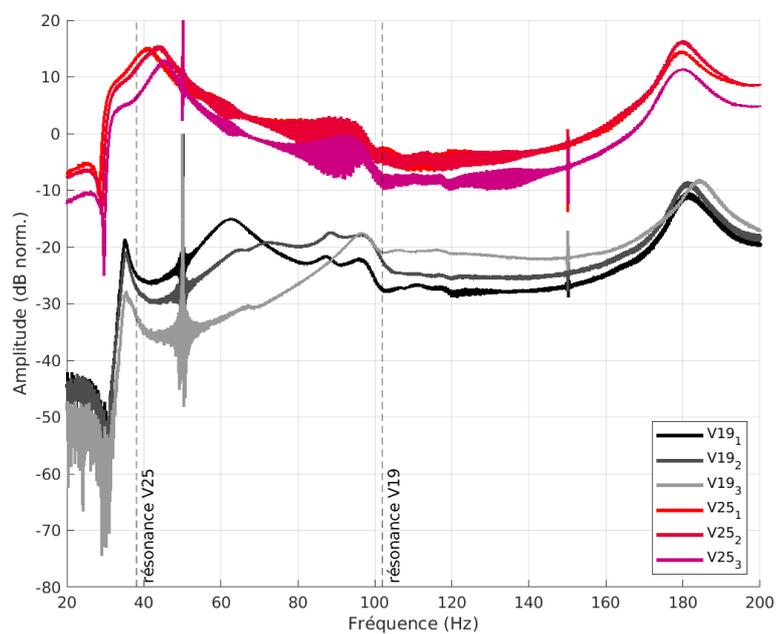


FIGURE D.6 – Mesure des fonctions de transfert pour chaque vibreur. Il s’agit de l’observation entre 20 Hz et 200 Hz de la figure D.5. V19 correspond aux vibreurs *Dayton Audio DAEX19CT-4* et V25 aux vibreurs *Dayton Audio DAEX25CT-4*. Les numéros 1 à 3 correspondent aux différents exemplaires de chaque vibreur.

Test d'une méthode de contrôle actif modal pour la modification des vibrations de la guitare électrique

Cette annexe permet de discuter de l'intérêt du contrôle actif modal, au moyen de mesures préliminaires et de tests de faisabilité de cette méthode. Il est fait référence à cette annexe en section 5.1.

Dans un cadre habituel de jeu, les guitaristes électriques ont la possibilité de modifier le son émis par une série de traitements analogiques et numériques appliqués au signal du micro (amplificateur et pédales d'effet par exemple). Dans l'ambition de concevoir une guitare augmentée en vibration, un des objectifs est de concevoir un dispositif permettant d'agir sur le ressenti vibrotactile des musiciens en modifiant instantanément la réponse vibratoire de la guitare, de la même manière qu'un guitariste peut modifier le retour sonore de la guitare. En théorie, la technique du contrôle actif¹ paraît bien adaptée à cet objectif.

L'étude du contrôle actif a été menée avec Oscar Gal [Gal21] (co-encadré lors de cette thèse), alors en stage de Master 2 de l'Université Technique de Compiègne.

E.0.0.1 Choix du type de contrôle

La réponse vibratoire du manche est composée des modes de cordes (les partiels, dont le fondamental) et des modes de structure. Devant la différence d'amplitude entre les modes de cordes et les modes de structure (voir figure 5.3, p. 84), la réponse semble dominée par les modes de corde. On peut donc se demander si les modes de structure participent au ressenti vibrotactile du guitariste. Pour répondre à cette problématique, une des solutions est d'atténuer la contribution de ces modes par une méthode de contrôle actif modal, une méthode adaptée à la modification des paramètres modaux des instruments de musique [Ben14].

1. Au sujet du contrôle actif des vibrations, Garnier [Gar02] en fait la définition suivante : « L'idée est de bloquer la vibration en exerçant une vibration antagoniste créée artificiellement avec des propriétés en miroir, à tout instant, relativement à la vibration indésirable, pour rendre nulle leur somme vectorielle. »

E.0.0.2 Principe du contrôle actif

Le contrôle actif modal est un contrôle de type *feedback* : le dispositif de contrôle, par la mesure du système, réagit à une perturbation en rétroaction grâce à un signal injecté par un actionneur. Le signal injecté a pour objectif d'adapter la réponse du système à une référence prédéterminée (par exemple de fixer la position angulaire d'un objet tournant, de retirer des fréquences bien choisies).

Une fois que la réponse du système à la perturbation est mesurée, un signal dit de « commande » est calculé, et injecté au système par un actionneur. À nouveau, la réponse du système est mesurée, et un nouveau signal de commande est calculé, puis injecté, et ainsi de suite. Ce principe est schématisé en figure E.1.

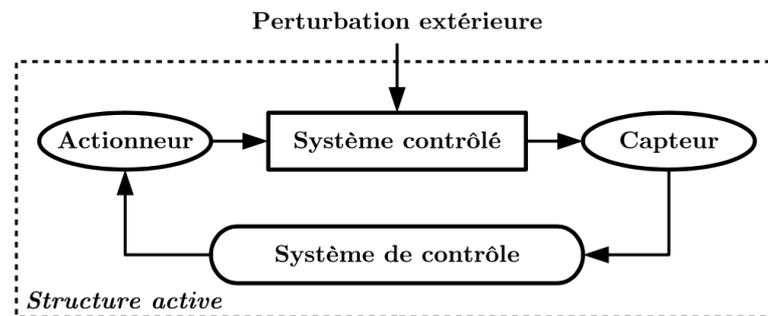


FIGURE E.1 – Principe de fonctionnement d'un contrôle de type *feedback*. Ce schéma est issu de [Ben14, page 15].

E.0.0.3 Principe du contrôle actif modal

Le contrôle actif modal permet de contrôler les fréquences et les amortissements des modes de vibration de la structure. Ce type de contrôle nécessite une modélisation de la structure qui, dans la méthode choisie, est faite par identification modale.

Méthode La méthode de contrôle actif modal nécessite un modèle basé sur l'identification des modes de structure. Cette identification peut être effectuée dans les conditions expérimentales, et consiste en une mesure de la fonction de transfert entre l'actionneur (vibreux) et le capteur (accéléromètre), suivie de l'identification effective desdits modes. L'identification modale consiste en l'estimation des paramètres modaux à partir de la fonction de transfert à l'aide de la méthode des polynômes de fraction rationnelle (utilisation de la fonction `rfp` de *Matlab*). Ensuite, il faut choisir les paramètres modaux à contrôler (fréquences et/ou amortissements) et quantifier la modification souhaitée.

Objectifs Pour étudier l'influence des modes de structure dans le ressenti vibrotactile de l'instrumentiste, une des possibilités est d'amortir fortement ces modes, de manière à ce que leur contribution à la réponse vibratoire soit quasiment nulle. Le but de cette première expérimentation est de prouver l'efficacité du contrôle actif modal dans une configuration où la perturbation extérieure est maîtrisée. L'objectif est de réduire la réponse vibratoire du haut du manche en augmentant l'amortissement des trois premiers modes.

Protocole expérimental Les excitateurs électrodynamiques sont particulièrement intéressants dans le cas du contrôle actif [Ben14, p. 67]. L'actionneur choisi est l'excitateur électrodynamique *Dayton Audio DAEX19CT-4* (diamètre 19 mm, 5 W, 4 Ω). Le capteur choisi pour mesurer la réponse vibratoire du manche est l'accéléromètre placé derrière le manche de la guitare (comme présenté dans le chapitre 5). La modélisation du système de contrôle est faite avec *Simulink* (*Mathworks*). Le système de contrôle (défini à partir de la méthode de placement de pôle) est ensuite implémenté sur une carte de prototypage temps réel *dSPACE DS1104*, pour effectuer l'acquisition et la réinjection des signaux entre le système de contrôle et la structure.

L'objectif fixé dans cette étude préliminaire est de contrôler les 3 premiers modes de structure. Le contrôle de ces trois modes serait suffisant pour percevoir des différences d'intensité sur les notes dont la fréquence fondamentale est proche de celle d'un des modes. Même s'il aurait pu être choisi d'en contrôler davantage, l'ajout de modes à contrôler complexifie le modèle, et le système peut rapidement devenir instable.

Afin d'éviter que des perturbations induites par l'instrumentiste ne s'ajoutent à la perturbation extérieure, la guitare électrique est posée sur un stand (voir figure E.2). L'identification modale est faite jusqu'à 2000 Hz (au-delà de la limite de la perception des vibrations) avec un sinus glissant, et a permis d'identifier les fréquences des trois premiers modes : 97,8 Hz, 185,2 Hz, 233,5 Hz. Le premier mode observé à 97,8 Hz ne correspond à aucun des modes identifiés en conditions libres (annexe F), et pourrait être dû aux conditions non-libres, ou à un mode du stand utilisé, ou à un mode de couplage entre le stand et la guitare. Les deuxième et troisième modes correspondent aux modes 2 et 3 identifiés en conditions libres (annexe F), mais avec une fréquence plus élevée ici (respectivement 8,5 Hz de plus que le mode 2, et 10,8 Hz de plus que le mode 3). Le choix d'une fréquence nettement plus élevée que la limite des fréquences perceptibles vient du fait que le contrôle des modes, même en basses fréquences, peut déstabiliser les modes non modélisés en plus hautes fréquences (effet appelé « spillover » [AG03, page 372]).



(a) Vue de dos.



(b) Vue de profil.

FIGURE E.2 – Guitare posée sur un stand, avec vibreur placé sur la tête, et accéléromètre placé derrière le manche.

La perturbation extérieure choisie a pour objectif de tester l'ensemble des fréquences de la plage 1 Hz-1000 Hz (sinus glissant entre 1 Hz et 1000 Hz). Cette perturbation est générée par l'excitateur électrodynamique, qui restitue à la fois la perturbation extérieure et la commande. Cela ne pose pas de problème *a priori*, car l'accéléromètre mesure dans tous les cas la réponse du système complet.

Premiers résultats La méthode permet notamment de modifier l'amortissement de chaque mode. L'enjeu est de maximiser l'amortissement tout en assurant la stabilité expérimentale du système de contrôle. Après plusieurs essais, la limite de stabilité est obtenue pour une multiplication par deux du coefficient d'amortissement du 1^{er} mode et par 3 du coefficient d'amortissement des 2^e et 3^e modes. La figure E.3 présente l'efficacité de la méthode choisie pour ces modifications, lorsque la structure est perturbée par un sinus glissant de 1 à 1000 Hz.

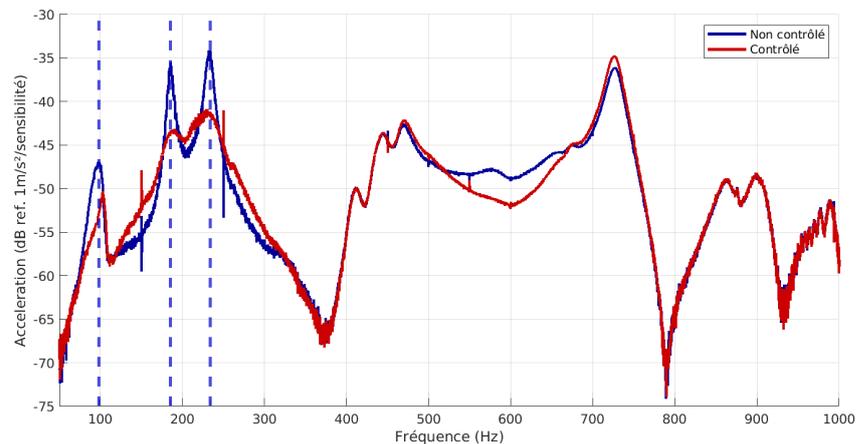


FIGURE E.3 – Efficacité du contrôle actif modal (rouge) sur la réponse vibratoire de la structure (bleu si non contrôlé) lorsque cette dernière est perturbée par un sinus glissant de 1 à 1000 Hz. Ces résultats sont obtenus pour une multiplication par 2 du coefficient d'amortissement du 1^{er} mode et par 3 du coefficient d'amortissement des 2^e et 3^e modes (les fréquences des 3 premiers modes sont illustrés par les lignes verticales en pointillés bleus).

Le contrôle engendre une réduction de la réponse de chacun des trois modes entre 6 dB et 8 dB (aux fréquences identifiées dans cette expérience à 97,8 Hz, 185,2 Hz, 233,5 Hz). Cette mesure prouve l'efficacité de la méthode. Ceci étant, 3 participants (lors d'un test informel) ont placé leur main sur le manche et tenté de percevoir une différence dans les vibrations ressenties. Aucun des participants n'a perçu de différence entre la situation sans contrôle et la situation avec contrôle (le signal étant le sinus glissant), ce qui laisse penser que l'influence des modes de structure sur le ressenti vibrotactile de l'instrument est faible. Ce test justifie les hypothèses formulées dans le chapitre 5 concernant le filtre *CB modes*, ainsi que les résultats sur ce même filtre (pas de différence perçue entre le retour vibrotactile d'une note jouée et le même retour filtré au niveau des modes de structure).

Conclusion La faisabilité et l'efficacité de la méthode du contrôle actif modal a été vérifiée, mais il se pourrait que la différence mécanique n'engendre aucune différence perceptive. Une simulation de l'effet d'un contrôle actif modal sur l'ensemble des modes de la structure entre 10 et 1000 Hz est proposée au chapitre 5 avec l'utilisation du filtre *CB modes*.

Méthodologie d'analyse des vibrations et retour vibrotactile

Sommaire du présent chapitre

F.1 Mesures expérimentales	182
F.2 Mesures préliminaires	182
F.2.1 Analyse modale	182
F.2.2 Mesures en situation de jeu	182
F.3 Génération des vibrations	184
F.3.1 Réinjection directe du signal d'accélération	184
F.3.2 Fonction de transfert	185
F.4 Conclusion	187

Jouer d'un instrument de musique est une expérience multisensorielle, car elle implique différentes modalités sensorielles, chacune d'entre elles participant à la perception et à l'évaluation de l'instrument (l'ouïe, la vue et le toucher par exemple). Depuis des années, le retour vibrotactile est étudié sur les instruments à cordes acoustiques [Cha93], et la réponse vibratoire de ces instruments est souvent mesurée, par exemple pour le piano [Fon+17; GBF14], pour le violon [BO07], pour la guitare [LPC19; Fle05; FZ98; GW13]. Cependant, ces mesures sont le plus souvent utilisées pour étudier comment les vibrations de la structure de l'instrument se couplent avec la corde vibrante et donc comment ces vibrations modifient le son résultant [Gou14; RR14; Wei77; Woo04b; Woo04a], également dans le cas de la guitare électrique [Pat14; Pat+12; FZ98; FZ99]. Ces mesures sont très rarement utilisées pour quantifier la façon dont les vibrations sont ressenties par les guitaristes ou autres musiciens. Quelques études s'intéressent à la perception des vibrations [SJF18; WFP14; Wol+14]. Cette annexe propose une méthode d'étude du retour vibrotactile d'une guitare électrique *solid body* d'un point de vue physique (mesure des vibrations mécaniques), dans le but de pouvoir ensuite questionner comment les vibrations sont ressenties par les musiciens.

La guitare électrique *solid body* est choisie pour ce travail, en raison de son faible rayonnement acoustique [FZ98; Läh+10]. De plus, l'émission du son (amplificateur) est spatialement séparée

de l'émission des vibrations (corps de la guitare). Cette caractéristique permet, plus facilement qu'avec les instruments acoustiques, de focaliser les tests perceptifs sur la perception vibratoire.

F.1 Mesures expérimentales

Le présent chapitre traite de la reproduction du retour vibrotactile en situation de jeu¹ en générant un stimulus vibratoire avec un vibreur². Le retour vibrotactile est enregistré à l'accéléromètre lorsqu'un guitariste pince les cordes. À partir de ce signal mesuré à l'accéléromètre, il est possible de modifier les vibrations de l'instrument, comme par exemple de supprimer certaines fréquences.

Pour cela, un montage expérimental est mis en place. Dans un premier temps, les caractéristiques structurelles de la guitare électrique sont identifiées par une analyse modale en section F.2.1. Ensuite, l'enregistrement des signaux vibratoires en situation de jeu est effectué dans la section F.2.2 pour chaque note, servant alors de base à la réinjection de signaux vibratoires dans la section F.3.1.

F.2 Mesures préliminaires

F.2.1 Analyse modale

La première étape de l'expérience consiste en une analyse modale classique (voir [Ewi00] pour une description détaillée de la méthode) d'une guitare, ici le modèle *Squier Classic Vibe '50s Telecaster*, avec un marteau d'impact *PCB 086C01* (11,2 mV/N) et un accéléromètre mono-axial *PCB M352C65* (10,2 mV/m.s⁻²) connecté à un conditionneur *PCB 482C05* et une carte d'acquisition *NI-9223* (fréquence d'échantillonnage 16 kHz, 16 bits). Les impacts sont réalisés en 59 points différents³, en échantillonnant spatialement l'ensemble de la structure, telle que présentée dans la figure F.1 (p. 184). La guitare est posée sur un tendeur permettant d'estimer que la guitare est en configuration libre. Les cordes de la guitare sont étouffées et les mécaniques (accastillage par exemple) sont bloquées. Le but de cette étape est d'identifier les modes de structure de la guitare afin de déterminer leur influence sur la réponse vibratoire de l'instrument lorsqu'il est excité par les cordes comme dans la section F.2.2. Cette configuration est la référence pour les paramètres modaux dans ce travail.

Les modes de vibration de la guitare *Squier Classic Vibe '50s Telecaster* identifiés par l'analyse modale (fonction *modal fit* de *Matlab*, méthode LSCE) sont présentés dans le tableau F.1 (p. 183).

F.2.2 Mesures en situation de jeu

Les notes de la guitare sont successivement pincées par un guitariste expérimenté se tenant assis⁴, le doigt de la main gauche restant en position tant que la vibration de la corde n'est pas

1. La situation de jeu désigne, pour l'ensemble du manuscrit, le fait que le guitariste est en train de jouer de la guitare.

2. Les actionneurs choisis sont des haut-parleurs électrodynamiques, voir annexe D. Le terme « vibreur » sera utilisé pour parler de ces actionneurs (excitateurs), rappelant qu'ils sont utilisés dans ce travail pour générer des vibrations.

3. Le choix du nombre de points pour l'analyse modale est similaire au choix fait dans d'autres travaux [Pat14, page 136]. Il s'agit d'un compromis entre résolution spatiale et durée d'expérimentation.

4. Par rapport au cas de référence présenté dans la section F.2.1, la configuration en situation de jeu avec le guitariste en situation de jeu affecte l'amortissement modal et la raideur (voir les travaux de Fleischer [FZ98]), qui varient également avec la position de la main gauche le long du manche, mais l'influence de cette dernière est assez faible (voir les travaux de Le Carrou *et al.* [LPC19]).

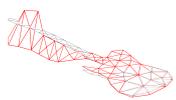
Numéro de mode	Déformée modale	Fréquence (Hz)	Amortissement ξ (%)
1		54.9	5.1
2		176.7	2.2
3		222.7	2.2
4		343.0	3.7
5		396.7	2.8
6		436.8	2.8
7		700.6	2.9

TABLEAU F.1 – Déformées modales avec les fréquences de résonance correspondantes (Hz) et les amortissements (%) de la guitare *Squier Classic Vibe '50s Telecaster*, calculés en faisant une analyse modale, implémentée dans la fonction *modalfit* de *Matlab*. Les déformées sont présentées en rouge, en comparaison à l'état de la guitare au repos (en gris). Ce tableau est repris de Cambourian Paul, Gal Oscar, Paté Arthur, Benacchio Simon et Vasseur Jérôme, « Understanding the vibrotactile feedback of the electric guitar : Methodology for a physical and perceptual study », *The proceedings of Audio Mostly*, 2021 [Cam+21].

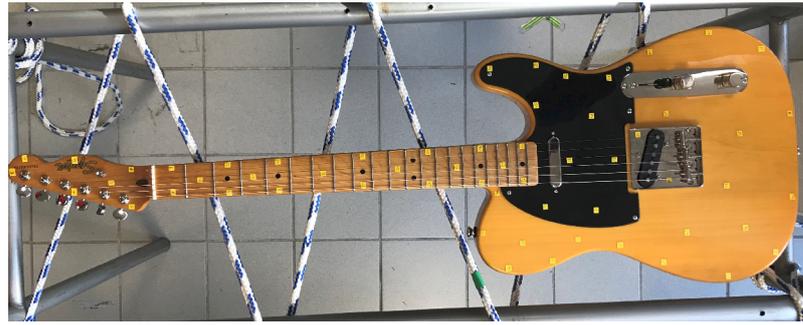


FIGURE F.1 – Installation pour l’analyse modale. Les carrés jaunes représentent les 59 points de frappe pour les mesures.

arrêtée et tant que le guitariste n’entend plus ou ne sent plus la note. Les notes sont enregistrées par un accéléromètre (capteur piézoélectrique *B&K 4393*, voir figure F.2 pour le placement de l’accéléromètre) et le micro de la guitare. Cet accéléromètre est déplacé à chaque mesure, étant placé à la frette de la note en cours, au plus proche de la main gauche du guitariste. Il capte les vibrations normales au plan de l’instrument.



(a) Vue de face



(b) Vue de dessus

FIGURE F.2 – Position du guitariste au niveau du manche de la guitare, avec accéléromètre. L’accéléromètre est placé derrière le manche de la guitare au niveau de la main du guitariste. Le vibreur est placé sur la tête de la guitare.

F.3 Génération des vibrations

F.3.1 Réinjection directe du signal d’accélération

Dans cette étape, le signal vibratoire enregistré avec l’accéléromètre est réinjecté à l’aide d’un vibreur *Dayton Audio DAEX19CT-4* (diamètre 19 mm, 5 W, 4 Ω) placé à l’arrière de la tête, voir figure F.3. Le vibreur est contrôlé à l’aide d’un ordinateur portable, connecté à une carte son *Focusrite Scarlett 2i2* (fréquence d’échantillonnage 16 kHz, 16 bits) et à un amplificateur *Audiophysics TPA-S25* (2×45 W, 4 Ω). L’emplacement du vibreur a été choisi ainsi, car c’est la région de la structure de la guitare qui subit le plus de déformations (voir tableau F.1). La réponse

vibratoire est mesurée, de la même façon qu'à l'enregistrement des notes (voir section F.2.2), avec l'accéléromètre sur la face arrière du manche près de la case où joue le guitariste (voir figure F.2).

Pendant l'expérience, le guitariste tient la guitare comme dans la situation de jeu (main gauche et doigts en contact avec le manche et la touche), mais l'excitation est faite par le vibreur. Ce signal enregistré avec l'accéléromètre (fixé à l'arrière de la tête de la guitare) est réinjecté avec le vibreur⁵. La réinjection du signal nécessite l'application d'une fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre, car ils ne sont pas placés au même endroit (voir détail section F.3.2).

F.3.2 Fonction de transfert

En mécanique vibratoire, la fonction de transfert entre deux points a et b d'une structure linéaire permet d'anticiper la réponse vibratoire de la structure au point b si l'excitation en a est connue. Selon l'objectif fixé, l'entrée correspond à la tension envoyée au vibreur⁶, et la sortie correspond à l'accélération mesurée par l'accéléromètre. Si le vibreur était placé exactement au niveau de l'accéléromètre, le calcul de cette fonction de transfert ne serait pas nécessaire. Cependant, pour des raisons évidentes d'ergonomie, le vibreur ne peut pas être placé au niveau de la main du guitariste (voir figure F.3 pour le placement du vibreur). De plus, le vibreur placé au niveau de la tête de la guitare est dans une position qui maximise la transmission d'énergie au manche et à l'ensemble du corps de la guitare. Positionné à un autre endroit, le vibreur ne fournit pas l'énergie suffisante à ce que les vibrations soient ressenties à un niveau satisfaisant.

La mesure et l'utilisation de la fonction de transfert sont une méthode classique dans le domaine du contrôle des vibrations, illustré par les travaux de Rizet [Riz99] et ceux de Boutin sur le contrôle du violon et de la lame de xylophone [Bou11]. Une telle démarche de reproduction des vibrations a été effectuée par Giordano [GW13] dans une étude similaire sur la guitare acoustique.

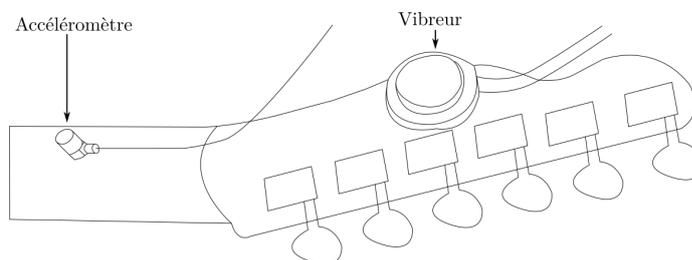


FIGURE F.3 – Tête de la guitare, avec le placement de l'accéléromètre pour les mesures en situation de jeu. Il est placé derrière le manche de la guitare au niveau de la main du guitariste. Le vibreur est placé sur la tête de la guitare.

F.3.2.1 Calcul et utilisation de la fonction de transfert

En prévision du test perceptif, le but est que le musicien perçoive une excitation similaire à celle qu'il aurait au niveau de la main tenant le manche lorsqu'il joue. Concrètement, cela consiste à essayer d'obtenir un même signal capté par l'accéléromètre, que ce soit dans le cas d'une excitation réalisée avec le vibreur ou dans le cas d'une excitation réalisée avec la corde.

5. La réinjection directe ne tient pas compte de la réponse en fréquence du vibreur. C'est une des raisons de l'application d'une fonction de transfert entre le vibreur et l'accéléromètre.

6. Le fait de réaliser la fonction de transfert avec le vibreur a l'avantage de prendre en compte la réponse en fréquence du vibreur, sans avoir à la calculer explicitement.

Un sinus logarithmique glissant de 10 à 3000 Hz⁷ d'une durée de 30 s est envoyé au vibreur avec *Matlab*, par l'intermédiaire d'une interface *Focusrite Scarlett 2i2* et d'un amplificateur *Audiophonics TPA-S25* (2×45 W, 4 Ω). La réponse de la guitare à ce signal est mesurée par l'accéléromètre placé derrière le manche. Après passage dans le domaine fréquentiel, la fonction de transfert est calculée en faisant le rapport entre l'accélération mesurée et la tension envoyée à l'excitateur. Puisque la position de l'accéléromètre change avec les déplacements de la main du guitariste, une mesure de fonction de transfert est réalisée pour chaque case (exemple figure F.4).

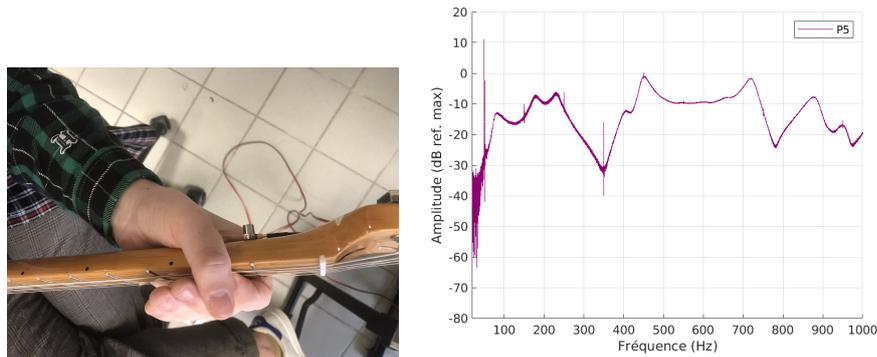


FIGURE F.4 – Position de la main d'un participant et spectre de la fonction de transfert calculée.

F.3.2.2 Discussion sur l'emplacement des accéléromètres

Ce paragraphe discute du placement de l'accéléromètre pour les mesures de fonctions de transfert, en mettant en parallèle les choix faits pour les chapitres 5 et 6. Dans le chapitre 5, l'accéléromètre est placé à gauche du pouce des guitaristes⁸, sous le manche et dans l'axe normal au corps de la guitare, comme le vibreur (voir figure F.5 pour différentes position de l'accéléromètre).

La figure F.6a présente la moyenne des fonctions de transfert sur l'ensemble des participants (expérience du chapitre 5) et l'écart entre les valeurs extrêmes mesurées. Les allures des fonctions

7. Dans le cadre de ma thèse, les bornes supérieures des fréquences n'ont pas d'importance, tant qu'elles sont clairement au-delà de 1000 Hz pour les applications tactiles présentées.

8. Pour l'unique gaucher du groupe de participants, l'accéléromètre a été placé à droite de son pouce.

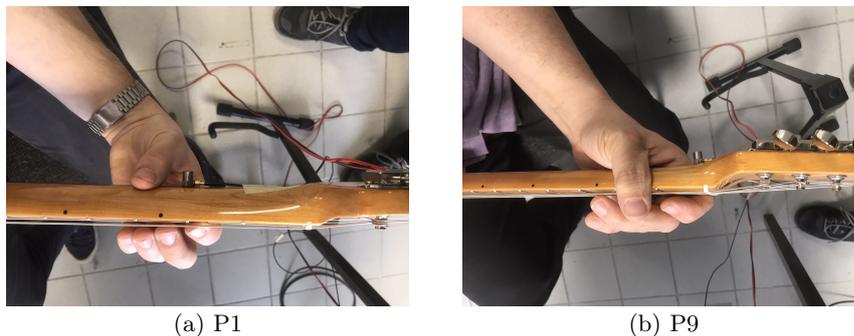


FIGURE F.5 – Différentes position de l'accéléromètre en fonction des participants.

de transfert sont similaires entre elles, les valeurs des fréquences de résonance variant peu. Pour les fréquences proches des fréquences des modes de structure (55 Hz, 177 Hz, 223 Hz, 437 Hz, 700 Hz) les amortissements sont très dépendants des guitaristes (voir figure F.7). Ces résultats corroborent les observations faites dans le but d'étudier l'influence des guitaristes dans les analyses modales expérimentales [LCP14; LPC19].

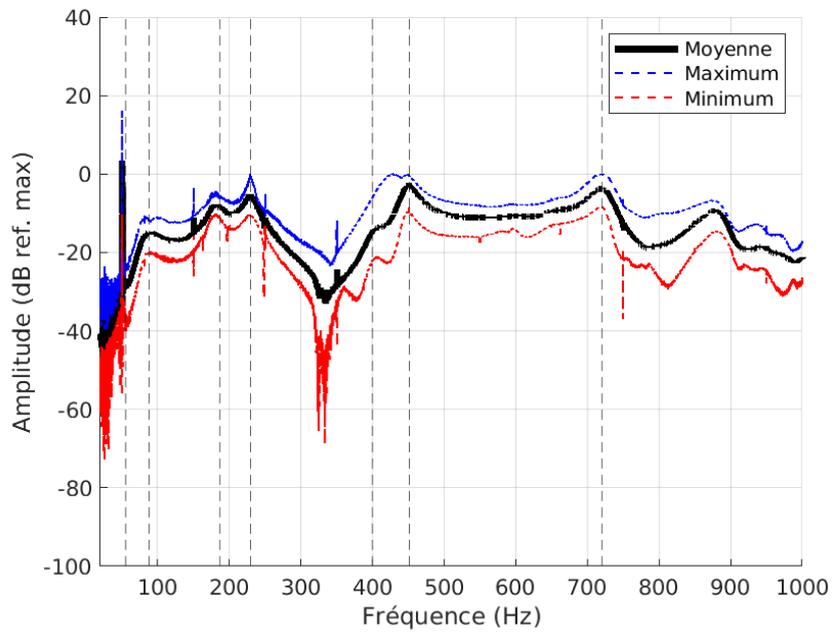
Dans l'expérience présentée chapitre 6, les fonctions de transfert sont encore plus similaires entre elles (voir figure F.6b). Les différences observables sont sur l'intervalle 170-230 Hz (les fréquences des deux premiers modes de manche), sur l'intervalle 450-700 Hz, puis à partir de 875 Hz.

Devant la constance des fonctions de transfert d'un participant à l'autre, il paraît raisonnable d'envisager de montrer, dans des expériences futures, qu'il est possible d'utiliser une fonction de transfert dite « générique ». Une telle fonction de transfert serait la moyenne des mesures réalisées avec quelques participants dans des conditions similaires de tenue de la guitare. Cela éviterait toute erreur de mesure au moment de l'accueil de participants pour une nouvelle expérience, et éviterait de rallonger la durée des expériences.

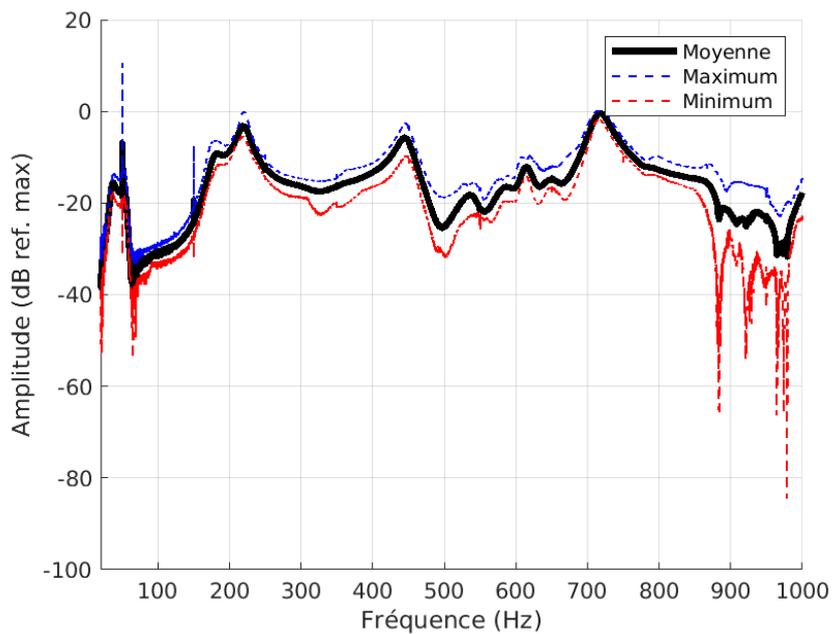
Avec l'application d'une fonction de transfert, le signal apparaît comme bien reproduit, comme montré sur la figure F.8. Des différences inférieures à 5 dB au niveau des fréquences des partiels et des fréquences des modes de structure sont observées.

F.4 Conclusion

Les étapes présentées dans cette annexe décrivent une méthode pour faire vibrer la guitare de la façon la plus proche possible d'une situation réelle de jeu, avec la réinjection des vibrations enregistrées lors de cette situation réelle. La méthode décrite permet la mise en place de la reproduction de vibrations utilisée dans les chapitre 5 et 6.



(a) Expérience du chapitre 5.



(b) Expérience du chapitre 6.

FIGURE F.6 – Moyenne des fonctions de transfert (en noir) pour les participants de chaque expérience, (a) du chapitre 5 (9 participants), et (b) du chapitre 6 (11 participants). La moyenne est encadrée par les valeurs maximum (bleu) et minimum (rouge). Les fréquences de résonance sont mises en valeur par les lignes verticales en pointillé.

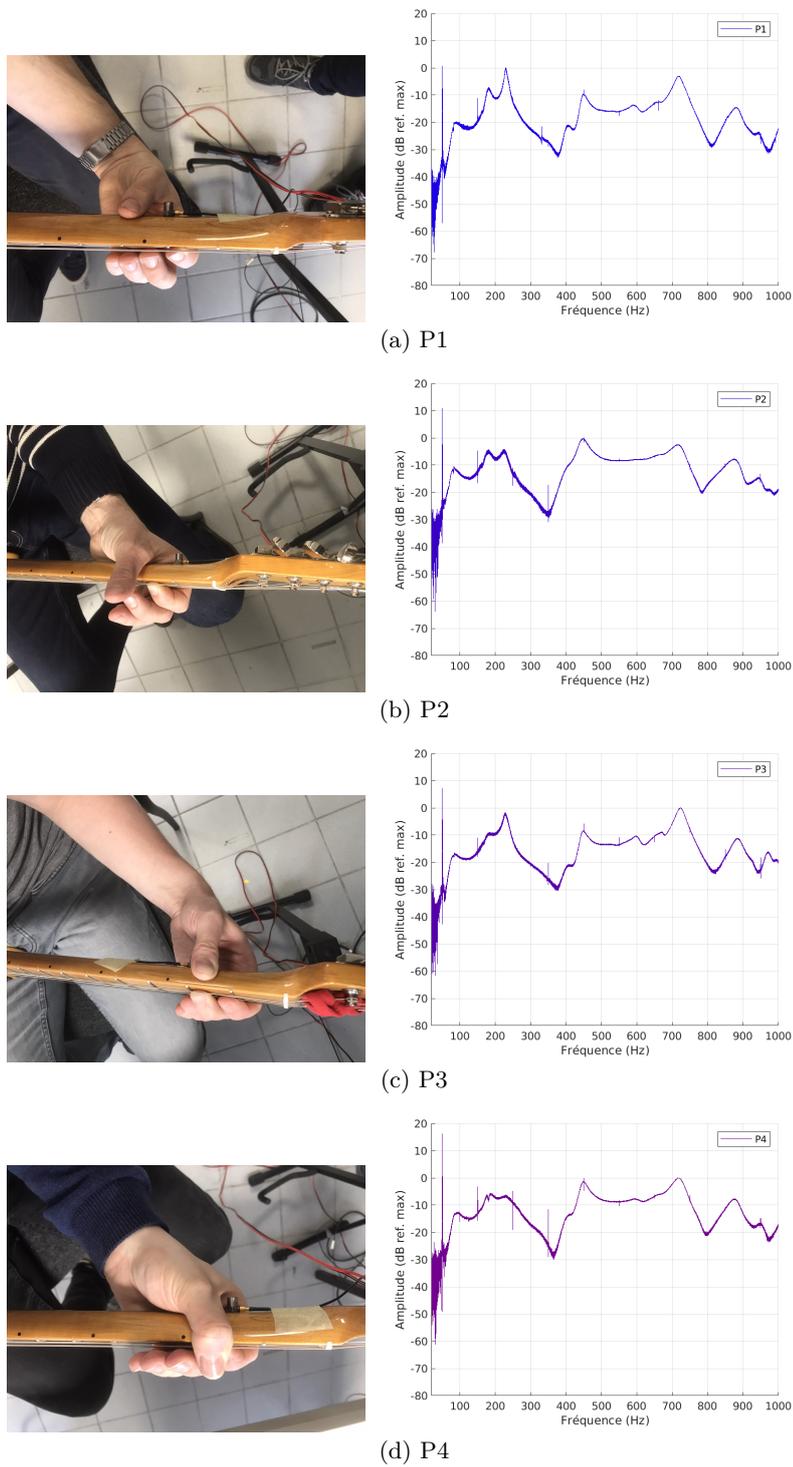
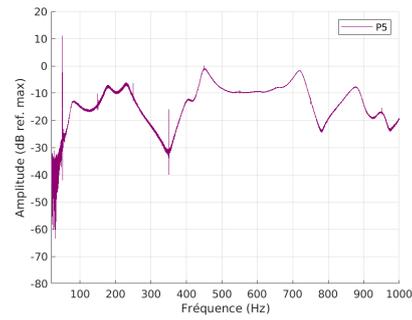
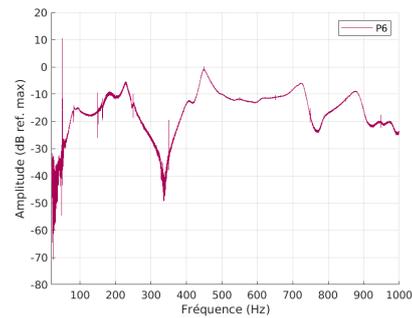


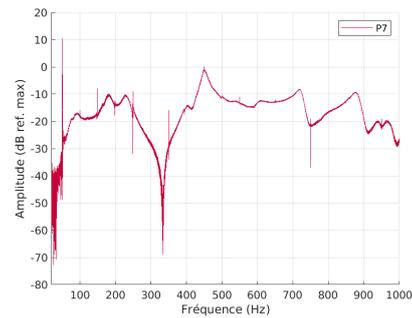
FIGURE F.7 – Position de la main de chaque participant tenant le manche et fonction de transfert mesurée pour l'expérience présentée au chapitre 5.



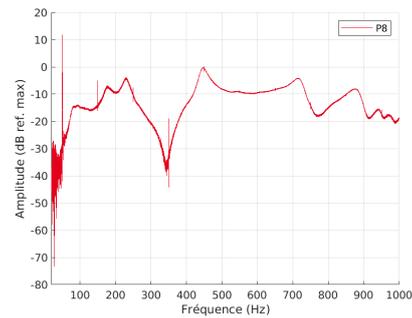
(e) P5



(f) P6



(g) P7 - gaucher



(h) P8

FIGURE F.7 – (suite) Position de la main de chaque participant tenant le manche et fonction de transfert mesurée pour l'expérience présentée au chapitre 5.

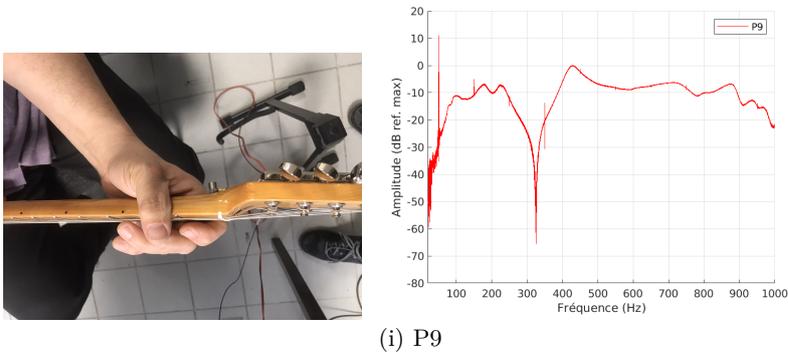


FIGURE F.7 – (suite) Position de la main de chaque participant tenant le manche et fonction de transfert mesurée pour l'expérience présentée au chapitre 5.

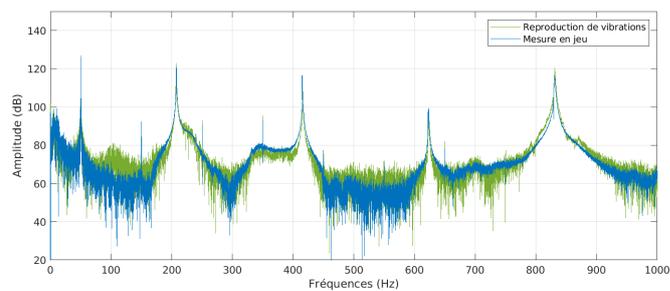


FIGURE F.8 – Spectres des mesures à l'accéléromètre en situation de jeu (excitation au médiator, en bleu) ou en réinjection (réinjection de la mesure à l'accéléromètre avec fonction de transfert, à l'aide du vibreur, en vert), pour la note sol# (corde 3, case 1).

Comparaison de la carte son et de la carte d'acquisition

L'objectif ici est de montrer qu'une carte son *Focusrite Scarlett 2i2* (fréquence d'échantillonnage 16 kHz, 16 bits) peut remplacer la carte d'acquisition *NI-9223* (fréquence d'échantillonnage 16 kHz, 16 bits) pour les mesures d'accélération. La possibilité d'utiliser indifféremment la carte son ou la carte d'acquisition dans le cas présent (mesure des vibrations d'une guitare électrique) permet de limiter le matériel à utiliser devant des musiciens. Le modèle de carte son choisi est par ailleurs bien moins cher que la carte d'acquisition¹. Les cartes son ont l'avantage d'être plus répandues que les cartes d'acquisition. Si les résultats sont satisfaisants, l'utilisation de la carte son pourrait même permettre aux musiciens de reproduire le montage expérimental chez eux.

Le matériel à disposition est une guitare *Squier Classic Vibe '50s Telecaster*, sur laquelle est posé un accéléromètre *B&K 4393*, placé sur le côté du manche et connecté à un conditionneur *B&K 2626*. La sortie du conditionneur est mesurée et comparée entre les deux systèmes d'acquisition. L'excitation est un balayage fréquentiel (logarithmique) sinusoïdal de 5 à 5000 Hz, sur une durée de 60 secondes, et est générée par un vibreur *Dayton Audio DAEX25CT-4* (diamètre 25 mm, 10 W, 4 Ω). La sortie de chaque carte est enregistrée en parallèle via le logiciel *Matlab*, sur une même mesure. Les deux cartes sont quantifiées à 16 bits.

La figure G.1 présente la superposition des acquisitions en temporel et en fréquentiel pour les deux cartes. Dans ces conditions, les réponses en fréquences sont quasiment identiques, avec un écart inférieur d'environ 0,2 dB sur toute la bande de fréquence 10 Hz-1000 Hz, à l'exception de quelques endroits où la différence reste tout de même inférieure à 10 dB (différence au niveau des creux du spectre en-dessous de 10 Hz – ce qui est sûrement dû au filtre passe-haut à 20 Hz de la carte son –, à 330 Hz et à 900 Hz, donc aux niveaux des anti-résonances et là où le rapport signal sur bruit est le plus faible).

L'ensemble de ces données montre que l'on peut analyser les signaux vibratoires en faisant l'acquisition avec une carte son. Il est conseillé d'utiliser une carte son pour les prochaines expériences plutôt qu'une carte d'acquisition.

1. De plus, l'utilisation de la carte son pour l'acquisition ou l'émission est facile à mettre en œuvre, là où la carte d'acquisition disponible au laboratoire ne permet d'être utilisée que pour l'acquisition.

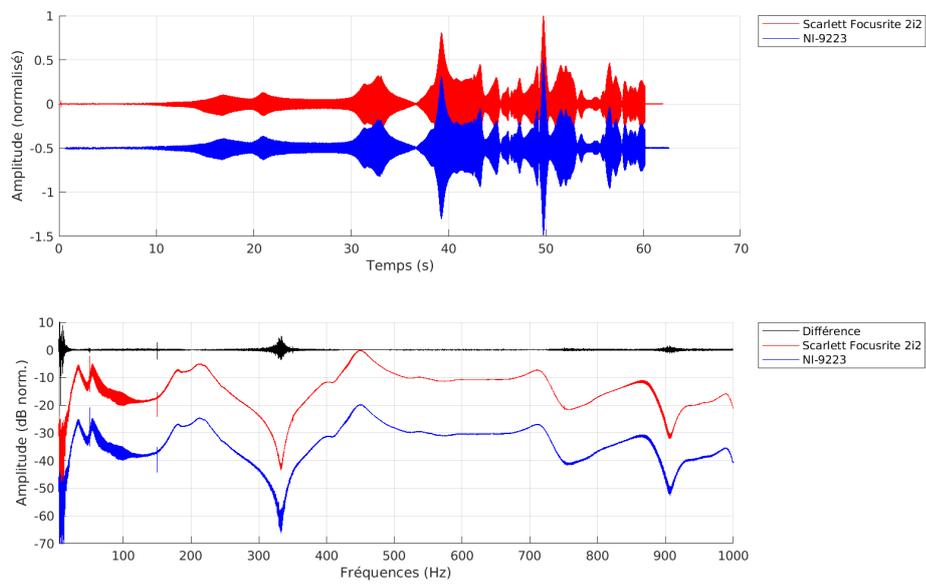


FIGURE G.1 – Superposition des réponses temporelles et fréquentielles d’une même mesure pour la carte d’acquisition *NI-9223* (en rouge) et la carte son *Focusrite Scarlett 2i2* (en bleu). Le rapport entre les deux signaux est présenté en noir en fréquentiel.

Résultats des tests post-hoc de l'ANOVA du chapitre 5

Cette annexe est consacrée aux tests post-hoc de l'ANOVA appliquée à l'expérience du chapitre 5.

Malgré l'effet significatif du facteur *Participant* dans l'ANOVA (voir section 5.3.2), le tableau H.1 indique que le test de Tukey ne révèle aucune différence significative. Ce qui est particulièrement surprenant, c'est que la p-value du facteur *Participant* est très faible (0,0044), et que le test de Tukey n'arrive pas à mettre en évidence les différences. Cela s'explique peut-être par le grand nombre de scores (378), chacun des 9 participants ayant évalué 42 signaux. En fait, le test de Tukey prend en compte le nombre de comparaisons réalisées. Pour cette raison, il indique plus difficilement des différences.

Pour le facteur *Filtre*, la p-value est de 0,0535, donc légèrement supérieure à 0,05. Normalement, on ne fait pas le test de Tukey dans ce cas. Cependant, dans le cas de mon expérience, le test de Tukey est quand même effectué sur le facteur *Filtre* : parce que la p-value est très proche de 0,05 et que les tests de comparaisons multiples peuvent trouver des différences significatives (parfois) même lorsque l'ANOVA n'a montré aucune différence significative entre les groupes. Le résultat du test de Tukey est présenté tableau H.2, et là encore : aucune différence significative.

Ces résultats du test de Tukey indiquent qu'il n'y a donc pas de différence significative entre les participants, et confirment qu'il n'y a pas de différence significative entre les filtres présentés dans l'expérience.

Comparaison	p-value
P1 - P2	1
P1 - P3	1
P1 - P4	0,99999
P1 - P5	1
P1 - P6	0,18132
P1 - P7	0,99928
P1 - P8	0,52624
P1 - P9	0,11866
P2 - P3	0,99995
P2 - P4	0,99977
P2 - P5	1
P2 - P6	0,11046
P2 - P7	0,99501
P2 - P8	0,38693
P2 - P9	0,06861
P3 - P4	1
P3 - P5	1
P3 - P6	0,30582
P3 - P7	0,99998
P3 - P8	0,70032
P3 - P9	0,21414
P4 - P5	0,99999
P4 - P6	0,36776
P4 - P7	1
P4 - P8	0,76476
P4 - P9	0,26496
P5 - P6	0,17477
P5 - P7	0,99914
P5 - P8	0,51492
P5 - P9	0,1139
P6 - P7	0,57186
P6 - P8	0,99967
P6 - P9	1
P7 - P8	0,90862
P7 - P9	0,44858
P8 - P9	0,99775

TABLEAU H.1 – Comparaisons multiples par paires pour les participants. Test post-hoc de Tukey.

Comparaison	p-value
PB 900 Hz - PB 900 Hz 2	0,9987
PB 900 Hz - CB modes	0,7097
PB 900 Hz - PB 450 Hz	0,9986
PB 900 Hz - PB 3 partiels	0,8544
PB 900 Hz - PB fondamental	0,8247
PB 900 Hz - PB fondamental 2	0,9858
PB 900 Hz 2 - CB modes	0,9430
PB 900 Hz 2 - PB 450 Hz	0,9474
PB 900 Hz 2 - PB 3 partiels	0,5442
PB 900 Hz 2 - PB fondamental	0,9799
PB 900 Hz 2 - PB fondamental 2	0,9999
CB modes - PB 450 Hz	0,3668
CB modes - PB 3 partiels	0,0654
CB modes - PB fondamental	0,9999
CB modes - PB fondamental 2	0,9881
PB 450 Hz - PB 3 partiels	0,9872
PB 450 Hz - PB fondamental	0,4965
PB 450 Hz - PB fondamental 2	0,8469
PB 3 partiels - PB fondamental	0,1108
PB 3 partiels - PB fondamental 2	0,3599
PB fondamental - PB fondamental 2	0,9977

TABLEAU H.2 – Comparaisons multiples par paires pour les filtres. Test post-hoc de Tukey.

Résultats des test binomiaux du chapitre 6

Cette annexe est un complément du chapitre 6. Les résultats des tests binomiaux sont donnés par le tableau I.1, et montrent également la prise en compte de la correction de Bonferroni.

Un test binomial est effectué par *Phase*, par *Note* et par *Paire*, donc 72 test binomiaux. Dans chaque test, il y a une évaluation par participant, donc 11 comparaisons.

Si la p-value est inférieure à 0,05, il sera admis qu'il y a bien une différence perceptible dans les conditions de *Phase*, *Note* et *Paire* du test. Dans le cas de l'application de la correction de Bonferroni, la condition devient : si la p-value est inférieure à $0,05/72 = 0,000694$, il sera admis qu'il y a bien une différence perceptible dans les conditions de *Phase*, *Note* et *Paire* du test. À l'inverse, si la p-value du test est supérieure à 0,05 (avec correction de Bonferroni : 0,000694), il sera impossible de conclure à une différence perceptible entre les signaux.

Phase	Note	Paire	p-value (unilatéral)	Paire	p-value (unilatéral)	nombre de paires significatives
Sans Jeu	Note 1	Acc2-FT	0,52744	Acc-FT2	0,03863	1
Sans Jeu	Note 2	Acc2-FT	0,00882	Acc-FT2	0,03863	2
Sans Jeu	Note 3	Acc2-FT	0,52744	Acc-FT2	0,92485	0
Sans Jeu	Note 4	Acc2-FT	0,00137	Acc-FT2	0,00001*	2
Sans Jeu	Note 5	Acc2-FT	0,03863	Acc-FT2	0,00882	2
Sans Jeu	Note 6	Acc2-FT	0,12209	Acc-FT2	0,12209	0
<hr/>						
Sans Jeu	Note 1	Acc2-Pickup	0,00013	Acc-Pickup2	0,03863	2
Sans Jeu	Note 2	Acc2-Pickup	0,12209	Acc-Pickup2	0,00882	1
Sans Jeu	Note 3	Acc2-Pickup	0,12209	Acc-Pickup2	0,00137	1
Sans Jeu	Note 4	Acc2-Pickup	0,00137	Acc-Pickup2	0,03863	2
Sans Jeu	Note 5	Acc2-Pickup	0,00882	Acc-Pickup2	0,00137	2
Sans Jeu	Note 6	Acc2-Pickup	0,00882	Acc-Pickup2	0,03863	2
<hr/>						
Sans Jeu	Note 1	FT2-Pickup	0,03863	FT-Pickup2	0,03863	2
Sans Jeu	Note 2	FT2-Pickup	0,12209	FT-Pickup2	0,52744	0
Sans Jeu	Note 3	FT2-Pickup	0,00882	FT-Pickup2	0,03863	2
Sans Jeu	Note 4	FT2-Pickup	0,03863	FT-Pickup2	0,28900	1
Sans Jeu	Note 5	FT2-Pickup	0,03863	FT-Pickup2	0,28900	1
Sans Jeu	Note 6	FT2-Pickup	0,00882	FT-Pickup2	0,28900	1
<hr/>						
Avec Jeu	Note 1	Acc2-FT	0,12209	Acc-FT2	0,28900	0
Avec Jeu	Note 2	Acc2-FT	0,03863	Acc-FT2	0,52744	1
Avec Jeu	Note 3	Acc2-FT	0,52744	Acc-FT2	0,92485	0
Avec Jeu	Note 4	Acc2-FT	0,03863	Acc-FT2	0,03863	2
Avec Jeu	Note 5	Acc2-FT	0,28900	Acc-FT2	0,03863	1
Avec Jeu	Note 6	Acc2-FT	0,52744	Acc-FT2	0,12209	0
<hr/>						
Avec Jeu	Note 1	Acc2-Pickup	0,12209	Acc-Pickup2	0,12209	0
Avec Jeu	Note 2	Acc2-Pickup	0,28900	Acc-Pickup2	0,52744	0
Avec Jeu	Note 3	Acc2-Pickup	0,12209	Acc-Pickup2	0,52744	0
Avec Jeu	Note 4	Acc2-Pickup	0,00882	Acc-Pickup2	0,12209	1
Avec Jeu	Note 5	Acc2-Pickup	0,00882	Acc-Pickup2	0,00137	2
Avec Jeu	Note 6	Acc2-Pickup	0,00882	Acc-Pickup2	0,00013*	2
<hr/>						
Avec Jeu	Note 1	FT2-Pickup	0,28900	FT-Pickup2	0,28900	0
Avec Jeu	Note 2	FT2-Pickup	0,52744	FT-Pickup2	0,12209	0
Avec Jeu	Note 3	FT2-Pickup	0,00882	FT-Pickup2	0,52744	1
Avec Jeu	Note 4	FT2-Pickup	0,52744	FT-Pickup2	0,52744	0
Avec Jeu	Note 5	FT2-Pickup	0,92485	FT-Pickup2	0,28900	0
Avec Jeu	Note 6	FT2-Pickup	0,00137	FT-Pickup2	0,00882	2

TABLEAU I.1 – Résultats des test binomiaux par *Paire*. La p-value est donnée dans le cas « unilatéral », c'est-à-dire dans le cas où il est vérifié, dans chaque condition, si la probabilité de donner une bonne réponse est supérieure au hasard (1/3). La présence de * indique que le test binomial conclut à une différence significative, avec la correction de Bonferroni.

Caractérisation et perception du retour vibrotactile : cas de la guitare électrique**Résumé**

L'essentiel des travaux antérieurs menés en acoustique musicale s'est focalisé sur l'étude du son émis par les instruments. Or, le corps des instruments vibre, résonne et prodigue un retour vibrotactile aux musiciens, auquel ces derniers sont réputés sensibles. Cette thèse est une approche pluridisciplinaire de caractérisation et de perception du retour vibrotactile de la guitare électrique, car celle-ci permet un découplage partiel des émissions sonore et vibratoire.

Dans la première partie de cette thèse, une méthodologie d'analyse de verbalisations est proposée et développée, puis appliquée au discours des musiciens lors d'expériences s'inscrivant dans les principes de l'approche écologique et de la perception située. Pour analyser la perception du retour vibrotactile, le discours sur le sens du toucher a été étudié à l'aide d'outils linguistiques. Il a été montré que les mots « confort », « toucher » et « vibration » permettent aux musiciens de s'exprimer sur le sens du toucher, alors que d'autres mots, *a priori* descripteurs de l'interaction musicien-instrument et du sens du toucher comme « réponse » et « ressenti », ne le permettent pas. Cette analyse robuste a permis par exemple d'identifier certains mots comme appartenant au lexique de la perception vibrotactile et de souligner le rôle des chercheurs menant les expériences quant à l'implication dans le discours des musiciens.

La deuxième partie est consacrée à la perception des modifications du retour vibrotactile de l'instrument. De telles modifications sont obtenues à partir d'une reproduction du signal vibratoire en situation de jeu dont on peut maîtriser certains attributs. Ceci permet de mener des études paramétriques sur la perception de ce retour vibrotactile. L'objectif principal est d'amplifier le retour vibrotactile de la guitare électrique en situation de jeu et de chercher comment l'améliorer. Pour atteindre cet objectif tout en conservant des conditions écologiques, il est montré que le signal peut être récupéré du micro de la guitare (plutôt que mesuré avec un accéléromètre), et être réduit à seulement quelques composantes fréquentielles. L'expérience réalisée permet de montrer l'intérêt des guitaristes pour le contrôle des vibrations en situation de jeu, la présence des vibrations favorisant par exemple la concentration, l'immersion et la restitution des sensations de concert.

Ce travail de recherche développe des outils méthodologiques nécessaires à l'étude du retour vibrotactile, qui ont été appliqués à la guitare électrique. Il permet une meilleure compréhension de la perception des vibrations et de l'expression concernant ce retour par les musiciens. Il offre de nouvelles perspectives pour la recherche sur l'interaction multimodale avec la possibilité de modifier le comportement vibratoire d'un instrument en conditions écologiques.

Mots clés : acoustique musicale, perception, toucher, retour vibrotactile, psycholinguistique, guitare électrique

Characterization and perception of vibrotactile feedback: the case of the electric guitar**Abstract**

Most of the previous work in musical acoustics have focused on the study of the sound emitted by instruments. However, musical instruments vibrate, resonate, and provide vibrotactile feedback to musicians, to which they are known to be sensitive. This thesis is a multidisciplinary approach to the characterization and perception of vibrotactile feedback from the electric guitar, as this instrument allows a partial decoupling of sound and vibration emissions.

In the first part of this thesis, a methodology for analyzing verbalizations is proposed and developed, then applied to the musicians' discourse during experiments that are in line with the principles of the ecological approach to situated perception. To analyze the perception of vibrotactile feedback, the discourse on the sense of touch is studied using linguistic tools. It is shown that the words "comfort", "touch" and "vibration" allow musicians to express themselves on the sense of touch, whereas other words, a priori descriptors of the musician-instrument interaction and the sense of touch such as "response" and "feeling", do not. This robust analysis allows for example to identify that certain words as belong to the lexicon of vibrotactile perception, and to underline the role of the researchers conducting the experiments as to the implication in the musicians' discourse.

The second part is devoted to the perception of the modifications of the vibrotactile feedback of the instrument. These modifications are obtained from a reproduction of the vibratory signal in a playing situation in which one can control certain attributes. This allows parametric studies on the perception of this vibrotactile feedback. The main objective is to amplify the vibrotactile feedback of the electric guitar in a playing situation and to investigate how to improve it. To achieve this goal while keeping ecological conditions, it is shown that vibratory signal can be constructed from the guitar's pickup (rather than being measured with an accelerometer), and be reduced to only a few frequency components. This experiment shows the interest of guitarists in controlling the vibrations of their instrument in a playing situation, because the presence of vibrations favors, for example, concentration, immersion and the restitution of concert sensations.

This research work develops methodological tools necessary for the study of vibrotactile feedback, which has been applied to the electric guitar. It allows us to better understand the perception of vibrations and the expression of this perception by musicians. It offers new research perspectives on multimodal interaction with the possibility of modifying the vibratory behavior of an instrument under ecological conditions.

Keywords: musical acoustics, perception, touch, vibrotactile feedback, psycholinguistics, electric guitar
