



Université de Montréal

**Trois perspectives sur le timbre de la flûte
traversière : instrumentale, perceptive et
computationnelle**

par

Julie Delisle

Faculté de musique

Thèse présentée à la Faculté des études supérieures
et postdoctorales en vue de l'obtention du grade de
PhilosophiæDoctor (Ph.D.)
en musique, option musicologie

Juin 2018

© Julie Delisle, 2018

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Cette thèse intitulée
**Trois perspectives sur le timbre de la flûte traversière :
instrumentale, perceptive et computationnelle**

présentée et soutenue par :

Julie Delisle

a été évaluée par un jury composé des personnes suivantes :

Jonathan Goldman,	Président rapporteur et membre du jury
Marie-Josèphe Vallée,	Représentante du doyen de la FESP
Caroline Traube,	Directrice de recherche
Pierre Michaud,	Co-directeur
Matthieu Lussier,	Membre du jury
Patricio De La Cuadra,	Examinateur externe

Résumé

Le but de cette thèse est de décrire le timbre de la flûte traversière de manière précise et détaillée à partir d'approches qui se regroupent en trois axes principaux : l'expertise instrumentale, la perception, et l'informatique musicale. Des disciplines telles que l'organologie, la pédagogie instrumentale, l'analyse musicale perceptive, l'acoustique, la psychoacoustique, les sciences de l'information et la composition musicale seront mises à contribution afin de cerner ce qui caractérise le timbre de la flûte.

Plusieurs aspects relatifs au point de vue instrumental seront investigués. D'abord, il sera question de l'histoire du développement organologique de la flûte et des considérations pratiques et esthétiques qui ont contribué à faire évoluer l'instrument jusqu'à sa forme actuelle. On fera un survol de la pédagogie instrumentale associée à la flûte, puis on abordera la notion de technique de jeu étendue. Un inventaire des différentes techniques de jeu sera ensuite proposé à travers une revue des principaux traités, puis ces techniques seront classifiées selon différents systèmes.

Ensuite, l'utilisation d'outils d'analyse musicale perceptive conçus pour les musiques électroacoustiques sera explorée pour son potentiel quant à la description du timbre instrumental. Les approches typomorphologique et spectromorphologique, respectivement proposées par Pierre Schaeffer et Denis Smalley, seront investiguées. À travers deux approches distinctes de l'écoute musicale et de la description d'événements sonores, on verra dans quelle mesure les outils proposés peuvent s'inscrire dans cette démarche de caractérisation du timbre. Puis, après avoir fait la distinction entre les manières d'appréhender le timbre propres aux sciences de l'information et aux sciences cognitives, une revue de littérature relative aux expériences sur la perception du timbre en psychoacoustique sera présentée.

Enfin, on fera un tour d'horizon des librairies informatiques d'analyse du timbre, qui sera suivi de la définition des principaux descripteurs acoustiques du timbre qui seront utilisés dans cette thèse. Les trois derniers chapitres porteront sur des analyses acoustiques effectuées sur des échantillons de sons de flûte représentatifs de la plupart des modes de jeu et des nuances de timbre de l'instrument. Dans un premier cas, une analyse par composantes principales effectuée sur une série de descripteurs du timbre permettra de déterminer de quelles manières les groupes de sons se distinguent, ainsi que les principaux descripteurs qui rendent cette distinction possible.

Une deuxième expérience visera à mettre en relation des descripteurs de timbre particuliers afin de valider ou préciser certains résultats obtenus à l'expérience précédente.

Finalement, le dernier chapitre portera sur une troisième expérience où des sons modulés par différents types de vibrato et des changements continus (de voyelle, de brillance, de hauteur) seront analysés grâce à un suivi en temps réel d'une série de descripteurs acoustiques, grâce à la librairie `zsa.descriptors` dans l'environnement Max. L'objectif est double : premièrement, on voudra observer ce qui caractérise les modulations et les changements de timbre analysés. Deuxièmement, il s'agira de mieux comprendre le comportement des descripteurs en présence de timbres changeants, de manière à pouvoir les intégrer efficacement à une stratégie de mappage musical ou audiovisuel.

Mots-clés : flûte traversière, timbre instrumental, acoustique, perception, descripteurs audio

Abstract

The aim of this thesis is to describe transverse flute timbre in a detailed and precise way, based on approaches that can be grouped in three main axes : instrumental, perceptual, and computational. Research disciplines such as organology, instrumental pedagogy, perceptual musical analysis, acoustics, psychoacoustics, information science and musical composition will contribute to determine which are the elements that characterize flute timbre.

Many aspects related to the instrumental axis will be investigated. First, a historical view of the instrument's organology is presented, with a special focus on practical and aesthetical aspects that influenced its evolution until nowadays. After an overview of instrumental pedagogy from the 19th Century onwards, the notion of extended technique is explained. Then, flute extended techniques are presented through a review of the main treatises on the subject, and a classification based on various systems is proposed.

For the perceptual axis, perceptual musical analysis tools conceived for electroacoustic music are explored for their descriptive potential in regard of instrumental timbre. Typomorphological and spectromorphological approaches, as developed respectively by Pierre Schaeffer and Denis Smalley, are investigated. The aim is to see in what extent these two musical event description tools and distinct conceptions of musical listening can be useful in characterizing flute timbre. Furthermore, after distinctions between approaches such as those of music information retrieval and cognitive sciences have been made, a literature review of the major experiments on timbre perception in psychoacoustics is presented.

Then, for the computational axis, the main libraries for timbre analysis are presented, after which a definition of the temporal, spectral, spectro-temporal, and harmonic timbre descriptors that will be used later on is given. The last three chapters are dedicated to acoustical analysis made on flute samples that are representative of most of the instrument's playing techniques and timbre changes. A first experiment consists of a principal component analysis made on 34 timbre descriptors, in order to determine how groups of sounds are distinguishable from one another, and to find out which are the main descriptors that make this differentiation possible. A second experiment combines particular descriptors as an attempt to confirm and/or to precise the results

of the first experiment.

Finally, a third experiment consists of a real-time analysis of sounds modulated by different kinds of vibrato, fluttertongue, and of some continuous timbre changes (such as vowel, brightness and pitch variations), made with `zsa.descriptors` objects in Max. This investigation has a twofold goal : first, to observe what characterizes the sound modulations and changes. And second, to better understand how descriptors vary over the course of time when applied to timbre changes, in order to be able to conceive effective mapping strategies in the context of electroacoustic mixed music and audiovisual interaction.

Key words : flute, instrumental timbre, acoustics, perception, audio descriptors

Table des matières

Résumé	iii
Summary	v
Liste des figures	xv
Liste des tableaux	xix
Liste des sigles et abréviations	xxii
Remerciements	xxiii
1 Introduction	1
1 Avant-propos	1
2 Origine de mon questionnement	2
3 Parcours académique et artistique	3
4 Orientations méthodologiques de la thèse	3
4.1 Expertise instrumentale	4
4.2 Musicologie de l'interprétation (<i>performance practice</i>)	4
4.3 Pédagogie instrumentale	4
4.4 Organologie instrumentale	5
4.5 Analyse musicale perceptive et musique électroacoustique	5
4.6 Acoustique et psychoacoustique	5
4.7 Composition et création musicales	6
5 Questions de recherche	7
6 Aperçu de la thèse et contenu des chapitres	7
2 Historique et esthétique de la flûte traversière	9
1 Introduction	9
2 Historique de la flûte traversière	11
2.1 De la Renaissance au début du XVIII ^e siècle	11
2.2 Le XVIII ^e siècle : l'âge d'or de la flûte baroque	13
2.3 La flûte classique	14
2.4 Theobald Boehm et la flûte traversière moderne	16
2.4.1 Les prototypes de 1831 et 1832	16
2.4.2 L'invention de la flûte moderne en 1847	18
2.4.3 L'adoption de la flûte de Boehm comme modèle standard	20
3 Esthétique et pédagogie traditionnelles de la flûte de Boehm	22
3.1 L'enseignement traditionnel de la flûte de Boehm	22
3.1.1 L'école de flûte française des XIX ^e et XX ^e siècles	22

3.1.2	Les méthodes d'enseignement d'Allemagne et d'Angleterre	25
3.2	La sonorité : l'âme du flûtiste	28
3.2.1	Une prolongation de la voix humaine chantée	28
3.2.2	Les autres timbres instrumentaux comme sources d'inspiration	29
3.2.3	Le timbre idéal : une question d'entraînement et d'équilibre .	31
3.3	La base de la technique de la flûte	32
3.3.1	Le vibrato	32
3.3.2	Le mécanisme	34
4	Qu'est-ce qu'une technique étendue ?	35
4.1	Définition du concept de technique étendue	35
4.2	Techniques étendues : rupture entre tradition et avant-garde	36
4.2.1	Une nouvelle pédagogie des techniques étendues	39
5	Historique du développement des techniques étendues	41
5.1	Les premières techniques étendues : pour une virtuosité et une expressivité accrues	42
5.1.1	Quarts de tons ou sons enharmoniques	42
5.1.2	Utilisation des harmoniques naturelles	43
5.1.3	Coup de langue roulé ou <i>Fluttermusik</i>	44
5.2	Vers une émancipation de l'instrument	45
5.2.1	Les bois en tant qu'instruments polyphoniques	45
5.2.2	Vers une extension du registre instrumental	46
5.2.3	L'introduction progressive de la microtonalité	48
5.2.4	Une conception différente du timbre musical	49
6	Conclusion	50
3	Portrait d'ensemble et classification des techniques de jeu à la flûte	53
1	Introduction	53
2	Fonctionnement acoustique de la flûte traversière	56
2.1	Registre	56
2.2	Structure	57
2.3	Mise en vibration	58
2.4	Ondes stationnaires	59
2.5	Impédance acoustique et modes de vibration	61
2.6	Contenu harmonique et bruité de la sonorité	62
3	Portrait d'ensemble des techniques étendues	66
3.1	Extension des possibilités timbrales de l'instrument	66
3.1.1	Variation de la position d'embouchure	66
3.1.2	Utilisation des résonateurs vocaux	67
3.1.3	Utilisation des harmoniques naturelles et de doigtés alternatifs	68
3.2	Échelles musicales alternatives et altération de la hauteur	70
3.2.1	Microtonalité et échelles extra-tonales	70
3.2.2	Le <i>Pitch bending</i>	71
3.2.3	Le <i>glissando</i>	72
3.3	Altérations périodiques et apériodiques du son	72

3.3.1	Contrôle, exagération et perturbation du vibrato	72
3.3.2	Vibrato de langue	74
3.3.3	Vibrato de doigts	74
3.3.4	Vibrato de lèvres ou <i>smorzato</i>	74
3.3.5	<i>Le fluttertongue</i> ou <i>Flatterzunge</i>	75
3.4	La flûte comme instrument polyphonique	76
3.4.1	Les multiphoniques	76
3.4.2	Harmoniques doubles ou triples	77
3.4.3	Multiphoniques inharmoniques	78
3.4.4	Utilisation de la voix en simultané	78
3.4.5	Les sifflements résonants	79
3.4.6	Les sons résultant de la polyphonie	79
3.5	Modes d'excitation alternatifs impliquant le souffle	80
3.5.1	Sons de biseau ou <i>Whistle tones</i>	80
3.5.2	Sons éoliens	80
3.5.3	Sons de trompette et de trombone	81
3.5.4	Techniques de <i>Jet whistle</i>	82
3.5.5	<i>Whistle tones</i> à embouchure couverte	82
3.6	Articulations sonores et percussions	83
3.6.1	Articulations résonnantes et <i>pizzicato</i>	83
3.6.2	Techniques de <i>tongue ram</i>	84
3.6.3	Excitation sonore par des vibrations de la langue ou de la gorge	84
3.6.4	Percussions de clés	85
3.7	Modifications structurelles de l'instrument	86
3.7.1	Utilisation de parties séparées de l'instrument	86
3.7.2	La Matusiflute	86
4	Classification des techniques de jeu à la flûte	87
4.1	Fonctions des techniques étendues	87
4.1.1	Typologie du geste instrumental de Cadoz et Wanderley . . .	87
4.1.2	Types de techniques étendues d'après leur fonction	88
4.2	Classification organologique des gestes excitateurs	89
4.2.1	Types de gestes excitateurs	89
4.2.2	Système de classification organologique de Hornbostel et Sachs	90
4.2.3	Classification organologique des gestes excitateurs de la flûte	91
4.3	Fonctionnement acoustique de cinq modes d'excitation alternatifs	93
4.3.1	Multiphoniques	94
4.3.2	<i>Whistle tones</i> (ou sons de biseau)	94
4.3.3	Sons éoliens	95
4.3.4	Sons de trompette (aérophone à anche lippale)	95
4.3.5	<i>Jet whistles</i>	96
4.4	Composantes du geste et définition des paramètres sonores	98
4.5	Modes d'excitation, articulateurs et paramètres sonores	99
4.5.1	Aérophone à anche d'air (son standard)	99
4.5.2	Sons de biseau (<i>whistle tones</i>)	100

4.5.3	Sons éoliens	101
4.5.4	Aérophone à anche lippale (son de trompette)	101
4.5.5	<i>Jet whistle</i>	102
4.5.6	Aérophone plosif (<i>tongue ram</i>)	102
4.5.7	Idiophone frappé (percussions de clé)	103
4.5.8	Résonateur (<i>pizzicato</i> et articulations percussives)	103
5	Conclusion	104
4	Le timbre de la flûte traversière et l'analyse musicale perceptive	107
1	Introduction	107
2	Outils perceptifs d'analyse musicale et sons instrumentaux	108
2.1	Musiques instrumentales et musiques électroacoustiques	108
2.2	Le rôle de la partition	109
3	Pierre Schaeffer : Typologie et morphologie sonores	113
3.1	Contexte	113
3.2	Objet sonore et écoute réduite	114
3.3	Typologie et morphologie	115
3.3.1	Critères propres à la musique traditionnelle et à la physique .	115
3.3.2	Typologie sonore	117
3.3.3	Morphologie sonore	118
3.4	Classification ou description ?	124
4	Denis Smalley : Spectromorphologie	124
4.1	Définition	124
4.2	Stratégies d'écoute	125
4.2.1	Écoute acousmatique, écoute technologique	125
4.2.2	Écoute spectromorphologique	125
4.2.3	Propriétés intrinsèques et extrinsèques du son	126
4.2.4	Écoute réduite et spectromorphologie	126
4.3	La relation entre le son et le geste	127
4.3.1	Geste musical et abstraction	127
4.4	Notions de base	128
4.5	Aspects spectraux du son	129
4.5.1	Entre note, hauteur et bruit	129
4.5.2	Harmonicité et inharmonicité	130
4.5.3	Occupation de l'espace spectral	131
4.6	Types de mouvements	132
4.7	Pour terminer	133
5	Conclusion	133
5	Les descripteurs acoustiques du timbre et leurs corrélats perceptifs	137
1	Introduction	137
2	Timbre instrumental et perception sonore	138
2.1	Définitions	138
2.1.1	Qu'est-ce que le timbre ?	138

2.2	Identification de la source sonore	140
2.2.1	Rôle des transitoires dans l'identification de la source	141
2.2.2	Détection de spécificités timbrales	141
2.3	Étude de la perception du timbre instrumental	143
2.3.1	Caractère multidimensionnel du timbre	143
2.3.2	Analyse multidimensionnelle de proximité (MDS)	143
2.3.3	Algorithmes d'analyse multidimensionnelle de proximité	144
2.4	Expériences sur la perception du timbre instrumental	145
3	Descripteurs acoustiques du timbre musical	148
3.1	Définitions	148
3.1.1	Psychoacoustique et <i>Music Information Retrieval</i> (MIR)	148
3.1.2	Propriété, dimension et descripteur du signal	149
3.1.3	Descripteurs de bas et de haut niveau	150
3.1.4	Descripteurs globaux et descripteurs instantanés	150
3.2	Méthodes computationnelles pour l'analyse acoustique du timbre	151
3.2.1	Standard MPEG-7	151
3.2.2	Projet Cuidado	151
3.2.3	Librairie jAudio	152
3.2.4	Librairie libXtract	152
3.2.5	MIRToolbox	153
3.2.6	Timbre Toolbox	153
3.3	Analyse du timbre avec la Timbre Toolbox	154
3.3.1	Propriétés d'un descripteur	154
3.3.2	Pré-analyse et représentation du signal	155
3.4	Descripteurs acoustiques du timbre musical (Timbre Toolbox)	156
3.4.1	Descripteurs calculés à partir du signal audio	156
3.4.2	Descripteurs temporels	157
3.4.3	Descripteurs spectraux	160
3.4.4	Descripteurs spécifiques à la représentation harmonique du signal	164
4	Conclusion	166
6	Espaces de timbres acoustiques de la flûte traversière	167
1	Introduction	167
2	Méthodologie	169
2.1	Enregistrement et préparation des échantillons sonores	169
2.2	Groupes de sons analysés	169
2.2.1	Remarques sur les échantillons analysés	171
2.2.2	Remarque sur la caractérisation des timbres	173
2.3	Extraction des descripteurs acoustiques	174
2.4	Analyse par composantes principales	175
2.5	Implémentation dans MATLAB et représentation graphique	175
3	Résultats	176
3.1	Mode de production sonore standard	177

3.1.1	Sons standard longs : entre brillance et dynamique	177
3.1.2	Sons standard courts : types d'attaque et dynamique	178
3.1.3	Sons standard longs et courts	180
3.2	Espace de timbres : sons à excitation continue	181
3.2.1	Excitation continue : tous les timbres	181
3.2.2	Excitation continue : tous timbres à l'exception des sons éoliens	183
3.3	Espace de timbres : sons à excitation instantanée	184
3.3.1	Excitation instantanée : tous les timbres	184
3.3.2	Excitation instantanée : techniques percussives	186
3.4	Espace de timbres : techniques polyphoniques et de modulation	187
3.4.1	Registre grave (<i>Fa#₃</i>)	187
3.4.2	Registre médium/aigu (<i>Si b₄</i>)	189
3.4.3	Tous registres confondus	191
3.5	Espace de timbres complet de la flûte traversière	192
3.5.1	Dimensions de l'analyse par composantes principales	192
3.5.2	Observations	193
4	Discussion	201
4.1	Caractéristiques timbrales des sons	201
4.2	Importance relative des descripteurs du timbre	203
4.3	Durée effective, valeur efficace (RMS) et fréquence fondamentale	204
4.4	Limites de l'expérience	204
5	Conclusion	205
7	Aspects particuliers du timbre de la flûte traversière	237
1	Introduction	237
2	Méthodologie	238
2.1	Extraction et tri des descripteurs de timbre	238
2.2	Descripteurs acoustiques considérés dans l'analyse	239
2.3	Implémentation dans MATLAB	240
2.4	Mise en relation de descripteurs du timbre pour chaque condition d'analyse	240
2.4.1	Évaluation des propriétés de l'attaque (2D)	241
2.4.2	Périodicité et harmonicité du signal (2D)	241
2.4.3	Mise en relation de descripteurs spectraux (2D) et tristimulus (3D)	241
2.4.4	Dimensions perceptives du timbre (3D)	241
3	Résultats des analyses particulières de descripteurs	242
3.1	Évaluation des propriétés de l'attaque	242
3.1.1	Mode de production sonore standard	242
3.1.2	Sons à excitation instantanée	245
3.2	Périodicité et harmonicité du signal	246
3.2.1	Timbres à excitation continue	247
3.2.2	Timbres à excitation instantanée	247
3.2.3	Techniques polyphoniques et de modulation	248
3.3	Mise en relation de descripteurs spectraux et tristimulus	248

3.3.1	Mode de production sonore standard, excitation continue	248
3.3.2	Tous modes de production sonore à excitation continue	250
3.3.3	Techniques polyphoniques et de modulation	253
3.4	Dimensions perceptives du timbre	255
3.4.1	Tous modes de production sonore à excitation continue	255
3.4.2	Tous modes de production sonore à excitation instantanée	256
4	Discussion	314
4.1	Dynamique et nuance de timbre	315
4.2	Techniques étendues	316
4.2.1	Modes de jeu à excitation continue	316
4.2.2	Techniques percussives	317
4.2.3	Techniques polyphoniques et de modulation	317
4.3	Descripteurs et dimensions perceptives du timbre	318
5	Conclusion	319
8	Suivi de changements continus du timbre en temps réel	321
1	Introduction	321
2	Librairies de suivi des descripteurs en temps réel	323
2.1	Définitions	323
2.1.1	Paramètres formels et expressifs	323
2.1.2	Sensation et perception	323
2.2	Librairies de suivi en temps réel	324
2.2.1	Suivi en temps réel ou en direct ?	324
2.2.2	Objets et librairies de suivi en temps réel	325
2.2.3	Les zsa.descriptors	326
2.3	Applications du suivi en direct	327
2.3.1	Détection d'événements	327
2.3.2	Descripteurs et musique mixte	328
2.3.3	Mappages audiovisuels	328
3	Suivi en direct de descripteurs du timbre	329
3.1	Choix de la librairie de suivi de descripteurs	329
3.2	Objectifs de l'expérience	329
3.3	Description des sons analysés	330
3.3.1	Vibrato	330
3.3.2	<i>Fluttermode</i>	331
3.3.3	Changements de timbre : entre brillant et rond	332
3.3.4	Changements de timbre : entre standard et éolien	333
3.3.5	Changements de timbre : entre les voyelles <i>i</i> et <i>o</i>	333
3.3.6	<i>Jet whistles</i>	333
3.3.7	<i>Pitch bends</i>	334
3.3.8	Remarques sur les échantillons	334
4	Méthodologie	335
4.1	Enregistrement des échantillons sonores	335
4.2	Implémentation dans l'environnement <i>Max 7</i>	335

4.3	Analyse des données	337
4.3.1	Comparaison des données par descripteur	337
4.3.2	Comparaison des données par fichier	338
4.3.3	Présentation graphique des résultats	338
5	Résultats	338
5.1	Vibrato et chevrotement	338
5.1.1	Observations par descripteur	338
5.1.2	Comparaison de types de vibrato	341
5.2	<i>Fluttertongue</i>	342
5.3	Changements de timbre : brillant/rond	366
5.3.1	Observation générale des changements de timbres	366
5.3.2	Observations sur certains descripteurs	368
5.4	<i>Jet whistles</i>	386
5.4.1	Observation des deux types de <i>jet whistles</i>	386
5.4.2	Observations sur certains descripteurs	387
5.5	<i>Pitch bends</i>	399
5.5.1	Observation générale de deux types de <i>pitch bends</i>	399
5.5.2	Observations sur certains descripteurs	400
5.6	Changements de timbre : sons standard et éolien	412
5.6.1	Observation générale des changements de timbres	412
5.6.2	Observations sur certains descripteurs	413
5.7	Changements de timbre : voyelles [i]/[o]	424
5.7.1	Observation générale des changements de timbres	424
5.7.2	Observations sur certains descripteurs	424
6	Discussion	435
6.1	Remarques sur les descripteurs	435
6.2	Limites de l'expérience	435
6.3	Remarques sur le suivi des <i>zsa.descriptors</i>	437
7	Conclusion	438
9	Conclusion	441
1	Retour sur l'interrogation de base	441
2	Retour sur les sujets abordés	442
3	Réflexion sur l'interdisciplinarité	444
4	Différentes pistes d'exploration	445
4.1	Retombées en recherche fondamentale	446
4.2	Retombées en recherche-création	447
4.3	Combiner recherche et pratique instrumentale	448
Bibliographie		450
Annexe A		v
Annexe B		xi

Table des figures

3.1	Registre de la flûte traversière en <i>do</i>	56
3.2	Clés et position des doigts sur la flûte traversière.	58
3.3	Modèle simplifié du son de biseau (<i>edge tone</i>).	59
3.4	Nœuds et ventres de pression dans deux types de tube.	60
3.5	Spectre d'impédance du <i>si₃</i> et fréquences des premiers partiels.	63
3.6	Transition entre les comportements laminaire et turbulent dans le flux convectif de la fumée d'une chandelle.	65
5.1	Étalement autour d'une valeur moyenne.	162
5.2	Mesure d'asymétrie.	162
5.3	Mesure d'aplatissement.	163
6.1	Enregistrement des extraits sonores.	170
6.2	Sons standard longs - PCA dim. 1-2	195
6.3	Sons standard longs - PCA dim. 1-3	196
6.4	Sons standard courts - PCA dim. 1-2	197
6.5	Sons standard courts - PCA dim. 2-3	198
6.6	Sons standard longs et courts - PCA dim. 1-2	199
6.7	Sons standard longs et courts - PCA dim. 2-3	200
6.8	Timbres à excitation continue - PCA dim. 1-2	207
6.9	Timbres à excitation continue - PCA dim. 2-3	208
6.10	Timbres à excitation continue - PCA dim. 1-3	209
6.11	Timbres à excitation continue - PCA dim. 3-4	210
6.12	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 1-2	211
6.13	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 2-3	212
6.14	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 1-3	213
6.15	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 3-4	214
6.16	Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 1-2	215
6.17	Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 2-3	216
6.18	Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 1-3	217
6.19	Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 3-4	218
6.20	Techniques percussives - PCA dim. 1-2	219
6.21	Techniques percussives - PCA dim. 2-3	220
6.22	Polyphonie et modulation (grave) - PCA dim. 1-2	221

6.23	Polyphonie et modulation (grave) - PCA dim. 2-3	222
6.24	Polyphonie et modulation (média/aigu) - PCA dim. 1-2	223
6.25	Polyphonie et modulation (média/aigu) - PCA dim. 1-3	224
6.26	Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 1-2	225
6.27	Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 2-3	226
6.28	Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 1-3	227
6.29	Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 3-4	228
6.30	Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 1-2	229
6.31	Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 2-3	230
6.32	Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 1-3	231
6.33	Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 3-4	232
6.34	Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 1-2	233
6.35	Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 2-3	234
6.36	Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 1-3	235
6.37	Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 3-4	236
7.1	Sons standard longs - Temps et pente de l'attaque	257
7.2	Sons standard longs - Temps d'attaque / de déclin	258
7.3	Sons standard longs - Temps d'attaque / Flux spectral	259
7.4	Sons standard courts - Temps et pente de l'attaque	260
7.5	Sons standard courts - Temps d'attaque / de déclin	261
7.6	Sons standard longs et courts - Temps d'attaque / de déclin	262
7.7	Sons standard longs et courts - Temps et pente de l'attaque	263
7.8	Sons standard longs et courts - Temps d'attaque/Flux spectral	264
7.9	Sons standard longs et courts - Temps d'attaque / Déviation harmonique (irrégularité)	265
7.10	Sons courts - Temps et pente de l'attaque	266
7.11	Sons courts - Temps d'attaque / de déclin	267
7.12	Sons courts - Temps d'attaque et flux spectral	268
7.13	Sons courts - Temps d'attaque et irrégularité spectrale	269
7.14	Techniques percussives - Temps et pente de l'attaque	270
7.15	Techniques percussives - Temps d'attaque / de déclin	271
7.16	Techniques percussives - Temps d'attaque et flux spectral	272
7.17	Techniques percussives - Temps d'attaque et irrégularité spectrale	273
7.18	Timbres à excitation continue - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale	274
7.19	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale	275
7.20	Timbres à excitation continue - Passage à zéro et inharmonicité	276
7.21	Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Passage à zéro et inharmonicité	277
7.22	Timbres à excitation instantanée - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale	278
7.23	Techniques polyphoniques et de modulation - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale	279
7.24	Techniques polyphoniques et de modulation - Passage à zéro et inharmonicité	280
7.25	Sons standard longs - Tristimulus 1-2-3	281

7.26 Sons standard longs - Centroïde et flux	282
7.27 Sons standard longs - Centroïde et aspect plat	283
7.28 Sons standard longs - Centroïde et roulement	284
7.29 Sons standard longs - Centroïde et étalement	285
7.30 Sons standard longs - Centroïde et aplatissement	286
7.31 Sons standard longs - Centroïde et asymétrie	287
7.32 Sons standard longs - Aspect plat et roulement	288
7.33 Sons standard longs - Pente globale et décroissance	289
7.34 Timbres à excitation continue - Centroïde et aspect plat	290
7.35 Timbres à excitation continue - Centroïde et flux	291
7.36 Timbres à excitation continue - Centroïde et roulement	292
7.37 Timbres à excitation continue - Aspect plat et roulement	293
7.38 Timbres à excitation continue - Centroïde et asymétrie	294
7.39 Timbres à excitation continue - Centroïde et aplatissement	295
7.40 Timbres à excitation continue - Centroïde et étalement	296
7.41 Timbres à excitation continue - Tristimulus 1-2-3	297
7.42 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et asymétrie	298
7.43 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et aplatissement	299
7.44 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et roulement	300
7.45 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et aspect plat	301
7.46 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et flux	302
7.47 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Aspect plat et roulement	303
7.48 Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Tristimulus 1-2-3	304
7.49 Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et flux spectral	305
7.50 Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et étalement	306
7.51 Techniques de modulation et polyphonie - Aspect plat et roulement	307
7.52 Techniques de modulation et polyphonie - Tristimulus 1-2-3	308
7.53 Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et aplatissement	309
7.54 Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et asymétrie	310
7.55 Timbres à excitation continue - Flux spectral	311
7.56 Timbres à excitation continue - Irrégularité spectrale	312
7.57 Timbres à excitation instantanée - Flux spectral	313
7.58 Timbres à excitation instantanée - Irrégularité spectrale	314
8.1 <i>Patch principal - zsa.descriptors</i>	336
8.2 <i>Subpatch pfft~ pour le calcul des descripteurs spectraux</i>	337
8.3 Vibrato lent – Amplitude	343
8.4 Vibrato rapide – Amplitude	344
8.5 Vibrato lent – Centroïde	345
8.6 Vibrato rapide – Centroïde	346
8.7 Vibrato lent – Aspect plat du spectre (<i>Flatness</i>)	347
8.8 Vibrato rapide – Aspect plat du spectre (<i>Flatness</i>)	348
8.9 Vibrato lent – Flux spectral	349
8.10 Vibrato rapide – Flux spectral	350

8.11	Vibrato lent – Aplatissement spectral (<i>Kurtosis</i>)	351
8.12	Vibrato rapide – Aplatissement spectral (<i>Kurtosis</i>)	352
8.13	Vibrato lent – Roulement spectral (<i>Roll-Off</i>)	353
8.14	Vibrato rapide – Roulement spectral (<i>Roll-Off</i>)	354
8.15	Vibrato lent – Asymétrie spectrale (<i>Skewness</i>)	355
8.16	Vibrato rapide – Asymétrie spectrale (<i>Skewness</i>)	356
8.17	Vibrato lent – Pente spectrale globale (<i>Slope</i>)	357
8.18	Vibrato rapide – Pente spectrale globale (<i>Slope</i>)	358
8.19	Vibrato lent – Étalement spectral (<i>Spread</i>)	359
8.20	Vibrato rapide – Étalement spectral (<i>Spread</i>)	360
8.21	<i>Fa #</i> – Vibrato lent à grande amplitude	361
8.22	<i>Si b</i> – Vibrato lent à grande amplitude	362
8.23	<i>Si b</i> – Chevrottement lent	363
8.24	<i>Fa #</i> – <i>Fluttermusik</i>	364
8.25	<i>Si b</i> – <i>Fluttermusik</i>	365
8.26	<i>Do #</i> – Brillant à rond, <i>f</i>	370
8.27	<i>Fa #</i> – Brillant à rond, <i>f</i>	371
8.28	<i>Do #</i> – Brillant à rond, <i>p</i>	372
8.29	<i>Fa #</i> – Brillant à rond, <i>p</i>	373
8.30	<i>Do #</i> – Rond à brillant, <i>f</i>	374
8.31	<i>Fa #</i> – Rond à brillant, <i>f</i>	375
8.32	<i>Do #</i> – Rond à brillant, <i>p</i>	376
8.33	<i>Fa #</i> – Rond à brillant, <i>p</i>	377
8.34	Brillant/Rond - Centroïde	378
8.35	Brillant/Rond - Amplitude	379
8.36	Brillant/Rond - Roulement (<i>Roll-Off</i>)	380
8.37	Brillant/Rond - Aplatissement (<i>kurtosis</i>)	381
8.38	Brillant/Rond - Flux spectral	382
8.39	Brillant/Rond - Asymétrie (<i>skewness</i>)	383
8.40	Brillant/Rond - Pente spectrale (<i>slope</i>)	384
8.41	Brillant/Rond - Étalement (<i>spread</i>)	385
8.42	<i>Do #</i> – Jet whistle <i>i</i> vers <i>o</i>	389
8.43	<i>Fa #</i> – Jet whistle <i>i</i> vers <i>o</i>	390
8.44	<i>Do #</i> – Jet whistle <i>o</i> vers <i>i</i>	391
8.45	<i>Fa #</i> – Jet whistle <i>o</i> vers <i>i</i>	392
8.46	Jet whistle - Centroïde	393
8.47	Jet whistle - Étalement (<i>spread</i>)	394
8.48	Jet whistle - Aplatissement (<i>kurtosis</i>)	395
8.49	Jet whistle - Asymétrie (<i>skewness</i>)	396
8.50	Jet whistle - Flux spectral	397
8.51	Jet whistle - Pente spectrale globale (<i>slope</i>)	398
8.52	<i>Fa #</i> – Pitch bend couvrant	402
8.53	<i>Fa #</i> – Pitch bend découvrant	403
8.54	Pitch bend - Centroïde	404

8.55	Pitch bend - Pente spectrale globale (<i>slope</i>)	405
8.56	Pitch bend - Aspect plat du spectre (<i>flatness</i>)	406
8.57	Pitch bend - Flux spectral	407
8.58	Pitch bend - Aplatissement (<i>kurtosis</i>)	408
8.59	Pitch bend - Asymétrie (<i>skewness</i>)	409
8.60	Pitch bend - Roulement (<i>roll-off</i>)	410
8.61	Pitch bend - Étalement (<i>spread</i>)	411
8.62	<i>Do #</i> – Éolien vers standard	414
8.63	<i>Fa #</i> – Éolien vers standard	415
8.64	<i>Do #</i> – Standard vers éolien	416
8.65	<i>Fa #</i> – Standard vers éolien	417
8.66	Transition Son/Bruit - Centroïde	418
8.67	Transition Son/Bruit - Flux spectral	419
8.68	Transition Son/Bruit - Pente spectrale globale (<i>slope</i>)	420
8.69	Transition Son/Bruit - Aspect plat du spectre (<i>flatness</i>)	421
8.70	Transition Son/Bruit - Aplatissement (<i>kurtosis</i>)	422
8.71	Transition Son/Bruit - Asymétrie (<i>skewness</i>)	423
8.72	<i>Do #</i> – Voyelles : <i>i</i> vers <i>o</i>	426
8.73	<i>Fa #</i> – Voyelles : <i>i</i> vers <i>o</i>	427
8.74	<i>Do #</i> – Voyelles : <i>o</i> vers <i>i</i>	428
8.75	<i>Fa #</i> – Voyelles : <i>o</i> vers <i>i</i>	429
8.76	Transition de voyelles - Centroïde	430
8.77	Transition de voyelles - Aspect plat du spectre (<i>flatness</i>)	431
8.78	Transition de voyelles - Étalement (<i>spread</i>)	432
8.79	Transition de voyelles - Flux spectral	433
8.80	Transition de voyelles - Aplatissement (<i>kurtosis</i>)	434

Liste des tableaux

3.1	Fréquences correspondant au registre tonal de la flûte	57
3.2	Tableau-résumé des différents modes d'excitation sonore à la flûte	93
4.1	Tableau récapitulatif de la typologie (TARTYP).	118
4.2	Classes de textures de masse avec exemples pour la flûte traversière.	121
6.1	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 1	177
6.2	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 2	179
6.3	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 3	180
6.4	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 4	182
6.5	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 5	183
6.6	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 6	185
6.7	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 7	187
6.8	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 8	188
6.9	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 9	190
6.10	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 10	191
6.11	Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 11	193

Liste des sigles et abréviations

- CIRMMT – Centre for Interdisciplinary Research in Music and Media Technology (Montréal)
- Ircam – Institut de Recherche et de Coordination Acoustique/Musique (Paris)
- MIR – Music Information Retrieval
- MDS – Multidimensional Scaling (Analyse multidimensionnelle de proximité)
- PCA – Analyse par composantes principales (*Principal component analysis* en anglais)
- RMS – Valeur efficace du signal (*Root mean square* en anglais)

Remerciements

D'abord, merci à ma directrice de thèse, Caroline Traube, pour son soutien inconditionnel, pour sa confiance et sa bienveillance, et pour toutes les découvertes fantastiques auxquelles elle m'a permis d'accéder.

Merci aussi à Pierre Michaud, mon co-directeur, pour sa présence et ses conseils judicieux. Merci de m'avoir gardée en contact avec la création musicale, les pieds sur terre et la tête dans les nuages.

Merci à Mathieu Lussier et à Patricio de la Cuadra pour leur lecture attentive de cette thèse et pour leurs remarques éclairantes.

Merci à Richard Parncutt pour sa grande humanité et son accueil au Centre for Systematic Musicology, ainsi qu'à Christa Grassauer et à la Karl-Franzens-Universität de Graz.

Merci à Eva Furrer pour son intelligence, sa finesse et sa sensibilité, qui m'ont grandement inspirée, ainsi qu'à Irene Hofmann-Wellenhof et à la Universität für Musik und Darstellende Kunst Graz de leur soutien.

Merci à Jonathan Goldman et à Marie-Hélène Benoît-Otis de m'avoir appris le métier de musicologue.

Merci à la Faculté de musique de l'Université de Montréal (notamment pour l'attribution d'une *Bourse de doctorat* en 2017-2018), à son personnel et à Nathalie Fernando, vice-doyenne aux études théoriques à la Faculté de musique. Merci également au Conseil de Recherche en Sciences Humaines du Canada (*Bourse d'études supérieures du Canada Joseph-Armand-Bombardier*, 2014-2017, et *Supplément Michael-Smith pour études à l'étranger*, 2015-2016), à la Faculté des études supérieures et postdoctorales de l'Université de Montréal (*Bourse de fin d'études doctorales*, 2017-2018), au Centre for Interdisciplinary Research in Music and Media Technology (*CIRMMT Inter-Centre Exchange Funding* et *CIRMMT Travel award*) et à l'Observatoire Interdisciplinaire de Crédit et de Recherche en Musique (OICRM - *Bourse de déplacement*) d'avoir soutenu cette recherche.

Une pensée spéciale pour mes parents, qui ont hébergé mon laboratoire mobile durant quelques mois et qui m'ont soutenue à tous les instants, et à ma sœur Véronique et sa famille.

Une autre pensée particulière pour Claire Garde et Mylène Gioffredo, que je remercie de leur présence, elles qui m'ont aidée à faire face à tous les défis posés par cette thèse, ainsi que pour Ferran Esteve, pour m'avoir donné la joie et la force de me rendre jusqu'au bout de ce chemin.

Merci à Simon Geiger et Elisabeth Watts du Vienna Wushu Guan ainsi qu'à Moire Stevenson et Ginette Soucy de m'avoir gardée en excellente santé physique et mentale.

Merci à tous ceux et celles qui m'ont enseigné la flûte, et spécialement à Robert Aitken pour avoir piqué ma curiosité pour les phénomènes acoustiques, d'avoir radicalement changé ma manière d'écouter et de m'avoir poussée à briser le carcan que l'on impose trop souvent aux instrumentistes.

Enfin, merci à Barah Héon-Morissette, Annabelle Cavalli, Grégoire Lavergne, Katerine Verrebély, Caroline Séguin, Vincent Verfaillie, Maximilien Simard-Poirier, Ivonne Silva, Rafael Stary, Ursula Keutmann, Willibald et Bernadette Plessas, Julien Laffaire, Niels Hap, Max Burian, Johannes Singer, Emilia Bruch et Katja Heldt, ainsi qu'à tous ceux et celles qui ont été présents de près ou de loin durant ces années de doctorat.

Chapitre 1

Introduction

Sommaire

1	Avant-propos	1
2	Origine de mon questionnement	2
3	Parcours académique et artistique	3
4	Orientations méthodologiques de la thèse	3
5	Questions de recherche	7
6	Aperçu de la thèse et contenu des chapitres	7

1 Avant-propos

Voilà, la glace est brisée. L’amorce d’un travail d’envergure comme une thèse de doctorat est souvent l’étape la plus difficile à franchir. Mais surtout, il me semblait pertinent dans cette introduction d’aborder certains éléments essentiels à une véritable mise en contexte de la recherche qui sera présentée ici. En premier lieu, j’expliquerai en quoi cette thèse s’inscrit en continuité logique dans mon parcours professionnel et personnel, en faisant part des origines de mon questionnement et de mon parcours. Ensuite, à l’image de celui-ci, comme cette thèse découle d’un travail multidisciplinaire et fait appel à plusieurs spécialités, les questions de recherche à la base de ma démarche doctorale seront présentées et enfin, on pourra lire un aperçu du contenu de cette thèse.

2 Origine de mon questionnement

J'ai débuté l'apprentissage de la flûte traversière à l'âge de 12 ans, après avoir assisté à un concert d'orchestre symphonique et entendu cet instrument dont la sonorité arrivait à flotter au-dessus de toutes les autres. Ce sont les propriétés de ce son instrumental qui m'ont happée dès le premier instant. Deux ans auparavant, j'avais arrêté mes cours de piano, ayant perdu la motivation nécessaire à peu près au moment où le piano droit familial avait été remplacé par un piano électronique : j'avais perdu le contact direct avec le son, le lien kinesthésique avec la vibration sonore. Heureusement, j'ai retrouvé cette proximité avec le timbre grâce à la flûte traversière, et ce de manière très organique.

Assez tôt lors de mes études au Conservatoire de musique de Montréal, j'avais l'intuition que le timbre instrumental était une réalité complexe, multidimensionnelle et presque insaisissable. Étant donné le vocabulaire relativement restreint dont je disposais pour le décrire, le timbre avait un caractère presque mystique. Certes, nous parlions des aspects techniques de la sonorité instrumentale et celle-ci était évaluée en des termes esthétiques (belle, terne, ronde, ouverte), mais pas de là à pouvoir expliquer de manière précise en quoi cela consistait.

Lors de mon premier atelier de musique contemporaine¹ à 19 ans, on m'a assigné la mission (et le défi considérable) d'interpréter *Ausone (version C)* (1979) de Bruce Mather, pour flûte et ensemble de 10 instruments à cordes. La flûte était sortie de son cadre tonal et j'ai progressivement pris conscience du potentiel des échelles microtonales et de la variété de sons que l'instrument pouvait produire. Cela s'est traduit de mon côté par un apprentissage de la patience et de la flexibilité, ainsi que par un goût pour des espaces sonores plus diversifiés que ceux auxquels on m'avait habituée jusqu'alors.

Par ailleurs, dans l'ensemble de ma pratique instrumentale, des conseils et demandes de toutes sortes étaient exprimés par mes enseignants et enseignantes : « *Imite le son du hautbois* », « *ici, change de couleur!* », « *cette personne a un son trop fermé* », « *à cet endroit, un son plus "blanc" serait bien* », « *ouvre !* », « *plus de vibrato !* », ou encore « *attention à la projection !* ».

Mais justement, qu'est-ce qui fait en sorte qu'une personne obtienne une sonorité qui projette plus loin que celle de son ou sa collègue ? Pourquoi les Français, les Américains, les Québécois et

¹En 2001, *Ensemble Musique Avenir*, sous la direction de Véronique Lacroix, au Conservatoire de musique de Montréal.

les Allemands semblent jouer, voire entendre différemment ? Est-ce seulement l'accord parfait à un diapason donné qui permet à une section de bois à l'orchestre de bien jouer ensemble ? Jusqu'à quel point les sons peuvent-ils être associés à des couleurs et/ou à des textures ? Et comment fait-on pour jouer avec une nuance *piano* tout en pouvant être entendu à l'arrière d'une salle de plusieurs centaines de places ?

Les questions qui s'entrechoquaient dans mon esprit étaient nombreuses. Mon parcours, ainsi que cette thèse, reflètent l'ensemble des tentatives de réponse à cette série d'interrogations.

3 Parcours académique et artistique

J'ai acquis l'essentiel de ma formation musicale au Conservatoire de musique de Montréal, où j'ai complété des études en interprétation de la flûte traversière². J'ai expérimenté la réalité de la flûte à l'orchestre, en solo, avec piano ainsi que dans divers ensembles ; mes premiers contacts avec la musique électroacoustique datent également de cette époque. Ensuite, à la Hochschule für Musik Freiburg, j'ai étudié la flûte baroque (traverso) et la flûte moderne en parallèle³.

À mon retour à Montréal, j'ai voulu en apprendre davantage sur les technologies électroacoustiques ; le programme *Musiques numériques* de l'Université de Montréal m'a permis de le faire et de me familiariser avec l'acoustique, l'organologie et l'informatique musicales. J'ai ensuite complété cette formation par un an d'études en informatique et mathématiques, puis l'occasion s'est présentée de commencer ce doctorat en musicologie, sous la direction de Caroline Traube et Pierre Michaud, à la Faculté de musique de l'Université de Montréal et avec un financement du Conseil de Recherches en Sciences Humaines du Canada⁴.

4 Orientations méthodologiques de la thèse

À l'image de mes intérêts multiples et de la complexité de mon questionnement, cette thèse fait appel à plusieurs disciplines scientifiques et orientations méthodologiques.

²Diplômes d'études supérieures I et II en musique.

³À l'annexe A, on trouvera une description détaillée de mon parcours en tant que flûtiste, ainsi que les noms de mes principaux enseignants.

⁴Bourse d'études supérieures Joseph-Armand-Bombardier, 2014-2017.

4.1 Expertise instrumentale

Il s'agit ici des connaissances de nature empirique acquises lors de ma formation musicale, durant les nombreuses heures de pratique et d'expérimentation individuelles qui sont à la base de ma technique instrumentale, et des échanges avec mes collègues flûtistes, compositeurs.trices et musicien.ne.s. Le travail instrumental consiste à perfectionner et à automatiser des gestes producteurs de sons bien précis afin de gagner le contrôle et la liberté nécessaires à une expression musicale épanouie et diversifiée. Mais ce travail, ainsi que la manière dont on l'oriente, a également une influence sur les habitudes d'écoute et sur la perception du son instrumental ; réciproquement, celles-ci influencent aussi le travail instrumental. La plupart des pistes d'investigation explorées dans cette thèse découlent de mes observations en lien direct avec la pratique instrumentale.

4.2 Musicologie de l'interprétation (*performance practice*)

Par extension, la musicologie de l'interprétation s'intéresse aux considérations pratiques de la musique et aux habitudes de production sonore et d'écoute qui sont à la base de l'expression musicale. Autrement dit, il s'agit de l'étude de ce qui est relatif au geste musicien ainsi qu'aux structures décisionnelles et aux apprentissages qui le déterminent, mais aussi de ce qui constitue le pont entre la musique composée et celle qui sera reçue par l'audience. Cela dit, le travail qui sera présenté ici ne se limite pas à la dimension interprétative de l'expression musicale, mais englobe, en ce qui concerne la flûte traversière, tout ce qui est relatif à la production de sons musicaux et d'un discours musical articulé, que ce soit dans le cadre de l'interprétation, de l'improvisation, de la composition musicale et/ou de l'art sonore.

4.3 Pédagogie instrumentale

Ensuite, c'est par la pédagogie instrumentale que des idéaux sonores et musicaux sont véhiculés d'une personne à l'autre. C'est aussi le moyen par lequel un.e enseignant.e lègue son savoir empirique à un.e apprenti.e. Ce legs comprend celui de connaissances musicales, langagières, mais aussi d'une esthétique sonore et d'une vision particulière de l'expression musicale, elles-mêmes héritées d'un enseignement antérieur. Il est donc pertinent de s'interroger

sur la nature de la pédagogie de la flûte traversière ainsi que sur son évolution depuis la mise au point de l'instrument moderne, vers la seconde moitié du XX^e siècle.

4.4 Organologie instrumentale

La flûte de Boehm, c'est-à-dire l'instrument que nous utilisons de manière répandue et conventionnelle en musique classique occidentale, a été mise au point pour répondre à des exigences acoustiques et esthétiques particulières. Quelles sont-elles, et en quoi cela détermine-t-il la manière dont on conçoit le son instrumental de la flûte traversière ? Est-ce que la structure même de l'instrument implique la possibilité de transgressions structurelles, esthétiques ou pratiques au moment du geste de production sonore ?

4.5 Analyse musicale perceptive et musique électroacoustique

Une fois toutes les possibilités sonores ouvertes, il peut être intéressant, voire nécessaire de se pencher sur cette diversité non pas du point de vue de la technique instrumentale ou du geste, mais de la nature des sons en tant que phénomènes perçus et intégrés dans une variété de langages musicaux. On pourra se mettre à la recherche d'outils de classification et de description de l'ensemble des phénomènes sonores en lien avec la flûte traversière. D'abord pour mieux en comprendre leur contenu sémantique et, ensuite, pour permettre leur reproduction plus ou moins exacte, c'est-à-dire une certaine cristallisation de leur nature. En ce sens, les outils d'analyse musicale perceptive et, particulièrement, ceux qui ont été conçus pour les musiques électroacoustiques peuvent être d'un précieux recours.

4.6 Acoustique et psychoacoustique

La description verbale est une étape essentielle dans la définition des timbres instrumentaux. Mais elle comporte une part de subjectivité due aux référents culturels et personnels. Alors, objectivement, que se passe-t-il dans le monde physique qui nous pousse à distinguer des sons ou des groupes de sons ? Existe-t-il des archétypes sonores qui se définissent par des propriétés physiques ? En quoi consistent ces descripteurs acoustiques du timbre et quels sont ceux qui jouent un rôle plus significatif dans le contexte particulier de la flûte ? Et finalement, est-ce que ces propriétés du timbre correspondent aux dimensions perceptives mises à jour par les études en

psychoacoustique ?

4.7 Composition et création musicales

La composition musicale, tout comme la production d'un discours expressif sous quelque forme que ce soit, consiste (entre autres) à combiner et à orienter des matériaux sonores, et à passer du microscopique au macroscopique (ou à faire l'inverse). Le travail de recherche effectué dans le cadre de cette thèse a donc aussi pour but de faciliter cette démarche en définissant de manière variée, précise et détaillée les propriétés du médium que constitue le son de la flûte traversière.

En outre, ce regard pluriel et multidisciplinaire me permet de m'adresser à tous et à toutes : aux flûtistes, peu importe leur genre musical favori et leurs pratiques artistiques ; aux improvisateurs.trices, aux compositeurs.trices, aux artistes sonores, aux acousticien.ne.s, aux psychoacousticien.ne.s, aux ingénieur.e.s de son, aux informaticien.ne.s ainsi qu'à tous les amoureux et amoureuses du timbre de la flûte.

Cette polyvalence dans la recherche constitue à mon avis une des principales forces de cette thèse, mais représente aussi un défi réel. En effet, chaque discipline vient avec ses traditions, son vocabulaire et sa vision du monde (ainsi que son propre système de références bibliographiques). J'ai tenté ici, tant bien que mal, d'uniformiser le ton et la présentation en usant de compromis. Il est possible que selon la spécialité et les intérêts de chaque personne, les chapitres de cette thèse interpellent différemment. Je crois sincèrement au partage et à la transposition des connaissances d'une discipline à l'autre, et c'est dans cette optique que je l'ai rédigée. Toutefois, la lecture ne doit pas absolument se faire de manière linéaire. Étant donné la variété d'approches et de sujets qui sont présentés ici, chacun.e pourra aller chercher ce dont il.elle a besoin.

Dans chaque chapitre, les champs d'expertise auxquels on fera appel dans le chapitre seront spécifiés en introduction, puis des pistes de réflexion seront proposées aux différents types de lecteurs et lectrices en conclusion, afin que chacun.e puisse y trouver son compte.

5 Questions de recherche

En premier lieu, il me semblait pertinent de bien comprendre la manière dont s'est constituée l'identité de la flûte traversière en tant qu'instrument moderne de tradition occidentale et classique. Quelles sont les modifications et évolutions organologiques qui ont mené à l'instrument en usage aujourd'hui ? Qu'est-ce qui est considéré comme un son plaisant, et quelles sont les qualités recherchées chez un.e instrumentiste ? Pourquoi parle-t-on de technique standard et de techniques étendues ? Comment en est-on venu à développer toute la palette de sonorités aujourd'hui propres à la flûte ? Quelles sont les différents modes de jeu existants et répertoriés ? Existe-t-il un moyen de les classifier ?

Ensuite, il m'a paru nécessaire de franchir un pas supplémentaire. Comment se fait-il que les flûtistes (et autres musicien.ne.s) aient un vocabulaire aussi restreint lorsqu'il s'agit de décrire les timbres multiples qu'ils sont capables de créer ? Comment enrichir ce vocabulaire descriptif ? Comment les sons de flûte peuvent-ils être intégrés à un langage compositionnel ? Comment en décrire les multiples nuances et inflexions ?

Enfin, j'ai eu envie de percer le mystère de ce qui se cache dans les sons de flûte. Quelles sont les propriétés acoustiques des différentes nuances de timbre de la flûte ? Et qu'en est-il de leurs corrélats perceptifs ? Comment distingue-t-on un mode de jeu d'un autre, si on n'a pas accès au détail du geste musicien ?

6 Aperçu de la thèse et contenu des chapitres

Cette thèse consiste ainsi à approcher un même sujet à partir de différentes perspectives, regroupées en trois axes : instrumental (expérience de l'interprète, pédagogie, esthétique et organologie), perceptif (outils d'analyse musicale perceptive et psychoacoustique du timbre) et computationnel (acoustique, psychoacoustique, composition et création instrumentales et mixtes).

Le **chapitre 2** traitera de l'histoire et de l'esthétique de la flûte traversière. Il sera question de l'évolution historique de l'instrument depuis la Renaissance et de celle de la pédagogie de la flûte de Boehm depuis la seconde moitié du XX^e siècle. On y définira également le concept de *technique étendue*.

Le **chapitre 3** présentera un portrait d'ensemble des techniques de jeu à la flûte traversière à travers une revue des principaux traités contemporains consacrés à la flûte, ainsi que des propositions de classification des différents modes de jeu recensés.

Le **chapitre 4** sera consacré à la définition et à la description du timbre de la flûte traversière par des outils d'analyse musicale perceptive. L'utilisation d'outils perceptifs conçus pour les musiques électroacoustiques – donc pour fonctionner à partir de l'écoute – tels que la typologie et morphologie sonore de Pierre Schaeffer et l'approche spectromorphologique de Denis Smalley seront abordés. On tentera d'adapter ces vocabulaires timbraux à la flûte, dans la mesure où ils le permettent.

Dans le **chapitre 5**, on abordera les descripteurs acoustiques du timbre et leurs corrélats perceptifs. Une revue des principales études en psychoacoustique sur la perception du timbre instrumental sera présentée, puis une description des descripteurs acoustiques du timbre et des disciplines qui y ont recours sera fournie. On y présentera aussi quelques librairies d'analyse computationnelle du timbre.

Dans le **chapitre 6**, on s'intéressera aux espaces de timbres acoustiques de la flûte traversière, et aux propriétés ou descripteurs qui permettent d'effectuer des distinctions significatives entre les nuances de timbre de la flûte. Le but sera de déterminer quels descripteurs acoustiques fournissent l'information la plus éclairante sur les sons de flûte, et de déterminer ce qui caractérise la variété des différentes nuances de timbre de la flûte.

Le **chapitre 7** s'inscrit en continuité du sixième. À partir des résultats des analyses par composantes principales effectuées au chapitre 5, on y explorera le rôle précis de certains descripteurs du timbre dans la caractérisation de différents modes de jeu. On tentera ensuite de faire le lien entre ces propriétés du son et les dimensions perceptives révélées par la recherche en psychoacoustique.

Finalement, le **chapitre 8** constituera un espace d'expérimentation où des changements continus du timbre seront suivis en temps réel. En plus de définir les propriétés acoustiques de ces changements de timbre, on verra, dans une certaine mesure, comment les approches computationnelles utilisées pour leur suivi peuvent être intégrées dans une optique de composition mixte et transdisciplinaire.

Chapitre 2

Historique et esthétique de la flûte traversière

Sommaire

1	Introduction	9
2	Historique de la flûte traversière	11
3	Esthétique et pédagogie traditionnelles de la flûte de Boehm	22
4	Qu'est-ce qu'une technique étendue ?	35
5	Historique du développement des techniques étendues	41
6	Conclusion	50

1 Introduction

La flûte traversière de Boehm est l'instrument qui est utilisé dans la musique de concert contemporaine ainsi que dans la plupart des ensembles de musique classique dont l'effectif comprend au moins une flûte. Cet instrument, tel qu'on le connaît aujourd'hui, est le résultat d'une série d'innovations technologiques. Sa facture a subi de nombreux changements au cours de son histoire, et ces transformations ont le plus souvent été liées à une volonté de s'adapter à l'évolution de l'esthétique et des langages musicaux. La première section du chapitre consistera donc en un survol de l'histoire de la flûte traversière, de la Renaissance à aujourd'hui, afin de

savoir d'où elle vient et d'avoir une meilleure idée de l'instrument qui se trouve entre les mains des flûtistes d'aujourd'hui.

Si nous nous attardons à l'instrument, il sera également nécessaire de considérer le bagage de l'instrumentiste qui l'utilise dans sa pratique musicale. La plupart de ces musiciens et musiciennes auront acquis leur savoir-faire dans un conservatoire, une université ou une école de musique supérieure. Afin de bien situer les pratiques actuelles en lien avec la flûte traversière, nous devrons explorer les éléments qui ont été et qui sont encore considérés comme étant importants par les pédagogues d'hier et d'aujourd'hui. Quelles sont les exigences du monde musical dans lequel les instrumentistes évoluent ? Et comment se définit l'esthétique sonore et musicale qui est transmise par l'enseignement dans la tradition occidentale savante ? La deuxième section de ce chapitre tentera ainsi de définir ce en quoi consistent la pédagogie et l'esthétique traditionnelles de la flûte de Boehm.

Encore aujourd'hui, être interprète de musique contemporaine signifie passer par une phase d'apprentissage supplémentaire, puisque cette musique demande une expertise particulière qui est enseignée de manière encore marginale dans les programmes réguliers des écoles de musique supérieures, comme en témoigne l'existence de programmes spécialisés tels que ceux offerts par la Internationale Ensemble Modern Akademie à la Hochschule für Musik Frankfurt, par la Kunsthochschule Graz (Performance Practice in Contemporary Music) ou encore par le Conservatoire National Supérieur de Musique et de Danse de Paris (Diplôme d'Artiste spécialisé en répertoire contemporain et création), entre autres.

Les nouvelles techniques de jeu apprises par les interprètes de musique contemporaine sont souvent désignées sous le nom de techniques étendues (une traduction littérale de l'expression anglaise *extended techniques*). Cette appellation vient du fait qu'on les distingue des autres techniques de jeu qui sont utilisées dans le reste du répertoire et qui sont apprises par les instrumentistes lors de leur formation régulière. À partir des notions pédagogiques et esthétiques abordées dans la section précédente, nous proposerons dans la troisième section du chapitre une définition du concept de technique étendue, et nous verrons finalement dans la quatrième section comment elles ont successivement été intégrées à la pratique musicale, et quelles fonctions elles ont occupé dans l'émancipation des langages musicaux dans lesquels elles ont été utilisées.

Champs d'expertise

- Organologie et facture instrumentale
- Esthétique musicale et sonore
- Technique instrumentale et geste musicien
- Musicologie de l'interprétation et *performance practice*

2 Historique de la flûte traversière

2.1 De la Renaissance au début du XVIII^e siècle

En Occident, le premier traité instrumental qui mentionne l'existence d'une flûte traversière (ou *Zwerchpfeiff*) est celui de Sebastian Virdung (*Musica getutscht*, 1511¹). C'est à partir de la Renaissance, avec l'émancipation de la musique instrumentale par rapport à la musique vocale, qu'on voit apparaître des familles de flûtes traversières de différentes grandeurs, comme en témoignent les traités de Martin Agricola (*Musica instrumentalis deudsche*, 1529) et de Michael Praetorius (*Syntagma Musicum*, 1619-20) (Toff 1986, p. 11-13). La perce cylindrique de ces flûtes, qui limite leur registre en rendant le jeu à l'octave supérieure plus difficile, ainsi qu'une certaine volonté de calquer les registres des flûtes sur ceux des voix constituant habituellement un ensemble vocal (soprano, alto, ténor, basse) expliquent l'existence de ces flûtes de tailles différentes.

En 1637, dans son *Harmonie universelle*, Marin Mersenne donne des explications détaillées sur la facture, la tessiture et le jeu d'un instrument qu'il appelle *Fluste d'Allemand* et dont la description correspond à une flûte traversière à six trous qui « est percée d'une égale grosseur tout au long » et dont le registre couvre une dix-neuvième (Mersenne 1637, Partie II, Livre 5, p. 241-242). En ce qui concerne la sonorité, Mersenne donne la possibilité au joueur de flûte allemande ou de fifre de s'inspirer de l'orgue :

il est certain que l'on peut [ajuster] le jeu des Fifres à l'Orgue, afin de l'enrichir d'une nouvelle grace, mais il n'est pas possible de suppleer les gentillesses de la bouche, de la langue, & des levres avec les soufflets ordinaires de l'Orgue : [j']ai dit *Ordinaires*, parce

¹Le titre complet de l'ouvrage s'énonce comme suit : « *Musica getutscht und außgezogen durch Sebastianus Virdung, Priester von Amberg verdruckt, um alles Gesang aus den Noten in die Tabulaturen dieser benannten dreye Instrumente der orgeln, der Lauten und der Flöten transferieren zu lernen kürzlich gemacht.* »

que l'on y peut [ajouter] des ressorts qui serviront pour donner quelque nouvelle vigueur, ou douceur aux sons (Mersenne 1637, p. 243).

Jusqu'à la fin du XVII^e siècle, deux raisons expliquent le peu d'occurrences de pièces où on fait mention de la flûte traversière : l'emploi plus courant de la flûte à bec dans les ensembles instrumentaux et le peu d'indications strictes quant à l'instrumentation dans les partitions de l'époque. Toutefois, au moins à partir des années 1680, l'orchestre de Jean-Baptiste Lully compte à son effectif un certain nombre de musiciens pratiquant cet instrument ; dans le *Prélude pour l'amour* de l'opéra *Le Triomphe de l'Amour*, le compositeur recommande l'usage de deux *Flutes d'Allemagne*. De plus, un registre des musiciens de la ville de Paris datant de 1692 recense au moins une douzaine de facteurs et d'instrumentistes pratiquant la flûte traversière (Powell 2002, p. 65, 67). Pierre Naust, Jean-Jacques Rippert et Martin Hotteterre (France) ainsi que Jacob Denner (Allemagne) comptent parmi les facteurs de flûtes les plus connus de cette époque.

Les flûtes de la fin du XVII^e siècle et du début du XVIII^e siècle, dont le modèle le plus représentatif est celui de la famille Hotteterre, se démarquent des instruments plus anciens (les fifres et les flûtes de la Renaissance) par leur perce conique (s'aminçissant à mesure que l'on passe de la tête au pied de la flûte) et par la présence d'une clé de *ré dièse/mi bémol* bouchant un septième trou se situant près de l'extrémité du pied. La perce conique produit un timbre moins bruité et criard par rapport à celui obtenu dans l'aigu avec des flûtes à perce cylindrique ; leurs partiels aigus sont plus purs. Elle permet, en plus de cette amélioration du timbre, de rapprocher les trous, d'en rapetisser l'ouverture et ainsi, d'augmenter l'ergonomie de l'instrument (Toff 1986, p. 16). Ces flûtes se présentent en trois parties : une tête assez longue, un corps central en une seule partie et un pied.

Au XVIII^e siècle, les pièces pour instruments à vent solo et pour petits ensembles connaissent un essor sans précédent grâce à la virtuosité croissante des musiciens de l'époque, qui sont bien souvent à la fois instrumentistes et compositeurs. Michel de La Barre (1675-1745) publie en 1702 ses *Pièces pour la flûte traversière* (à notre connaissance, la première œuvre pour flûte traversière solo – dont l'instrumentation est spécifiée – à être publiée) (Powell 2002, p. 71), et en 1707, Jacques Martin Hotteterre fait paraître son traité, intitulé *Principes de la Flûte traversière, ou flûte d'Allemagne ; de la flute à bec, ou flute douce ; et du haut-bois*. Il s'agit du premier ouvrage

pédagogique destiné à la flûte traversière, qui comprend neuf chapitres traitant spécifiquement de cet instrument. Il y est question de la posture du flûtiste, de son embouchure, des tonalités et cadences, des altérations (dièses et bémols), de l'articulation et de l'ornementation (Hotteterre 1982, p. 44). La première moitié du XVIII^e siècle compte notamment parmi ses virtuoses Michel Blavet (1700-1768), dont on dit qu'il possérait « *[l']embouchure la plus nette, les sons les mieux filés, une vivacité qui tient du prodige, un égal succès dans le tendre, dans le voluptueux, & dans les passages les plus difficiles* (d'Aquin 2005, p. 150) », ainsi que Jacques-Christophe Naudot (1690-1762) et Pierre-Gabriel Buffardin (1689-1768).

2.2 Le XVIII^e siècle : l'âge d'or de la flûte baroque

Vers les années 1720, la facture de la flûte traversière subit quelques changements, en raison d'une popularité grandissante qu'elle doit à ses grands solistes. Les modèles de cette époque comprennent quatre parties : le corps central est divisé en deux parties distinctes de manière à permettre l'usage d'un ou plusieurs (jusqu'à sept) corps supérieurs de rechange (Toff 1986, p. 20) de longueurs différentes. Ce dispositif rendant possible le jeu à différents diapasons, il est très apprécié des virtuoses qui sont invités à jouer dans plusieurs villes et pays, le diapason variant d'un endroit à l'autre. À partir des années 1730-1740, les flûtes traversières sont presque toutes dotées de plusieurs corps de rechange (Powell 2002, p. 87). Ces flûtes en quatre parties comprennent une tête dans laquelle se trouve un bouchon de liège dévissable, dont la position variable permet l'ajustement des partiels entre eux, une opération rendue nécessaire par l'usage des corps de rechange. Toutefois, ce système n'était pas suffisant pour compenser les problèmes d'intonation dus aux variations de longueur de l'instrument. Le pied télescopique en deux parties, dont l'invention est attribuée à Pierre-Gabriel Buffardin par Anton Mahaut (*Nieuwe Manier*, 1759), consiste en une extension coulissante de 15 millimètres à l'extrémité de l'instrument et permet de résoudre ce problème d'intonation (Toff 1986, p. 21).

De la génération suivante, Johann Joachim Quantz (1697-1773) a eu une influence considérable sur le développement de la flûte traversière, comme interprète, compositeur et facteur. Élève de Buffardin en 1719 alors que celui-ci était le premier flûtiste de la *Hofkapelle* de Dresden, il se joint à cet orchestre en 1727, puis il est employé en 1740 par Frédéric II de Prusse comme

flûtiste, enseignant et compositeur. Le soutien du monarque, un passionné de la flûte qui offre à son flûtiste principal un salaire fort enviable de 2000 *thalers* par an, lui permet de constituer un catalogue de 153 sonates et 296 concertos pour flûte. On doit aussi à Quantz l'invention d'une clé de *ré#*, distincte de la clé de *mi b* (vers 1726), conçue pour permettre un ajustement plus fin de l'intonation dans les tonalités en dièses (à une époque où les instruments n'étaient pas encore accordés selon le tempérament égal), ainsi que d'une tête de flûte à tuyau coulissant, servant d'alternative au pied télescopique pour accorder l'instrument à différents diapasons (Powell 2002, p. 91-98). En 1752, Johann Joachim Quantz fera paraître un traité complet sur l'art de jouer de la flûte traversière (Quantz 1752, *Versuch einer Anweisung, die Flöte traversière zu spielen*²). On le considère comme le fondateur de la première école européenne de flûte traversière, et son influence est encore nettement présente chez les flûtistes de l'école allemande du début du XX^e siècle (Powell 2002, p. 103).

2.3 La flûte classique

Lors de la seconde moitié du XVIII^e siècle, le genre symphonique se développe, et le jeu en ensemble – pratiqué généralement dans de plus grandes salles – favorise une extension du registre instrumental et la mise au point d'instruments capables d'une projection sonore accrue. À partir de l'époque de la publication du traité de Quantz, on fabrique des flûtes en choisissant des essences de bois plus dures, comme l'ébène ou le bois de grenadille. Le trou de l'embouchure est généralement ovale (au lieu d'être rond) et plus grand que sur les flûtes des décennies précédentes. De plus, l'épaisseur du tuyau augmente et la perce devient plus étroite et plus conique, de manière à favoriser les aigus et à obtenir un registre grave plus timbré (Allain-Dupré 2004, p. 36 ; Powell 2002, p. 113).

C'est à partir des années 1750 que l'on dote les flûtes traversières de trois clés supplémentaires (la clé de *fa* bémol, activée par le majeur de la main droite ; la clé de *si* bémol, activée par le pouce gauche, et la clé de *sol* dièse, activée par l'auriculaire gauche). Le premier à le faire est August Grenser (1720-1807) en 1744 (Powell 2002, p. 122), qui sera suivi de près par plusieurs facteurs anglais : Pietro Florio (env. 1730-1795), Caleb Gedney (1754-1769) et Richard Potter (1728-1806) (Toff 1986, p. 25). Contrairement à la croyance, les clés ne semblent pas avoir été

²La version à laquelle on fait référence dans cette thèse est une réimpression de l'édition berlinoise de l'ouvrage original.

ajoutées afin de permettre un jeu plus fluide et mécaniquement plus aisé, mais avant tout afin de diminuer l'usage des doigtés de fourche, avec lesquels le flûtiste obtient presque toujours une sonorité plus pauvre en harmoniques, comme l'explique Ardal Powell :

En dépit des affirmations que l'on retrouve dans les écrits modernes, les nouvelles clés ne rendaient pas le jeu plus facile, plus rapide ou plus agile, et ne permettaient pas non plus une meilleure intonation des flûtes. Leur fonction était plutôt, comme les auteurs contemporains l'ont expliqué, de fournir une alternative aux notes plus voilées de la flûte au début de la première octave, permettant ainsi l'obtention de timbres plus coupants et pénétrants dans cette partie du registre de la flûte, pour lesquelles il était plus difficile d'obtenir une projection sonore dans de grandes salles ou dans des ensembles avec instruments à cordes. Les nouvelles flûtes à clés ont permis pour la première fois à chacun des demi-tons de l'instrument, à l'exception du *do*, d'avoir leur propre trou d'intonation³ (Powell 2002, p. 111).

Dans le même ordre d'idées, la clé de *do* bécarré, bouchant également un trou supplémentaire, est ajoutée par le Dr. J. H. Ribock (1743-1785) sur un de ses modèles (Toff 1986, p. 27). Toutefois, l'invention d'une seconde clé de *fa* bécarré par Johann George Tromlitz (1725-1805) en 1786 vise bel et bien à faciliter le jeu instrumental : la clé, près de l'auriculaire gauche, active un mécanisme de levier et permet de déboucher le trou bouché par le tampon de l'autre clé de *fa* bécarré (celle qui est activée par un mouvement du majeur droit). Cette clé permet d'éviter l'usage du majeur de la main droite, qui rendait jusque là certains enchaînements de notes plutôt malaisés (Toff 1986, p. 30). Enfin, pour élargir le registre instrumental, c'est également en 1786 que Heinrich Grenser (1764-1813) allonge le pied de son modèle de flûte traversière pour lui ajouter deux clés, ce qui étend le registre grave au *do* dièse et au *do* bécarré (Powell 2002, p. 123). Dès lors, les flûtes traversières, telles que celles de Rudall & Rose (Angleterre) (Toff 1986, p. 28), de Wilhelm Liebel (1799-1871) (Allain-Dupré 2004, p. 36) et de Heinrich Friedrich Meyer (1814-1897), seront dotées de cette extension ainsi que d'un total de huit ou neuf clés.

Le développement technologique de la flûte traversière, à la fin du XVIII^e siècle et au début du XIX^e, favorise donc le jeu virtuose par l'acquisition d'un registre plus homogène et étendu ainsi que d'une sonorité plus puissante, surtout dans le registre grave. La technique

³Citation originale : « Despite the assertions to be found in modern writings, the new keys did not make playing easier, faster, or more agile, nor did they make the flutes better in tune. Rather their purpose, as contemporary writers explained it, was to provide an alternative to the flute's more veiled notes at the bottom of the first octave, permitting a more cutting and penetrating tone in that part of the flute's range that carries the least well in large performance spaces or in ensembles with strings. The new keyed flutes gave each of the semitones of the octave except C its own tonehole for the first time. »

instrumentale évolue en conséquence, et plusieurs grands solistes se démarquent et mènent une carrière internationale. Parmi ceux-ci, on compte Andrew Ashe (env. 1758-1838), Friedrich Ludwig Dülön (1769-1826), Anton Bernhard Fürstenau (1792-1852), Louis Drouet (1792-1873) et Jean-Louis Tulou (1786-1865).

2.4 Theobald Boehm et la flûte traversière moderne

2.4.1 Les prototypes de 1831 et 1832

C'est à Theobald Boehm (1794-1881) que l'on doit les changements les plus importants dans la facture de la flûte traversière. Étant lui-même un excellent flûtiste, il présente en 1831 plusieurs concerts à Londres, et c'est là qu'il a l'occasion d'entendre jouer le virtuose Charles Nicholson. Boehm est frappé par la capacité de projection exceptionnelle du flûtiste anglais (Toff 1986, p. 43). Nicholson joue sur une flûte dont les trous sont plus grands que ceux des instruments auxquels sont habitués les flûtistes allemands ; cette caractéristique lui permet ainsi d'obtenir un plus grand rayonnement sonore.

En partant du modèle de la flûte classique à huit clés en usage un peu partout en Europe à cette époque, Theobald Boehm conçoit alors un premier prototype d'instrument en bois, à perce conique, mais dont les trous sont plus grands et plus espacés. Ce modèle est aussi doté d'une clé à anneau permettant de boucher deux trous à la fois, dont un trou supplémentaire conçu pour obtenir la note *fa* sans doigté de fourche, par un mouvement de l'index droit (Toff 1986, p. 55). Le modèle n'est toutefois pas breveté, parce que Boehm considérait que les altérations au modèle alors en usage étaient encore trop minimes. Dans le prospectus présentant le prototype, qui est fabriqué chez Gerock and Wolf à Londres, on vante la fermeté, l'égalité et la richesse du timbre de cet instrument, mais aussi la simplicité de son mécanisme et de son système de doigtés : « *FERMETÉ, ÉGALITÉ, et RICHESSE de la sonorité, telles qu'elles n'ont encore jamais été réunies dans la description d'une flûte. SIMPLICITÉ du mécanisme en ce qui a trait aux DOIGTÉS*⁴ (Toff 1986, p. 53) ».

En 1832, après la mise au point de ce premier prototype, Boehm poursuit ses recherches et conçoit un nouveau modèle dans son atelier de Munich. L'instrument est doté de deux clés de trille

⁴Citation originale : « *FIRMNESS, EQUALITY, and RICHNESS of tone, which have never been altogether combined in any description of Flute. SIMPLICITY of mechanism as regards the FINGERING.* »

accessibles à la main droite : la première active la clé de *do* bémol et permet de jouer facilement un trille *do-ré*, alors que la seconde facilite le trille *do#-ré* en activant une clé située près du milieu du tube. De plus, Boehm élimine l'usage du tube coulissant pour l'accord, normalement situé entre la tête et le corps de la flûte, pour le remplacer par des anneaux d'argent judicieusement placés qui bouchent les interstices entre les deux parties, aux endroits appropriés. Ce changement permet d'atténuer la dureté du son qui est due à la présence du métal à l'intérieur du tube en bois.

Si la flûte est toujours en bois – Boehm privilégiant le bois de grenadille pour sa dureté et sa stabilité – et la perce encore conique, les proportions de l'instrument sont révisées : la distance entre les trous augmente de manière à pouvoir les placer à leur emplacement optimal du point de vue acoustique et ainsi, obtenir un rayonnement sonore maximal ainsi que la meilleure intonation possible. Cette modification amène Boehm à modifier considérablement le mécanisme de l'instrument et à concevoir un nouveau système de doigtés. Bien que ce changement de facture permette d'obtenir une flûte beaucoup plus ergonomique, qui évite d'avoir à modifier la position des doigts (à l'exception de celle de l'auriculaire de la main droite, qui doit activer les trois clés à l'extrémité de la flûte), il est en fait trop radical et constitue un handicap qui en freinera la vente de ce nouvel instrument (Toff 1986, p. 55-59).

Le modèle est présenté le 1^{er} novembre 1832 et le 25 avril 1833 à Munich (Toff 1986, p. 60), à Londres ainsi qu'à Paris, à l'Académie des Sciences, en 1837. L'instrument est assez bien accueilli à Londres : Cornelius Ward, William Card et John Clinton, interprètes et enseignants réputés, l'adopteront. Les flûtistes français Paul Hippolyte Camus et Louis Dorus en feront aussi la promotion dans les années suivantes, tout comme Victor Coche, alors assistant de Jean-Louis Tulou, professeur au Conservatoire de Paris. Si Tulou, tout comme Anton-Bernhard Fürstenau, critiquent l'instrument pour sa sonorité trop directe et dure, son caractère excessivement brillant et monotone ainsi que pour son manque de personnalité (l'égalité du timbre et de l'intonation résultant en une perte de caractère, selon ceux-ci), Coche prend parti pour le nouveau modèle et rédige une méthode pour l'enseignement de la technique qui lui est associée⁵.

⁵COCHE, Victor, *Méthode pour servir à l'enseignement de la nouvelle Flûte Inventée par Gordon, modifiée par Boehm et perfectionnée par V. Coche et Buffet, Jne.*, Paris : Schonenberger, 1838 ; cité dans Powell 2002, p. 317. Il est à noter que le modèle du premier prototype de flûte présenté par Theobald Boehm en 1832 a été au cœur d'une controverse. Alors que Christopher Welch en attribue l'invention à Boehm dans son ouvrage *History of the Boehm flute* (1883), son rival Richard S. Rockstro l'attribue plutôt à William Gordon dans *A treatise on the flute* (1890). Gordon était un militaire suisse d'origine écossaise, passionné de flûte, qui a lui aussi présenté un modèle de flûte innovateur à Munich en 1833. Toutefois, il semble avoir eu moins de succès que Boehm et on rapporte qu'à la suite d'une série de déconvenues, il a été atteint de maladie mentale vers 1836 et ce, jusqu'à la fin de sa vie. C'est lors des années suivant leur rencontre que Boehm a intégré certaines des innovations de

L'invention vaut à Theobald Boehm et à Rodolphe Greve, qui l'assiste dans la fabrication, la reconnaissance de la communauté scientifique (médailles aux expositions industrielles de Munich en 1834 et 1835, à Nuremberg en 1840, notamment). L'instrument, fabriqué à Paris par les facteurs Godfroy et Lot, est adopté par le Conservatoire de Bruxelles en 1842 et en Angleterre, et les facteurs Rudall & Rose en assureront la production à partir de 1843 (Powell 2002, p. 158-159). Toutefois, en raison de son timbre radicalement différent et de son système de doigtés alternatif, que les interprètes sont réticents à adopter, l'utilisation de cet instrument demeurera marginale.

2.4.2 L'invention de la flûte moderne en 1847

Lors des années suivantes, déterminé à mettre au point un modèle de flûte traversière aux propriétés acoustiques optimales, Theobald Boehm se met à l'étude de la physique et de l'acoustique auprès de Carl von Schafhärtl, à l'Université de Munich. Bien que ses notions d'acoustique nouvellement acquises lui permettent de calculer avec précision la position des trous sur le tube, Boehm expérimente avec un tuyau de métal (plus stable que le bois) doté de trous amovibles qu'il a lui-même mis au point, ce qui lui permet de trouver la meilleure disposition par essais et erreurs et de confirmer les résultats de ses calculs (Powell 2002, p. 180-181). Son objectif est de fabriquer un instrument dont l'homogénéité de la sonorité sera maximale et dont l'intonation sera aussi pure que possible, ce qui implique de revoir complètement la perce des trous, tel qu'il l'expliquera plus tard, en 1871, dans son ouvrage *Die Flöte und das Flötenspiel* :

toutes mes tentatives d'obtenir une homogénéité sonore et une intonation pure sont restées vaines, tant et aussi longtemps que le même placement des doigts sur les trous percés demeurait en usage. Ces trous se devaient d'être d'une dimension appropriée et d'être percés à l'endroit optimal selon l'acoustique, ce qui impliquait l'usage d'un système de doigtés complètement nouveau⁶ (Boehm 1871, p. 1).

Ce qu'il recherche, en fait, est un instrument dont la gamme se rapproche le plus possible du tempérament égal et qui consiste en une échelle de douze demi-tons égaux, tant en rapports de fréquences que d'intensité sonore. Boehm insiste sur la nécessité de percer le tuyau de gros trous aussi rapprochés que possible et dont le diamètre est au moins égal aux trois quarts du diamètre

Gordon à son propre modèle d'instrument, probablement à la suite d'une collaboration avec celui-ci. À ce sujet, voir l'article « Captain Gordon, the flute maker », de Percival R. Kirby (1957).

⁶Citation originale : « alle meine Bemühungen, Gleichheit der Töne und Reinheit der Stimmung herzustellen, waren erfolglos, so lange die Spannweite der Finger zur Einbohrung der Tonlöcher massgebend blieb. Diese mussten in entsprechender Grösse auf ihre akustisch richtigen Stand-Puncte gebracht, und sodann ein ganz neues Griffsystem geschaffen werden ».

du tuyau. Cette caractéristique dote la flûte de certaines propriétés : les grands trous permettent d'atteindre un rayonnement acoustique maximal et un son aussi plein que possible, ainsi que d'éviter de perturber l'établissement des ondes stationnaires et donc, des résonances multiples, ce qui résulte en une sonorité plus riche en harmoniques et nécessairement plus brillante. De plus, la perce de trous à grands diamètres permet d'améliorer l'intonation des notes de la troisième octave (Boehm 1871, p. 3-5).

Quant au matériel de fabrication, Boehm privilégie cette fois l'argent, dont les degrés de densité et de dureté sont idéaux pour obtenir un son aussi clair et fort que possible. Il explique avoir réfléchi au fait que les facteurs de flûtes ont testé plusieurs matériaux, jusqu'à constater qu'ils étaient toujours attirés par les essences de bois les plus dures ; ce qui l'a mené à utiliser l'argent pour ses propriétés particulières :

La dureté et la fragilité plus ou moins grande du matériau est ce qui a le plus d'influence sur le timbre et la qualité du son. À ce propos, plusieurs expériences ont été menées, puisqu'on a par le passé fabriqué des flûtes à partir de plusieurs essences de bois, en ivoire, en cristal, en porcelaine, en caoutchouc, en papier mâché et même en cire et qu'on a obtenu, de manière compréhensible, des résultats fort variables. Tous les essais de ce genre ont mené à l'utilisation d'essences de bois très dures, ce qui m'a amené à fabriquer des flûtes en argent et en maillechort[.][...] Les flûtes en argent sont de toute façon, en raison de la grande capacité de modulation de leur timbre clair et sonore, les plus appropriées pour jouer dans de très grandes pièces⁷ (Boehm 1871, p. 9).

Selon ses calculs, la flûte doit faire 606 millimètres de longueur et avoir un tube de 20 millimètres de diamètre (dimension qui sera réduite à 19 millimètres de manière à faciliter l'émission des notes de la troisième octave). Le bouchon de liège présent dans la tête de la flûte doit, quant à lui, se trouver à 17 millimètres de l'embouchure (Boehm 1871, p. 2). Le diapason est calculé au *la* 435 Hertz selon l'usage à l'époque et le corps de la flûte est cylindrique, de manière à augmenter le volume d'air mis en vibration à l'intérieur du tube de l'instrument (Toff 1986, p. 67). Les nouvelles dimensions de l'instrument ainsi que la perce particulière des trous entraînent la conception d'un nouveau système de doigtés se voulant aussi ergonomique que possible pour le flûtiste : « *Après avoir terminé de fabriquer le tuyau de la flûte, on a dû trouver un système de*

⁷Citation originale : « Auf die Klangfarbe oder Qualität der Töne hingegen hat die grössere oder geringere Härte und Sprödigkeit des Materials den meisten Einfluss. Hierüber sind viele Erfahrungen vorhanden, da man früherhin aus verschiedenen Holzarten, aus Elfenbein, Krystallglas, Porzellain, Kautschuk, Papier-maché, ja sogar aus Wachs Flöten gemacht hat und begreiflicher Weise hierdurch die verschiedenartigsten Resultate erzielte. Alle derartigen Versuche führten jedoch immer wieder auf die Verwendung sehr harter Holzarten zurück, bis es mir gelang, aus Silber und Neusilber Flöten zu ververtigen[.][...] Die Silberflöten sind jedenfalls wegen der grossen Modulationsfähigkeit ihrer äusserst hellklingenden und sonoren Töne vorzüglich zum Spiele in sehr grossen Räumen geeignet ».

*doigtés permettant de jouer de manière propre, sûre et aussi confortable que possible toutes les gammes, tous les passages et les trilles dans les 24 tonalités existantes*⁸ (Boehm 1871, p. 10).

Theobald Boehm obtient un premier brevet pour sa flûte à Paris, le 27 juillet 1847 et en cède les droits aux facteurs Godfroy et Lot ; en Angleterre, ce sont Rudall et Rose qui distribueront le modèle (Powell 2002, p. 183). En Allemagne, là où les flûtistes œuvrent plus souvent dans les orchestres qu'en tant que solistes, la flûte en bois à perce conique reste toutefois privilégiée ; on préfère la tendreté de son timbre à la brillance de la flûte de Boehm. L'instrument met plusieurs années avant d'être popularisé : son mécanisme particulier décourage les flûtistes dont la carrière est bien établie, et qui n'ont pas envie de réapprendre un ensemble de nouveaux doigtés. Plusieurs de ces instrumentistes laisseront d'ailleurs progressivement leur place à la jeune génération, qui est plus encline à apprendre la technique associée à la nouvelle flûte de Boehm.

2.4.3 L'adoption de la flûte de Boehm comme modèle standard

En Allemagne et en Autriche, plusieurs flûtistes adoptent ainsi la flûte de Boehm, mais on la considère encore comme inappropriée pour l'orchestre en raison de son timbre extrêmement clair, voire métallique, qui offre un trop grand contraste avec celui des autres instruments de la famille des bois. On lui préfère un modèle de flûte en bois à perce conique, comme la flûte fabriquée à Hannover par la firme de Heinrich Friedrich Meyer (1814-1897) à partir de 1848 (Wilson (s.d.) [site web]) et, plus tard, la flûte Schwedler-Kruspe Reform, mise au point en 1898. Les améliorations apportées à ce dernier modèle permettent notamment d'obtenir un timbre riche et fort dans le registre grave (en accord avec l'esthétique de l'école allemande de flûte faisant autorité depuis l'époque de Quantz) et de jouer avec plus de contrôle dans le registre aigu, ce qui est fort utile lors de l'exécution de symphonies du répertoire romantique (Powell 2002, p. 195, 198-199).

Si la flûte de Boehm est adoptée en France dès les années 1860 grâce à l'influence de Louis Dorus (1812-1896), professeur de flûte au Conservatoire de Paris, des divergences esthétiques freinent encore l'adoption de l'instrument au cours des dernières décennies du XIX^e siècle et jusqu'à la fin de la Première Guerre mondiale par les flûtistes des pays germaniques, d'Angleterre

⁸Citation originale : « Nach dem das Flötenrohr vollendet war, musste ein Griffsystem gefunden werden, nach welchem alle Scalen, Passagen und Triller in allen 24 Tonarten, rein, sicher, und möglichst bequem gespielt werden konnten ».

et d'Amérique. Ceux-ci sont nombreux à faire des commandes spécifiques aux facteurs de flûtes, qui leur fabriquent des modèles hybrides ou personnalisés (Powell 2002, p. 202-204, 214-215). Puis, lors des décennies suivantes, les flûtistes tournent progressivement leur préférence vers le modèle de Boehm. Il est fort possible que la difficulté croissante des œuvres orchestrales (on n'a, par exemple, qu'à penser aux œuvres de Richard Strauss ou d'Igor Stravinsky), l'écriture pour de plus grandes sections à l'orchestre (regroupant parfois jusqu'à cinq flûtistes, avec piccolo(s) et flûte alto) ainsi que l'avènement de l'enregistrement sonore aient influencé le choix de la communauté flûtistique, qui a fini par se tourner définitivement vers le modèle de Boehm au cours du XX^e siècle.

Plus récemment, avec l'évolution et l'éclatement des langages musicaux contemporains, qui ont amené leur lot de défis techniques, certains facteurs et flûtistes se sont démarqués par leurs innovations. Notamment, la facteure néerlandaise Eva Kingma a mis au point un ingénieux système de six clés supplémentaires permettant à l'instrument de jouer une gamme complète en quarts de tons et ce, de manière tout à fait ergonomique, en plus d'augmenter considérablement les possibilités de l'instrument quant au jeu en multiphoniques.

Eva Kingma a aussi amélioré la facture des flûtes graves (alto, basse et contrebasse), ce qui rend ses modèles très populaires auprès des interprètes de musique contemporaine⁹. Par ailleurs, le flûtiste Robert Dick, véritable pionnier de l'instrument, a mis au point le *Glissando Headjoint*, une tête de flûte à double tuyau coulissant doté de deux lanières de métal s'appuyant sur les côtés de la mâchoire inférieure du flûtiste. Cette invention a une fonction équivalente à celle de la *whammy bar* sur la guitare électrique : elle permet d'effectuer des *glissandi* fluides et de modifier le diapason de l'instrument de manière fine et rapide¹⁰.

Cependant, l'usage de ces instruments modifiés, voire augmentés, reste encore relativement marginal en raison de leur distribution encore limitée, de leur coût et du fait que les flûtistes font généralement l'acquisition de leur instrument professionnel avant de faire le choix conscient de dédier leur pratique instrumentale à certains types de musique contemporaine nécessitant l'usage de ces instruments particuliers. Pour cette raison, les prochains chapitres et sections ne traiteront

⁹Pour plus d'informations ainsi que des descriptions détaillées des mécanismes alternatifs dont il est question ici, voir le site web d'Eva Kingma : <http://www.kingmaflutes.com/mySite/index.html> (repéré le 24 juin 2018).

¹⁰On trouvera une description du *Glissando Headjoint* plus étayée ainsi que des liens vers des vidéos de démonstration sur cette page web : <http://robertdick.net/the-glissando-headjoint/> (repéré le 24 juin 2018).

que du modèle d'instrument de loin le plus répandu de nos jours : la flûte de Boehm avec patte de *si* (extension du pied de la flûte permettant de jouer un si grave), conçue pour produire les douze demi-tons de l'échelle tempérée sur un peu plus de trois octaves. L'appellation « flûte » désignera ici autant la flûte traversière de Boehm en *do* que ses parentes : le piccolo ainsi que les flûtes alto, basse et contrebasse.

3 Esthétique et pédagogie traditionnelles de la flûte de Boehm

Afin de pouvoir bien comprendre ce qu'est une technique étendue, il est nécessaire de d'abord définir ce en quoi consiste la base de la technique de la flûte ; autrement dit, de définir ce qui correspond à une technique non étendue, ou ce qui est enseigné à l'ensemble des apprenant.e.s flûtistes. La consultation de plusieurs méthodes d'enseignement de la flûte, rédigées sur une période s'étendant de la seconde moitié du XIX^e siècle (depuis l'invention de la flûte de Boehm) jusqu'à la fin du XX^e siècle, nous fournira des explications pertinentes quant aux exercices donnés aux jeunes flûtistes lors de leur apprentissage. Nous nous intéresserons aussi aux considérations esthétiques qui orientent les pédagogues dans leur description des moyens d'atteindre une maîtrise technique du mécanisme, de produire un vibrato expressif, d'articuler convenablement les notes et surtout, de façonner, après plusieurs années de travail, la sonorité idéale, qui est en quelque sorte la signature de l'artiste. Il s'agira donc, à travers l'examen de la pédagogie traditionnelle, de parvenir à cerner l'esthétique sonore des flûtistes du XX^e et du XXI^e siècles.

3.1 L'enseignement traditionnel de la flûte de Boehm

3.1.1 L'école de flûte française des XIX^e et XX^e siècles

En 1868, au moment où Louis Dorus prend sa retraite du Conservatoire de Paris, c'est Joseph-Henry Altès (1826-1899) qui lui succède au poste de professeur de flûte. Si Dorus a été le premier à amener les élèves du Conservatoire à jouer sur la flûte de Boehm, Altès en fera le standard de l'institution et publiera en 1880 sa *Célèbre méthode de flûte* (Altès 1880), qui fera autorité durant au moins les quarante années suivantes, jusqu'à la publication de la *Méthode complète de flûte* (Taffanel et Gaubert 1923) de Paul Taffanel (1844-1908) et Philippe Gaubert (1879-1941).

La méthode d'Altès est divisée en plusieurs leçons ou études destinées à guider les étudiants

flûtistes jusqu’au statut de professionnels, après quelques années de travail rigoureux et constant. Chaque leçon est destinée à faire travailler l’étudiant.e de manière à lui permettre de venir à bout d’une difficulté particulière ; on cherche ainsi à doter les élèves des capacités techniques dont ils auront besoin pour exécuter correctement les œuvres musicales du répertoire. Un chapitre commence généralement par quelques explications, suivies d’un ou plusieurs exercices de base, puis enfin d’exemples musicaux à travailler, souvent en duo avec le professeur. Les exercices concernant la sonorité et l’expression musicale arrivent à la seconde moitié de l’ouvrage. Après de nombreuses études de mécanisme et d’articulation, Altès écrit enfin que

[I]’étudiant flûtiste qui aura travaillé soigneusement les études complémentaires qui précèdent [...] possédera une bonne technique de doigts, une articulation de la langue précise en simple, double et triple coup de langue et enfin une embouchure bien posée (Altès 1956, p. 320).

C’est donc seulement à ce moment que l’étudiant.e est prêt à accéder à des notions musicales plus avancées et finalement, à passer à l’exécution d’œuvres musicales.

La *Méthode complète de flûte* de Taffanel et Gaubert est basée sur le même modèle d’apprentissage. Elle comprend huit parties : *Notions préliminaires*, *Des signes d’agrément*, *Des coups de langue*, *Grands exercices journaliers de mécanisme*, *24 études progressives dans tous les tons*, *Douze grandes études de virtuosité*, *Du style* et *Traits difficiles tirés d’ouvrages symphoniques et dramatiques* (Taffanel et Gaubert 1923). Les notions préliminaires portent sur la sonorité, l’articulation, le jeu en *legato* et en coulé, la troisième octave, l’ensemble des tonalités majeures et mineures, des altérations, sur la syncope et sur la respiration. Ces notions constituent en quelque sorte la base de l’enseignement, et sont revisitées dans les parties subséquentes de la méthode. La quatrième partie, *Grands exercices journaliers de mécanisme*, est encore enseignée et travaillée par la plupart des flûtistes contemporains. Comme chez Altès, les notions de style d’exécution et d’interprétation ne sont introduites que lorsque l’étudiant.e a acquis une grande maîtrise technique de son instrument. Il convient de souligner la présence d’une section consacrée aux traits difficiles du répertoire orchestral et opératique : en plus de former des flûtistes assez solides pour le métier de soliste, on cherche à préparer les étudiant.e.s au jeu orchestral.

Dans son mémoire traitant de la pédagogie de la flûte, Nicolas Gabaron décrit ainsi le travail étudiant :

Le travail du flûtiste, assez austère, consiste à acquérir les bases techniques nécessaires à la bonne exécution d'une œuvre écrite par un compositeur. Pour cela le flûtiste doit être un technicien spécialisé chevronné, condition *sine qua non* pour accéder au bout de ce chemin initiatique à la perfection de l'exécution. [...] Travailler son instrument demande à l'élève un effort soutenu et quotidien dans des exercices techniques parfaitement écrits pour traiter telle ou telle difficulté. Le but suprême de l'excellence technique chez le flûtiste est de dominer ces difficultés pour pouvoir enfin aborder les œuvres du répertoire (Gabaron 2005, p. 18).

De la génération suivante, Marcel Moyse (1889-1984) continuera à perpétuer ce modèle d'enseignement et contribuera grandement à faire connaître l'école de flûte française dans le monde entier, en raison de son émigration aux États-Unis à la fin des années 1940. Élève de Taffanel et Gaubert ainsi que d'Adolphe Hennebains au Conservatoire de Paris, Marcel Moyse deviendra un pédagogue réputé (professeur au Conservatoire de Paris puis de Genève) ainsi que le premier à véritablement mettre l'accent sur l'acquisition d'une belle sonorité, ce qui deviendra la marque de l'école française du XX^e siècle. S'il ne met pas en doute l'importance des exercices de mécanisme et d'articulation, son enseignement se démarque par la mise au point et la transmission d'outils destinés à doter chaque flûtiste qui s'y consacre d'une sonorité souple et colorée, comme on le verra plus tard. Il publie dans les années 1930 ses *24 Petites Études Mélodiques* (Moyse 1932) et son célèbre *De la sonorité, art et technique* (Moyse 1934), deux ouvrages représentatifs de ce type d'enseignement. À l'instar des *Grands exercices journaliers de mécanisme* (Taffanel et Gaubert 1923) les exercices de sonorité de Marcel Moyse sont encore travaillés par les flûtistes d'aujourd'hui.

Dans les années 1960, René Le Roy (1898-1985), également élève d'Adolphe Hennebains et de Philippe Gaubert, publie son *Traité de la flûte* (Le Roy 1966), qui se démarque quant à lui par une section détaillée sur l'historique de la flûte traversière, par l'introduction de notions d'acoustique musicale ainsi que par la présence d'un chapitre sur la fabrication de la flûte, rédigé par Martial Lefèvre, facteur de flûtes et ex-premier ouvrier de la maison Louis Lot. Le traité comprend quelques exercices, mais insiste sur les explications, qui se veulent aussi objectives et détaillées que possible. L'auteur s'adresse à l'élève autant qu'à l'enseignant et leur fournit également de nombreux exercices de sonorité, d'articulation et de mécanisme.

3.1.2 Les méthodes d'enseignement d'Allemagne et d'Angleterre

En Allemagne, le premier grand pédagogue de la flûte traversière moderne a été son inventeur même, Theobald Boehm. C'est dans *Die Flöte und das Flötenspiel* (Boehm 1871) qu'il explique sa vision de l'enseignement. Son approche, résolument moderne, est assez différente de celle de son contemporain Joseph-Henry Altès. Ses objectifs successifs consistent à atteindre une maîtrise de l'embouchure – permettant l'émission d'un son stable et clair (Boehm 1871, p. 19), puis à maîtriser les difficultés du mécanisme et enfin, à pouvoir jouer de manière expressive. Plutôt que d'indiquer aux flûtistes en apprentissage l'ordre dans lequel ils doivent travailler leurs exercices, Boehm préfère donner des explications écrites et insister sur l'importance d'un travail patient et intelligent afin d'éliminer tout mouvement ou geste inutile, d'éviter l'installation de mauvaises habitudes et d'arriver à une certaine détente dans le jeu. Boehm base ses conceptions musicales sur la pratique opérative : selon lui, les chanteurs et chanteuses sont le meilleur exemple à suivre, et il fournit dans sa méthode plusieurs mélodies et extraits d'œuvres de Mozart et de Schubert (Boehm 1871, p. 21-28).

En raison de l'adoption plus tardive de la flûte de Boehm dans les orchestres de son pays et par les institutions d'enseignement allemandes, les méthodes de flûte subséquentes seront publiées un peu plus tard qu'en France. En 1955, Hans-Peter Schmitz (1916-1995), professeur de flûte d'abord à Detmold puis à Berlin, publie son ouvrage *Flötenlehre* (Schmitz 1955). Riche de son expérience comme flûtiste à l'Orchestre Philharmonique de Berlin, il a également pour objectif, à l'aide de sa méthode, de faire de ses étudiant.e.s des professionnels. À l'instar du *Traité de la flûte* de René Le Roy, l'ouvrage *Flötenlehre* comprend une section historique ainsi que des informations sur l'instrument et sa manipulation, sur la posture du flûtiste et sur les détails de la respiration, de l'embouchure, de l'articulation et du mécanisme. Et tout comme Boehm, il traite de la bonne manière de travailler : l'ouvrage comprend une section intitulée « vom richtigen Üben » (de la façon convenable de travailler). Là où il se distingue, c'est lorsqu'il introduit les notions de *portamento* et de *glissando*, ou encore de coloration du timbre sonore (*Klangfärbung*). Ces notions ne sont pratiquement pas abordées dans les méthodes de flûte françaises ; il se peut que cela reflète des différences entre le langage musical moderne des compositeurs allemands¹¹.

¹¹On pense ici notamment au concept de *Klangfarbenmelodie* du compositeur Arnold Schoenberg.

et celui des compositeurs français.

Dans la même lignée, Martin Gümbel (1923-1986) fera paraître en 1958 son *Lern- und Spielbuch der Flöte* (Gümbel 1958). Les sujets qu'il aborde sont à peu près les mêmes que ceux amenés par Hans-Peter Schmitz ; toutefois, il pose les bases physiques et acoustiques susceptibles d'être utiles aux musiciens et, en particulier, aux flûtistes, et il traite de projection sonore (*Tonumfang*). Le contenu de cet ouvrage est toutefois relativement traditionnel ; cependant, dans les années suivantes, ses activités en tant que compositeur et sa présence aux *Ferienkurse* de Darmstadt influenceront son style pédagogique, et il publiera quelques années plus tard, en 1974, un traité sur les nouvelles techniques de jeu à la flûte, intitulé *Neue Spieltechniken in der Querflöten-Musik nach 1950* (Gümbel 1974). Mais comme on le verra également plus tard, la séparation de la technique de base et des nouvelles techniques reste logique pour Gümbel, qui considère que le débutant.e flûtiste ne doit pas de prime abord inclure la pratique de ces nouvelles techniques à son apprentissage : « *Pour le débutant, le fait de se consacrer à l'apprentissage des techniques dont il est question ici n'a aucun sens. La maîtrise de l'embouchure des sons « normaux » est également une condition préalable à l'apprentissage de ces techniques de jeu, qui s'éloignent considérablement de la production sonore traditionnelle*¹² » (Gümbel 1974, p. 1).

Il est nécessaire, pour terminer, de mentionner l'ouvrage considérable de Trevor Wye, son recueil des cinq *Practice books for the flute* (Wye 1999), consacrés respectivement à la sonorité (*Tone*), au mécanisme (*Technique*), à l'articulation, à l'intonation et au vibrato et, finalement, à la respiration et aux gammes (*Breathing & Scales*). Dans ce recueil d'exercices et de conseils, Wye s'adresse spécifiquement aux étudiants et adopte un ton différent de celui de ses prédécesseurs. Dans la nouvelle édition de 1999, quelque vingt ans après la parution de la première édition en 1980, il explique qu'il a voulu rédiger un livre qui serait facilement compris par tout type de lecteur, et insiste sur le fait que la possession de l'ouvrage n'est pas une garantie de succès (Wye 1999, p. 200). Conséquemment, dès la première page du premier volume, Wye met l'emphase sur une phrase de son professeur, Marcel Moyse :

« *Je n'ai jamais oublié la préface de l'admirable ouvrage De la sonorité de Marcel Moyse,*

¹²Citation originale : « *Für den Anfänger hat die Beschäftigung mit den hier behandelten Spielpraktiken keinen Sinn. Beherrschung des 'Normalton'-Ansatzes ist Voraussetzung auch für solche Techniken, die sich von der traditionellen Tonbildung weit entfernen* ».

dans laquelle celui-ci dit : "C'est une question de temps, de patience et de travail intelligent¹³ » (Wye 1999, p. 5).

La méthode de Trevor Wye n'est pas conçue pour être linéaire, mais se veut être une sorte de boîte à outils dont les différents éléments sont destinés à être travaillés de manière parallèle et ce, sur plusieurs années. D'ailleurs, il publie en 1987 la première édition d'un volume supplémentaire des *Practice books for the flute*, intitulé « *Advanced Practice* ». Ce supplément comprend des explications et des exercices en plus, mais aussi des indications sur la manière d'approfondir le travail déjà amorcé dans les volumes précédents. Dans sa préface, Trevor Wye fait appel au jugement du lecteur et s'adresse à lui en ces termes : « *En grande partie, ceci est la continuation des exercices exposés dans les volumes précédents(.) (...) Prenez-y ce dont vous, ou vos étudiants, avez besoin*¹⁴ (Wye 2000, p. 4) ».

Le contenu des *Practice books* est en bonne partie composé d'éléments nouveaux, notamment en ce qui concerne les explications détaillées portant sur le vibrato, ou encore sur le tempérament égal et l'intonation juste, notions rarement abordées dans les autres ouvrages. On remarque toutefois que Trevor Wye reste fidèle à l'enseignement de ses prédécesseurs, tout en adoptant une approche différente de la leur. Il aborde par exemple les thèmes de la sonorité et de sa flexibilité, passages à travers lesquels on peut reconnaître l'héritage de Marcel Moyse, mais teintés de sa couleur particulière, ainsi que les difficultés de mécanisme à la manière de Taffanel et Gaubert (les exercices des pages 49 à 55 ressemblant beaucoup à ceux proposés par Taffanel et Gaubert¹⁵). Il est à noter que les explications sur l'intonation sont présentées avec celles sur le vibrato, et que la respiration est associée aux gammes, ce qui suggère que ces notions, autrefois indépendantes, doivent être dorénavant associées les unes aux autres lors de la pratique de l'instrument. Toutefois, en dépit de leur approche innovatrice, les *Practice books* s'aventurent peu sur le territoire des nouvelles techniques de jeu, et se consacrent surtout au développement d'une bonne sonorité et d'habiletés concernant le mécanisme, l'articulation et l'expression sonore. L'ouvrage vise ainsi à libérer l'étudiant de ses difficultés techniques, de manière à lui permettre de s'exprimer plus librement.

¹³Citation originale : « *I have never forgotten the preface to Marcel Moyse' admirable De la Sonorité, in which he says, "It is a question of time, patience and intelligent work"* ».

¹⁴Citation originale : »*Much of it is a continuation of the exercises set out in the earlier books[.] [...] Take what you, or your students, need*« .

¹⁵Méthode complète de flûte : Voir le premier des 17 Grands Exercices Journaliers de Mécanisme (Taffanel et Gaubert 1923).

3.2 La sonorité : l'âme du flûtiste

Le travail de la sonorité constitue sans doute l'un des piliers de l'apprentissage d'un instrument de musique dans la tradition classique occidentale. Nous examinerons donc cet aspect en détail avant de nous attarder aux autres aspects de la technique flûtistique, soit le vibrato, l'articulation et le mécanisme.

3.2.1 Une prolongation de la voix humaine chantée

La voix humaine et la flûte ont ceci en commun qu'elles sont toutes deux des instruments à vent faisant appel à l'énergie fournie par le système respiratoire et dont le timbre est affecté par les résonances du conduit vocal. C'est probablement en raison de cette ressemblance que la voix chantée constitue une des principales sources d'inspiration chez les flûtistes. On retrouve cette influence particulièrement chez les représentants de l'école allemande de flûte. Johann Joachim Quantz, par exemple, compare la sonorité idéale à une voix de poitrine de contralto bien contrôlée :

Avant tout, la sonorité (sonus) la plus indiquée sur la flûte est plutôt celle d'une contralto que celle d'une soprano, ou encore celle dont les sons ressemblent le plus à la voix de poitrine chez l'homme. On doit, autant que possible, s'efforcer d'obtenir la sonorité des flûtistes qui savent de quelle manière ils peuvent tirer de la flûte un son clair, coupant, plein, rond, masculin, mais tout de même agréable¹⁶ (Quantz 1752, p. 41).

Bien que son instrument moderne en argent soit radicalement différent de la flûte du XVIII^e siècle, Theobald Boehm semble garder ce même idéal en tête. Et même, selon lui, « *le son de la flûte est la voix sans laquelle il n'est même pas possible de chanter*¹⁷ (Boehm 1871, p. 19). Dans *Die Flöte und das Flötenspiel*, il insiste sur l'importance du modèle proposé par les chanteurs et chanteuses, et base son travail à la flûte sur l'imitation de la technique du chant :

[L'instrumentiste] doit apprendre à chanter sur son instrument ; en effet, c'est seulement avec le chant qu'on réussira, grâce aux mots du texte, à interpréter de manière sûre et juste, parce que c'est cette compréhension qui permettra de concevoir clairement la relation entre les

¹⁶Citation originale : « Überhaupt ist auf der Flöte der Ton (sonus) der allerfälligste, welcher mehr einem Kontrala als Sopran oder denen Tönen, die man bei dem Menschen die Bruststimme nennt, ähnlich ist. Man muß sich, soviel als möglich ist, bemühen, den Ton derjenigen Flötenspieler zu erreichen, welche einen hellen, schneidenden, dicken, runden, männlichen, doch dabei angenehmen Ton aus der Flöte zu ziehen wissen ».

¹⁷Citation originale : « Der Ton ist die Stimme, ohne welche man eben nicht singen kann ».

mots et les sons produits, ainsi qu'avec le ressenti qui leur est associé. (...) On apprendra à travers l'étude d'une bonne musique vocale, à quel endroit et pourquoi une note doit être articulée, ou se fondre à la prochaine; à quel endroit un accent, un *crescendo* ou un *diminuendo* d'intensité sonore sont indiqués, de manière à donner aux mots l'expression voulue, et à quel endroit la déclamation ne doit pas être interrompue par une respiration¹⁸ (Boehm 1871, p. 24).

Si cette idée de la vocalité de la flûte semble avoir été moins véhiculée par les flûtistes représentants de l'école française, le flûtiste américain Robert Dick la reprend dans son ouvrage *Tone development through extended techniques* afin de fournir aux flûtistes des moyens d'améliorer leur sonorité par l'utilisation des résonances du conduit vocal. Il propose notamment un exercice consistant à chanter à l'unisson (ou à l'octave pour les voix plus graves) avec le son de flûte, de manière à mettre les résonances du larynx à contribution, puis un autre qui consiste à associer les changements de registre à des changements de voyelles (Dick 1986, p. 9-13).

3.2.2 Les autres timbres instrumentaux comme sources d'inspiration

La flûte étant autant jouée à l'orchestre et en ensemble instrumental qu'en solo, il est également naturel que ses adeptes s'inspirent des timbres produits par d'autres instruments, en particulier de ceux de la section des bois. Charles Nicholson, célèbre flûtiste anglais du XIX^e siècle, indique qu'on doit chercher à s'inspirer du son des bois : « *La sonorité se doit d'être aussi similaire à celle des instruments à anche que possible, aussi près de celle du hautbois que possible, mais en embrassant la rondeur tendre de la clarinette*¹⁹ ».

Toutefois, Joseph-Henry Altès, auteur en 1880 de la *Célèbre méthode de flûte* qui sera utilisée durant des décennies, n'est pas en faveur de cette approche et privilégie plutôt le développement d'une sonorité qui est propre à la flûte. Le son naturel de l'instrument, bien contrôlé par l'embouchure, est, selon lui, ce qui permet une expression optimale. Pour lui, les changements d'embouchure nécessaires pour modifier suffisamment le timbre de la flûte et lui permettre d'arriver à imiter des instruments comme le hautbois sont trop importants et portent plutôt préjudice

¹⁸Citation originale : « [Der Instrumentalist] muss auf seinem Instrument singen lernen; denn nur im Gesang wird man durch die Worte des Textes sicher auf die richtige Vertragsweise hingeleitet, weil erst mit dem Worte ein deutlicher Begriff der durch die Töne erregten Empfindungen verbunden ist. [...] Es wird durch das Studium guter Gesangsmusik erlernen, wo und warum eine Note angestossen werden muss, oder auf die zunächst folgenden hinüber geschliffen werden darf; wo ein Accent, ein Crescendo oder Diminuendo in der Tonstärke geboten ist, um dem Worte den entsprechenden Ausdruck zu verleihen, und wo ohne Störung der richtigen Declamation Atem geschöpft werden kann ».

¹⁹Citation originale : « *The tone ought to be as reedy as possible, as much like that of the hautboy as you can get it, but embodying the round mellowness of the clarinet.* » NICHOLSON, Charles, *A School for the Flute*, Londres et New York : W. Hall & Son, 1836, p. 5-6; cité dans Powell 2002, p. 134.

à la sonorité de la flûte, spécialement dans le registre grave. En note de bas de page, dans sa *Méthode*, Altès affirme que « *Ce n'est pas pour entendre une mauvaise imitation des sons vibrants du Hautbois, que MEYERBEER a écrit, en employant les sons graves de la Flûte le prélude du songe du Prophète, mais bien pour arriver à un effet de sonorité voilée que la suavité de notre instrument peut seule produire*²⁰ » (Altès 1880, p. 204-205).

Plus récemment, et en raison d'un changement de paradigme, les flûtistes se sont mis à explorer les possibilités de l'instrument quant aux variations de timbre, tout en gardant en tête un certain idéal de sonorité. Dans ses *Practice books for the flute*, Trevor Wye tente de mettre en valeur la grande flexibilité de la flûte et propose des exercices dans le but d'amener l'instrumentiste à acquérir cette habileté et à s'en servir, à la manière d'un artiste visuel :

La flûte est capable de produire une grande variété de sons, plus encore que n'importe quel autre instrument de l'orchestre. La peinture musicale est plus intéressante quand la palette comprend plusieurs couleurs. Ces exercices vont vous aider à jouer en 'technicolor' plutôt qu'en noir et blanc. Jouez ce premier exercice A avec une sonorité pleine, riche, d'un violet foncé. Essayez de ne pas tourner la tête de flûte vers l'intérieur pour obtenir ce son. Il est préférable de jouer cet exercice fort. (...) Maintenant, jouez l'exercice B avec un son creux, 'ouvert', d'un 'jaune' tendre, plus semblable à la couleur de la flûte à bec. Jouez plus doucement que lors de l'exercice A. Lorsque vous changez de A à B, essayez d'obtenir la plus grande *différence* de couleur. C'est la *différence* de sonorité qui est la plus importante²¹ (Wye 1999, p. 24).

Il est aujourd'hui généralement admis que l'habileté à produire différents timbres, ou couleurs sonores, peut servir l'expression musicale et permettre aux flûtistes de varier leur palette de nuances, le timbre se combinant à l'intensité sonore de manière à donner lieu à une variation

²⁰Voir également, aux mêmes pages, les *Exercices pour apprendre à soutenir les sons*. L'indication accompagnant la série d'exercices est la suivante : « *Sans faire aucunes nuances, c'est-à-dire en employant le son naturel* », et l'exercice est accompagné de ces explications : « *Cet exercice a pour but principal de donner au son naturel sa plénitude entière tout en affermissant l'embouchure. Il faut se garder surtout de donner aux sons graves une sonorité qui les éloigne du timbre de la Flûte. J'ai lu dans quelques Méthodes que la beauté de sons graves sur notre instrument consistait à ce qu'ils se rapprochassent des sons du Hautbois ; cette erreur est préjudiciable à deux points de vue : d'abord, en ce que pour obtenir ces sons il faut couvrir à moitié l'embouchure ce qui, en les rapprochant du timbre du Hautbois, les rend maigres, chétifs et par cela, incapables de lutter avec la belle sonorité de cet instrument ; puis, la suavité qui est le caractère dominant de la Flûte disparaît complètement* » (c'est l'auteur qui souligne).

²¹Citation originale : « *The flute is capable of producing a great variety of sounds, more so than any other orchestral instrument. Musical painting is more interesting when the palette has many colours. These exercises will help you to play in 'technicolor' instead of black and white. Play this first exercise A with a full strong, rich, dark 'purple' tone. Try not to turn the head of the flute inwards to do this. It is better to play this exercise loudly. [...] Now play Exercise B with a hollow, 'open', gentle 'yellow' tone, more like the recorder in colour. Play more softly than A. When changing from A to B try to obtain the greatest difference in colour. It is the difference in tone which is the most important* » (c'est l'auteur qui souligne).

plus importante du caractère du son ainsi qu'à une amplification de la sensation associée aux changements de nuances²².

3.2.3 Le timbre idéal : une question d'entraînement et d'équilibre

Si la notion de timbre sonore est largement explorée depuis vingt ou trente ans, les pédagogues de la flûte s'entendent généralement pour affirmer que l'idéal de sonorité est en grande partie lié au fait de trouver la position d'embouchure optimale. Entre autres, il s'agit de trouver un juste milieu entre l'ouverture et la couverture du trou de l'embouchure.

Si celui-ci est trop couvert, le son sera « *trop faible et pas assez clair*²³ », « *petit [...], voilé, trop bas*²⁴ » ainsi que « *fermé, pressé, pas joli et souvent aussi trop bas et riche en bruits parasites, en plus de perdre de sa force de projection*²⁵ ». Par ailleurs, si le trou de l'embouchure est trop découvert, le son sera « *désagréable et boisé*²⁶ » (ou simplement bruité) et « *impur, sans couleur, sans vie*²⁷ ».

Chez les auteurs français, on préconise aussi le fait de pouvoir contrôler sa sonorité grâce aux mouvements appropriés des lèvres et de la mâchoire, qui doivent être dûment entraînés. Ainsi, pour Altès, c'est l'équilibre entre le bon degré d'ouverture de la cavité buccale et celui d'ouverture des lèvres qui permettra d'atteindre le timbre idéal (qui se situe entre être « *métallique et manquant de moelleux* » et « *mat et [manquant] de couleur* » (Altès 1880, p. 320). Pour Marcel Moyse, cependant, ce sont les lèvres qui jouent le rôle principal dans l'acquisition d'une bonne sonorité : « *Le flûtiste doit produire les vibrations de la colonne d'air par le moyen de ses lèvres – forme, souplesse, contrôle.* » Et la beauté de cette sonorité est garante d'une expression musicale réussie : « *Plus un son est beau, plus sa résonnance [...] naturelle [...] peut se développer expressivement. [...] On ne fait pas vibrer artificiellement ce qui ne vibre pas naturellement – On l'agit, c'est tout*²⁸ » (Moyse 1974, p. 15-16).

²²Ces techniques de variation de la couleur timbrale m'ont été enseignées notamment par Robert Langevin (classes de maître au Centre d'arts Orford (Québec), 2005-2006) et Mirjam Nastasi (classes de maître et cours privés, Hochschule für Musik Freiburg (Allemagne), 2007-2009).

²³« *zu schwach und nicht hell genug* » (Quantz 1752, p. 43-44).

²⁴Moyse 1974, p.15.

²⁵« *eng, gepreßt, unschön und meist auch zu tief und nebengeräuschreich wird, verlierter dadurch auch noch stark an Tragfähigkeit* » (Schmitz 1955, p. 55)

²⁶« *unangenehm und hölzern* (Quantz 1752, p. 43-44) ».

²⁷Moyse 1974, p. 15.

²⁸Le texte original contient plusieurs signes de ponctuation et éléments soulignés qui ont été omis ici à des fins de clarté. La citation originale se lit comme suit : « *Plus un son est beau, plus sa résonnance [*naturelle] peut se développer expressivement. *On ne fait pas vibrer artificiellement ce qui ne vibre pas naturellement – On l'agit, c'est tout* ».

En bref, on recherche à obtenir une certaine « *rondeur de son* » ainsi qu'une fluidité dans l'enchaînement des intervalles²⁹; on vise également l'intensité sonore ainsi que l'élimination des bruits parasites³⁰ et une sonorité qui a de la grandeur et qui est susceptible de remplir la pièce, qu'il n'est possible d'atteindre qu'avec un bon soutien du diaphragme³¹. Toutefois, l'amplitude a préséance sur la force, qui « *n'est pas vraiment dans le caractère de la flûte* » (Moyse 1934, p. 23).

3.3 La base de la technique de la flûte

3.3.1 Le vibrato

En ce qui concerne le vibrato, les auteurs font généralement la distinction entre le chevrottement (altération périodique du son obtenue grâce à des contractions des muscles du larynx, qu'on doit chercher à éviter – ce sur quoi s'entendent Schmitz, Gümbel et Wye³²) et le véritable vibrato, qui consiste en une variation périodique de hauteur et d'intensité amenée par un mouvement du diaphragme³³. Le vibrato de diaphragme est censé donner au son de la brillance, de l'intensité et un caractère doux (*Glanz, Intensität und Süßigkeit* – Gümbel 1958, p. 54). Parfois, également, les lèvres participent à la production de l'ondulation sonore, comme dans le cas de Marcel Moyse :

La recherche du timbre, de la couleur, de la vie, l'utilisation dans ce but d'un léger frémissement des lèvres entre elles ; (presque imperceptible vibrato) tous ces moyens relèvent bien plus d'un intelligent empirisme que de règles précises. [...] Le très léger vibrato dont il est question plus haut n'est possible que si les lèvres ont toute leur souplesse (Moyse 1974, p. 15).

Alors que Joseph-Henry Altès, vers la fin du XIX^e siècle, est d'avis que le flûtiste doit d'abord viser la coloration du son sans vibrato (Altès 1956, p. 322) et que Taffanel et Gaubert sont plutôt discrets sur le sujet, Marcel Moyse considère le vibrato comme une part entière de sa sonorité, c'est-à-dire comme un élément insaisissable qui lui rend son côté vivant. Moyse semble dire que le vibrato ne s'enseigne pas vraiment (sans doute parce que lui-même ne l'a probablement jamais

²⁹Moyse 1934, p. 16.

³⁰Citation originale : « *Intensiver, nebengeräuschfreier [Ton]* » (Gümbel 1958, p. 76).

³¹Citation originale : « *Unser Ziel ist aber ein großer, leuchtender, nebengeräuschfreier, saugender und raum füllender Flötenklang, den wir nur mit einer guten Zwerchfellstütze erzielen kann.* » (Schmitz 1955, p. 55).

³²Voir Schmitz 1955, p. 57, Gümbel 1958, p. 55 et Wye 1999, p. 136.

³³Voir Schmitz 1955, p. 57 et Wye 1999, p. 133-134.

appris de ses professeurs), mais s'apprend plutôt par l'imitation de virtuoses célèbres, comme l'explique Ardal Powell :

Loin d'imiter [aveuglément] ses professeurs, il essaya d'imiter le registre de sonorités que d'autres instrumentistes et chanteurs tels que Pablo Casals (violoncelle), Georges Enesco, Jacques Thibaud et Fritz Kreisler (violon), ainsi qu'Enrico Caruso (ténor) étaient arrivés à produire. Tous ces artistes utilisaient un vibrato continu pour produire des timbres dotés de légèreté, de tendresse et de brillance plutôt que d'emphase et de force. Moyse écrira plus tard que ses professeurs et collègues l'avaient mis en garde afin qu'il évite de produire un type de vibrato qu'ils considéraient comme 'excessif', mais lors d'une autre occasion, il prétendit avoir inventé cette technique après lors d'une session d'enregistrement ayant eu lieu auparavant³⁴ (Powell 2002, p. 223).

Toutefois, la pédagogie du vibrato s'est développée, et il est maintenant convenu qu'il s'agit d'une notion qui s'apprend. On l'enseigne généralement avec des exercices visant à contrôler un mouvement périodique du diaphragme et des muscles abdominaux et thoraciques, qui consiste à délicatement prononcer la syllabe « ha », de 4 à 7 fois par secondes (en fonction du caractère et de la vitesse de la musique), sur un son tenu³⁵ (Wye 1999, p. 133-134).

L'articulation

La grande majorité des méthodes pédagogiques destinées aux flûtistes comprennent une section consacrée au travail de l'articulation. En fait, pour la plupart des auteurs, il s'agit d'une priorité. Déjà, dans les traités de Hotteterre et de Quantz, les explications fournies sont très détaillées. Les auteurs du XIX^e et du XX^e siècle ne feront pas exception ; tel que l'explique Nicolas Gabaron,

[...] l'habileté instrumentale est un premier pas vers une excellence instrumentale. Dans l'enseignement de la flûte, cette habileté est non seulement digitale (doigtés spéciaux, etc.) mais aussi relative à la qualité de l'émission du son. La méthode d'Altès et aussi celle de Taffanel constituent de véritables manifestes en faveur de la netteté de l'articulation chère à l'École française de flûte (Gabaron 2005, p. 17).

³⁴Citation originale : « Far from slavishly imitating his teachers, he strove to imitate the range of sonority other instrumentalists and singers such as Pablo Casals (cello), Georges Enesco, Jacques Thibaud, and Fritz Kreisler (violin), and Enrico Caruso (tenor) could achieve. All these artists used a continuous vibrato to produce tones of lightness, sweetness, and brilliance rather than emphasis or strength. Moyse later wrote that his teachers and colleagues warned him to reduce a type of vibrato they considered 'excessive', but on another occasion he claimed to have invented the technique on purpose at an early recording session ».

³⁵Une variante de cet exercice m'a également été enseignée par Jeanne Baxtresser lors d'une classe de maître au Centre d'arts Orford, en juillet 2005.

La conception de l’articulation à la flûte de Boehm est relativement constante selon les auteurs consultés. On s’entend, dans la plupart des cas, pour insister sur la maîtrise du coup de langue simple (parfois aussi appelé « martelé »), du coup de langue double (consistant en l’alternance des consonnes *t* et *k*, ou encore *d* et *g*) et du coup de langue triple (pour les groupes de notes ternaires, on répète les consonnes *t-k-t* ou *d-g-d*). Parfois, il est question de l’adaptation de l’articulation au caractère musical, comme dans le cas des rythmes pointés, du staccato, du louré et du perlé³⁶.

On recherche en général, à travers un travail constant des exercices, la propreté, la rapidité et la précision de l’articulation. Taffanel et Gaubert donnent en exemple « *la netteté et le mordant du staccato des violonistes* » (Taffanel et Gaubert 1923, p. 90-91), alors que Martin Gümbel décrit le coup de langue idéal comme étant une « *attaque nette, mais libre de tout bruit parasite*³⁷ » (Gümbel 1958, p. 98).

3.3.2 Le mécanisme

La « *bonne technique de doigts* » dont parle Altès dans sa *Méthode* semble faire l’unanimité chez les flûtistes. La plupart des ouvrages pédagogiques mentionnés ci-haut comprennent de nombreux exercices de mécanisme. Associés à une pratique de l’articulation, ces exercices visent à venir à bout de toutes les difficultés de la musique tonale. Ils comptent des gammes chromatiques et diatoniques ; des arpèges à trois et quatre sons ; des gammes par tons, en tierces, en quartes, en sixtes, en septièmes et en octaves ; mais aussi des exercices consistant en des associations de notes permettant de travailler les enchaînements de doigtés les plus difficiles. Trevor Wye propose même une série d’exercices appelés « *Machiavellian Exercises* » (Wye 1999, p. 68-71) !

Le travail de ces exercices doit se faire sur une base journalière et les flûtistes y consacrent généralement une bonne partie de leur temps. La régularité est de mise et l’usage du métronome y est fortement suggéré, sinon imposé, afin d’arriver à bien contrôler le mouvement de ses doigts. La sonorité et l’articulation doivent être également soignés, de manière à ce que le travail effectué puisse se refléter lors de l’exécution (ou de l’interprétation) des œuvres musicales. Par ailleurs, le travail des difficultés de mécanisme et d’articulation est souvent poursuivi à travers l’exécution

³⁶Voir notamment la *Méthode complète de flûte* de Taffanel et Gaubert (1923), 3e partie (Des coups de langue), p. 90-91 pour les rythmes pointés, ou la *Célèbre méthode de flûte* d’Altès (1956), p.102-104 pour le staccato et le louré.

³⁷Citation originale : « *[ein] [s]charfer, aber nebengeräuschfreier Stoß* ».

d'études musicales, qui permettent d'intégrer à la pratique une plus grande expressivité par une sorte de mise en contexte musicale.

Après l'examen des méthodes pédagogiques qui ont été publiées depuis l'adoption de la flûte de Boehm, il est intéressant de noter que ce qui est visé est une absence de bruits parasites, tant du point de vue de la sonorité que de celui de l'articulation et du mécanisme. Ces bruits peuvent être entre autres causés par une mauvaise maîtrise de l'embouchure, ou encore par une mauvaise synchronisation entre les doigts, ou entre ceux-ci et l'articulation de la langue, et le mieux serait de les éliminer. On cherche à pouvoir jouer des notes pures, justes, en rythme et à pouvoir les enchaîner de manière homogène. Le travail patient et constant des flûtistes a ainsi pour but d'éviter, en quelque sorte, tout ce qui s'éloigne de cet idéal sonore.

4 Qu'est-ce qu'une technique étendue ?

Bien souvent, les flûtistes qui s'intéressent à l'interprétation de la musique contemporaine doivent effectuer un choix conscient : celui de consacrer une bonne partie de leur temps et de leur énergie à l'apprentissage de nouvelles techniques de jeu. Ils et elles doivent ainsi parfois renoncer à certains aspects d'une pratique plus traditionnelle, pour des raisons esthétiques ou pratiques. Mais en quoi ces techniques de jeu particulières se distinguent-elles de celles enseignées lors de la formation standard de l'instrumentiste ? Et d'où vient cette impression de devoir rompre avec l'esthétique associée au répertoire classique ? Nous tenterons d'abord de donner une définition de ce en quoi consiste une technique étendue, et ensuite, nous proposerons quelques hypothèses susceptibles d'expliquer cette rupture entre tradition et avant-garde.

4.1 Définition du concept de technique étendue

Lors des dernières sections de ce chapitre, nous avons fait un tour d'horizon de ce qu'est la flûte traversière : la manière dont l'instrument que nous connaissons aujourd'hui a été mis au point, son acoustique ainsi que les gestes musicaux qui lui sont associés et enfin, de ce en quoi consiste la technique instrumentale enseignée aux flûtistes depuis la seconde moitié du XIX^e siècle ainsi que l'esthétique sonore qui est véhiculée de professeur à élève.

Comme nous l'avons vu, la flûte en argent conçue par Theobald Boehm a été fabriquée en

vue d’atteindre des objectifs bien précis : une projection sonore optimale, une ergonomie de mouvement pour le musicien ainsi qu’une homogénéité de timbre et d’intensité sonore permettant de jouer de manière aussi égale que possible les douze demi-tons du tempérament égal, sur un peu plus de trois octaves. Dans le même ordre d’idées, la technique instrumentale traditionnelle vise l’obtention d’une sonorité jolie et ample, et la capacité de produire une grande variété de timbres tout en conservant la plus grande homogénéité possible entre les registres ; la production d’un vibrato expressif et souple ; l’atteinte d’une grande habileté de mécanisme pour faire face aux difficultés de la musique tonale, ou du moins, à une musique composée de douze demi-tons logarithmiquement égaux ; et enfin, la capacité d’articuler les notes rapidement, clairement et efficacement.

C’est cette mise en contexte qui nous permet ici de proposer une définition du terme *technique étendue*. Une technique étendue est une pratique instrumentale qui dépasse ou s’éloigne du cadre du jeu traditionnel ou qui entraîne une utilisation de l’instrument autre que celle pour laquelle il a été construit. Ainsi, l’expression *technique étendue* peut désigner tout mode de production autre que celui de l’instrument à vent à anche d’air, tout bris de l’homogénéité du timbre sur le registre de l’instrument, ou encore la production de notes s’écartant du tempérament égal, du mécanisme ou de l’articulation traditionnels. La microtonalité³⁸, les modifications de timbre ou d’intonation susceptibles d’augmenter le rapport bruit/son et les effets percussifs sont des exemples de pratiques correspondant à la définition d’une technique étendue.

4.2 Techniques étendues : rupture entre tradition et avant-garde

Selon Bruno Bartolozzi, compositeur italien et pionnier des nouvelles techniques de jeu pour les instruments à vent, le développement de la technique instrumentale reste très normé et vise toujours cette homogénéité du son dans la monophonie. Dans son essai *New sounds for woodwinds*, il affirme qu’en raison de ces priorités et de la réticence des enseignants à dévier de la technique traditionnelle, les facteurs d’instruments n’ont pas intérêt à créer des instruments différents de ceux conçus pour répondre à cette demande. Les instruments, construits avec le plus de constance possible, ont permis la sélection et la mise en place d’un système de doigtés visant

³⁸Une échelle microtonale consiste en une gamme qui comprend des degrés séparés par des intervalles logarithmiquement plus petits qu’un demi-ton tempéré. Toutefois, dans le contexte présent, le terme « microtonalité » pourrait également s’étendre aux échelles extra-tonales, dont certains degrés ne correspondent pas aux demi-tons de l’échelle tempérée.

l'obtention des sons les plus justes et les plus purs pour chaque note du registre. La standardisation de ce système de doigtés, couplée à des techniques d'embouchure et de respiration également très normées, ont progressivement mené à l'élimination des techniques et des doigtés alternatifs (Bartolozzi 1969, p. 9-10).

Le ton adopté par Bartolozzi dans son introduction est plutôt radical ; il s'exprime du point de vue du compositeur qui s'indigne du fait que la technique instrumentale ne sort jamais de ses standards pour explorer d'autres possibilités. L'ouvrage est maintenant cinquantenaire ; toutefois, dans une mesure certes moins grande, une rupture entre tradition et avant-garde s'observe encore aujourd'hui. Comme on l'a vu et on le verra, plusieurs pratiques instrumentales associées à la musique moderne et contemporaine exigent des instrumentistes qu'ils s'éloignent du jeu pour lesquels ils ont été formés lors de leurs études. Le principe même de technique étendue donne l'impression, à première vue, que leur apprentissage va à l'encontre des habiletés pour lesquelles sont travaillés, sans relâche, une multitude d'exercices de sonorité, d'articulation et de mécanisme. En considérant ce fait, on comprendra un peu mieux la résistance de plusieurs instrumentistes (on ne désigne pas ici que les flûtistes) face à l'apprentissage de nouvelles techniques de jeu : cela pourrait faire craindre à certains de s'éloigner du son idéal et de perdre une partie de la technique instrumentale durement acquise.

De plus, les flûtistes et instrumentistes finissants des institutions d'enseignement supérieur de la musique ou jeunes professionnels doivent faire face à de hautes exigences de performance : nous pensons par exemple aux concours internationaux, aux embûches liées au développement de carrière et à la concurrence élevée pour l'obtention d'un poste dans un orchestre. Même si l'on fait abstraction de l'apparente contradiction entre techniques traditionnelles et étendues, on doit se rendre à l'évidence : la réserve de temps et d'énergie à la disposition des jeunes professionnels de la musique est limitée. Les techniques étendues ainsi que le répertoire qui leur est associé demandent généralement un grand investissement de la part des instrumentistes : leur exécution n'est pas toujours facile – elle représente plus souvent qu'autrement un défi de taille – et les connaissances nécessaires à leur réalisation ne sont pas toujours facilement accessibles. De plus, l'apprentissage et la maîtrise des techniques étendues prend du temps, beaucoup de temps, ne serait-ce que parce qu'elles sont nouvelles pour l'instrumentiste. Bien sûr, ce problème

serait en partie résolu si les techniques étendues étaient davantage enseignées dans le cadre de cursus instrumentaux non spécialisés ; toutefois, l’interprétation d’un répertoire faisant appel à des techniques non conventionnelles nécessite un choix conscient et une gestion des priorités en conséquence de ce choix.

En outre, dans la plupart des situations musicales faisant appel aux notions d’évaluation et de compétition (concours, examens, auditions), on valorise une haute exactitude dans l’exécution des pièces ou des extraits d’œuvres (comme dans le cas des traits d’orchestre). Concrètement, cela désigne une interprétation respectant de manière aussi parfaite que possible ce qui est noté sur la partition, particulièrement en ce qui a trait au rythme, aux hauteurs de notes, à l’intonation, à l’articulation et aux nuances. Par contraste, l’exécution des techniques étendues peut être rebutante, parce qu’elle peut donner lieu à des résultats beaucoup plus imprécis. Les sons obtenus peuvent varier considérablement selon le modèle d’instrument utilisé ou la personne qui joue ; de plus, les paramètres gestuels permettant de couvrir une palette sonore très étendue sont nombreux et souvent, plus difficiles à définir que dans le cas de l’exécution de techniques plus traditionnelles. C’est d’ailleurs une des mises en garde de Bruno Bartolozzi : « *La validité absolue des principes (énoncés dans ce traité) est pratiquement impossible. (...) Dans cette mesure, on obtiendra forcément des résultats variables*³⁹ » (Bartolozzi 1969, p. 58).

Et si le geste instrumental est plus difficile à définir, la transmission du savoir relié à son exécution représente aussi, forcément, un défi. En effet, il n’existe pas toujours de consensus quant à la notation musicale des techniques étendues, et la définition des paramètres sonores sur le support qu’est la partition de musique classique est bien souvent insuffisante. Si l’œuvre faisant appel à une ou plusieurs techniques étendues doit être transmise de manière à ce que le résultat sonore reste fidèle à ce que le compositeur ou la compositrice avait en tête, c’est l’interprète qui crée l’œuvre qui devient le ou la responsable de la transmission des connaissances et des gestes liées à l’exécution authentique de l’œuvre, puisque la partition est inadéquate dans cette situation. Dans un monde où la partition et, par extension, le support écrit ou visuel sont dominants et constituent la preuve de l’existence et de la complétude de l’œuvre d’art (on peut

³⁹Citation originale : « *Eine absolute Gültigkeit dieser Angaben ist praktisch unmöglich. [...] Insofern wird man zwangsläufig unterschiedliche Ergebnisse zu erwarten haben* ».

ainsi démontrer que quelqu'un l'a écrite et peut en revendiquer la propriété⁴⁰), cela peut mener à une dévalorisation des pratiques contemporaines plus difficiles à noter par écrit, puisqu'elles n'ont pas été consacrées et donc, n'existent pas *vraiment*. En bref, c'est la trop grande part d'oralité dans le savoir lié aux techniques étendues qui fait que, bien souvent, on s'en méfie.

4.2.1 Une nouvelle pédagogie des techniques étendues

Heureusement, plusieurs flûtistes formés aux techniques étendues et aux pratiques musicales modernes et contemporaines ont tenté d'amenuiser cette sensation de rupture entre tradition et avant-garde en faisant paraître des ouvrages pédagogiques destinés à intégrer les techniques étendues à l'apprentissage instrumental. Bien sûr, l'acquisition de nouveaux éléments techniques demande une certaine expérience du travail instrumental, et la transmission de ces pratiques instrumentales aux flûtistes plus jeunes ou moins expérimentés demeure un défi. C'est ce que constate Nicolas Gabaron à la lecture de la *Méthode élémentaire de flûte* de Pierre-Yves Artaud, dont la seconde édition publiée en 1992 comprend un chapitre d'introduction aux musiques contemporaines :

Ce qui est frappant c'est la place accordée à ce nouveau chapitre tout à la fin de la méthode. Malgré la présence de séquences ludiques sur l'embouchure seule, le lien n'est pas établi entre les chapitres traditionnels et la musique contemporaine. De surcroît, celle-ci ne peut être que difficile car située au terme de l'ouvrage. C'est un élément psychologique important pour l'élève[.][...] Il est infructueux d'apprendre d'abord tou[s] les modes de jeu au préalable pour jouer après. Mieux vaut se confronter directement au discours musical où l'on apprend les éléments nécessaires à sa bonne réalisation (Gabaron 2005, p. 22).

Dans un article publié en 2009 dans la *Contemporary Music Review*, Pierre-Yves Artaud justifie toutefois cette position en insistant sur l'importance de la maîtrise de la technique instrumentale de base et en allant dans le sens d'une éventuelle remise en question du rôle de l'instrumentiste :

Cette nouvelle virtuosité implique, premièrement et avant tout, un contrôle solide de la technique traditionnelle. Elle l'excède en ceci qu'elle requiert l'assimilation d'environ 140 à 150 nouveaux doigtés en plus des quarante-deux utilisés couramment, de manière à produire des micro-intervalles, des *glissandi* et des multiphoniques. En outre, elle demande une habileté à combiner les attaques, les timbres, les vibratos et les intonations d'une multitude

⁴⁰La musique contemporaine pousse souvent ses acteurs à redéfinir les rôles traditionnels du compositeur et de l'interprète. On accorde à celui-ci (ou celle-ci) une plus grande autonomie et une plus grande responsabilité dans les premiers cycles de vie de l'œuvre ; ainsi, son rôle en création dépasse généralement celui du simple exécutant. Cette émancipation de l'interprète constitue donc une remise en question des modèles établis, ce qui ne convient pas à tous.

de nouvelles manières. En réalité, la question dépasse l'idée d'une nouvelle technique et de sa pédagogie pour aller vers une remise en question complète du concept de l'instrument et de la relation avec la partition ; en bref, de l'état d'esprit de l'instrumentiste⁴¹ (Artaud et Dale 1993, p. 141).

Les approches de Robert Dick et de Wil Offermans vont toutefois dans le sens d'une intégration des techniques de jeu alternatives à l'apprentissage régulier des étudiant.e.s-flûtistes. Dick publie en 1986 un recueil d'exercices et d'explications (*Tone development through extended techniques*) dans lequel il affirme, en quelque sorte, qu'il est possible d'améliorer sa sonorité par le travail des techniques de jeu alternatives et donc, de combler ce fossé entre pratiques traditionnelles et contemporaines. Comme on l'a vu plus tôt, Robert Dick démontre que l'usage de la voix et la production d'un son de flûte en simultané permettent d'optimiser les résonances du larynx et du conduit vocal ; et entre autres, il utilise les harmoniques naturelles et le *bending* (ouverture ou couverture du trou de l'embouchure par une rotation de la flûte sur son axe) comme moyen de rendre la sonorité plus riche et malléable, mais aussi les multiphoniques et *whistle tones* (oscillations de l'air sur le biseau de l'embouchure sans mise en résonance de la colonne d'air) comme exercices de renforcement des muscles de l'embouchure (Dick 1986).

Tone development through extended techniques sera suivi, trois ans plus tard (en 1989), de la seconde édition⁴² de *The Other Flute : A Performance Manual of Contemporary Techniques*, son célèbre traité sur les techniques étendues, encore considéré comme étant l'un des plus complets à ce jour. Robert Dick explique comment il est arrivé, équipé de connaissances de base en acoustique et d'un esprit curieux et aventureux, à rédiger son traité :

Au cours des explorations qui ont mené à l'écriture de mon livre *The Other Flute*, j'ai adopté une approche très méthodique mais totalement empirique. Les présupposés dont je devait me libérer étaient les suivants :

1. La flûte n'a qu'une seule qualité sonore de base, et sa capacité à faire varier son timbre est nettement limitée.
2. La flûte ne peut produire qu'une seule note à la fois.

⁴¹Citation originale : « *The new virtuosity implies first and foremost a firm control of traditional technique. It exceeds this in requiring the assimilation of a further 140-150 fingerings to the forty-two currently in use in order to produce micro-intervals, glissandi and multiphonics. In addition, it demands an ability to combine attacks, timbres, vibratos and intonations in new and infinite ways. In reality the question extends beyond that of a new technique and its pedagogy to a complete reassessment of the concept of the instrument and its relationship with the score, in short, of the state of mind of the instrumentalist* ».

⁴²La première édition de cet ouvrage a été rédigée alors que Robert Dick était étudiant en composition à la Yale University, dans le cadre d'un sujet spécial lors de son *senior year*; elle a été publiée en 1975 (Oxford University Press), soit juste après la publication des ouvrages de Thomas Howell et de Martin Gümbel. Robert Dick le mentionne dans un texte de 1998 intitulé « *Music as a Career* », publié sur la page web de Larry Krantz (Krantz (2007) [site web]).

3. La construction mécanique de la flûte de Boehm ne permet que la production de quelques microtons seulement⁴³ (Dick 2012, p. 15).

C'est donc la remise en question d'idées reçues et l'ouverture d'esprit qui sont à l'origine d'une nouvelle définition de la pratique instrumentale chez Robert Dick, qui ne va toutefois pas à l'encontre de la pratique de modes de jeu plus traditionnels.

De son côté, Wil Offermans publie en 1992 un recueil d'études (Offermans 1992) destiné aux flûtistes désirant se familiariser avec la pratique des techniques étendues. Ses douze études couvrent différents aspects liés à la technique instrumentale contemporaine, et incluent la possibilité d'apprendre la technique de la respiration circulaire (qui permet de souffler sans interruption), et d'expérimenter avec les mouvements corporels autres que ceux liés à la production sonore ainsi qu'avec les partitions graphiques et l'improvisation. Les études sont suivies d'un supplément de 25 pages fournissant des explications sur les aspects abordés précédemment. Ainsi, selon cette approche, les techniques étendues constituent simplement une autre facette de l'apprentissage de la flûte.

5 Historique du développement des techniques étendues

On pourrait penser que les techniques étendues ne sont pratiquées que depuis quelques décennies ; or, même au cours des siècles derniers, elles ont toujours été plus ou moins présentes et ont rempli différentes fonctions au cours de l'histoire de la flûte. Leur rôle s'est généralement défini en fonction de l'esthétique associée à l'instrument : d'abord un moyen d'accroître l'expressivité de la flûte entre les XVI^e et XVIII^e siècles, puis très peu enseignées et mises en pratique au XIX^e siècle, les techniques étendues sont devenues, à partir du XX^e, un moyen d'émancipation de la flûte : par le dépassement de son statut d'instrument monophonique, par l'extension de son registre, par l'exploration d'échelles microtonales et finalement, par une conception différente du son musical. Nous proposons ici un tour d'horizon des changements de paradigmes survenus au cours de l'histoire de l'instrument, dont on retrouve la trace dans les traités instrumentaux et les ouvrages pédagogiques.

⁴³Citation originale : « *In making the explorations that resulted in my book [The Other Flute], I took a very methodical but totally empirical approach. The preconceptions to be shaken free of were : 1-The flute has only one basic tone quality, and its ability to vary that quality is sharply limited. 2-The flute can produce only one note at a time. 3-The mechanical construction of the Boehm flute allows production of only a few microtones ».*

5.1 Les premières techniques étendues : pour une virtuosité et une expressivité accrues

5.1.1 Quarts de tons ou sons enharmoniques

Malgré son absence presque totale dans la musique du XIX^e siècle, la microtonalité fait partie des techniques alternatives pratiquées à la flûte depuis déjà quelques siècles. Dès la première moitié du XVII^e siècle, Marin Mersenne en parle dans son *Harmonie Universelle*. L'usage des quarts de tons, à cette époque, se nomme « genre enharmonique » et sert à ajouter une teinte expressive distincte à la mélodie que l'on joue. Mersenne présente cette pratique comme étant toutefois facultative et dépendant des capacités du flûtiste :

[O]n peut faire vingt-huit demy-tons tout de suite sur le Flageollet pour sonner toutes sortes de pièces chromatiques ; & s'il se rencontre des hommes qui puissent tellement boucher les trous qui fassent des quarts de ton pour les dieses Enharmoniques, ils pourront user de ce genre sur cet instrument (Mersenne 1637, Livre Cinquième, Proposition VII, p. 234-235).

L'usage des quarts de ton à des fins expressives, bien qu'il soit relativement peu documenté et pratiquement absent des partitions musicales du XVII^e et du XVIII^e siècles, s'est propagé au cours du siècle suivant. En 1761, dans son traité intitulé *L'art de la flûte traversière*, Charles Delusse reprend la nomenclature de « genre enharmonique » et prend quelques pages de son traité afin de présenter les possibilités offertes par l'usage des quarts de ton. Sa tablature présente, selon lui, « *tous les sons possibles à l'instrument, dans les trois Genres de musique, qu'on appelle Diatonique, Chromatique, et Enharmonique, c'est-à-dire, dans une succession de sons qui procède par Intervalles de Tons, de Demi-Tons et de Quarts-de-tons* » (Delusse 1761, p. 39). Elle est suivie de quelques explications ainsi que d'un exemple musical, un *Air à la Grècque*.

Sur la flûte traversière baroque, comme on l'a vu, l'échelle musicale ne suit pas exactement les demi-tons de l'échelle tempérée, et les notes de la gamme ne sont pas obtenues avec un timbre homogène. Et ce qui est vrai pour les demi-tons l'est encore plus pour les quarts de tons. C'est par un travail attentif que l'instrumentiste arrivera à trouver la juste intonation afin d'utiliser au mieux les possibilités expressives des quarts de tons :

Si dans l'exécution les Intervalles qui forment la succession Enharmonique, ne se rencontrent pas toujours dans l'exakte précision qu'expriment les rapports numériques en Théorie, on peut

du moins les rapprocher d'avantage [sic] de cette exactitude, en y faisant contribuer autant l'adresse des doigts que la sûreté de l'embouchure : le tout a l'aide d'un guide infaillible, qui est l'Oreille. [...] [L'Enharmonique est le] genre qu'on pourroit particulièrement employer pour rendre ces Expressions fortes, pittoresques, qui pénètrent [sic] l'âme et la mettent hors d'elle même (Delusse 1761, p. 39).

Bien qu'on n'en retrouve mention que dans quelques écrits, l'usage des quarts de tons semble avoir été plus commun qu'on pourrait le penser. Dans sa préface à l'édition facsimilée du traité de Delusse, Greta Moens-Haenen mentionne que le célèbre flûtiste Pierre-Gabriel Buffardin aurait remis cette pratique en usage avant Charles Delusse, ce qui laisse supposer qu'elle aurait été à nouveau popularisée, au gré d'un phénomène de mode en cours dans les années 1750-1760 :

De manière différente, on a l'*air à la grèque*, précédé d'une tablature de doigtés avec des quarts de tons. Cela devait être à la mode dans les années 1760, puisque d'autres personnes ont également publié de tels airs. Il est intéressant de noter qu'en 1764, le flûtiste Buffardin écrivait une lettre au *Mercure de France*, disant qu'une tablature semblable, suivie par un *air à la grecque* lui avaient été volés quelque temps auparavant. Il affirme également que le tout a été publié sous le nom du voleur. On pourrait se demander s'il parlait de Delusse⁴⁴ (Delusse 1761, p. IV, préface de Greta Moens-Haenen).

5.1.2 Utilisation des harmoniques naturelles

Même si la dernière citation laisse des doutes sur l'authenticité des écrits de Delusse, il reste que son document contient des explications détaillées sur des techniques particulières qu'il est difficile de trouver ailleurs. Certaines concernent notamment le fonctionnement des harmoniques naturelles à la flûte :

Les Sons harmoniques se produisent successivement par la gradation du vent que l'on fournit dans la flûte, sans remuer aucun doigt[.][...] Pour concevoir ces différentes successions, prenons pour exemple le *Ré*, premier son générateur, il produira *ré* son octave, *la* sa douzième, *fa#* sa dix-septième, & *la* sa dix-neuvième. Il en est de même à l'égard des autres sons générateurs, en observant toujours la position des doigts, conformément aux gammes précédentes (Delusse 1761, p. 10).

Mais l'usage des harmoniques naturelles reste malaisé sur la flûte traversière baroque, puisqu'on entend presque toujours des bruits résiduels à la hauteur de la fondamentale (ce qui cause

⁴⁴Citation originale : « *Different again is the air à la grèque, preceded by a fingering chart with quarter tones. This must have been a fashion in the seventeen-sixties, for other people also published such airs. It is interesting to note that in 1764 the flautist Buffardin wrote a letter to the Mercure de France saying that a similar fingering chart followed by an air à la grecque had been stolen from him some time before. He also stated that it was published under the thief's name. One could wonder whether he meant Delusse. »*

notamment un effet de quintes parallèles lorsqu'on utilise l'harmonique de douzième). L'invention de la flûte de Boehm, qui permet l'obtention d'un spectre sonore plus riche, facilite le jeu des harmoniques en diminuant l'intrusion de ces bruits résiduels. Dès 1843, le flûtiste John Clinton en préconise l'usage pour faciliter l'exécution de passages difficiles dans la troisième octave. Avec le temps, les flûtistes apprennent également à utiliser les harmoniques pour leur timbre particulier et leur potentiel expressif, et plusieurs compositeurs tels que Terschak et Doppler utiliseront ces sons dans leurs pièces (Toff 1986, p. 78-79).

Comme l'écrira plus tard Joseph-Henry Altès,

La sonorité suave des sons harmoniques a inspiré bien des compositeurs qui ont écrit pour la flûte de longues [lignes] pianissimo ou encore des effets d'écho [...] [l'auteur donne en exemple la *Fantaisie Pastorale Hongroise* de Doppler et *L'Enfant et les Sortilèges* de Ravel][...][J]udicieusement employés, ils peuvent être d'un grand secours pour faciliter l'exécution de traits à peu près inexécutables par les moyens que nous connaissons déjà (Altès 1956, p. 324).

5.1.3 Coup de langue roulé ou *Fluttertongue*

Une troisième et dernière technique, parfois considérée comme étendue selon le répertoire et l'époque, fait partie de la palette sonore des flûtistes et concerne cette fois-ci l'articulation. Il s'agit du *Flatterzunge*, *Fluttertongue* ou coup de langue roulé. Historiquement, c'est encore Charles Delusse qui, le premier, s'en approche le plus : « *[Pour les cas spéciaux], Delusse mentionne le loulloul, (une articulation) qui ressemble au fluttertonguing moderne*⁴⁵ » (Delusse 1761, p. III, préface de Greta Moens-Haenen).

Mais la première mention sans équivoque du coup de langue roulé dans un traité se retrouve dans la *Célèbre méthode de flûte* d'Altès (sans doute ajoutée par un de ses successeurs dans la troisième édition de 1956), accompagnée d'explications détaillées sur la manière de produire l'effet voulu :

Le coup de langue roulé n'est pas à proprement parler un coup de langue mais un frémissement que l'on imprime à la langue pendant la tenue d'une note ou pendant l'exécution d'un passage lié. Pour produire celui-ci, il faut, en soufflant, prononcer la consonne R du bout de la langue de manière à entretenir une vibration rapide de la langue.

⁴⁵Citation originale : « *[For special cases], Delusse gives a loulloul, something resembling modern flutter tonguing, for very quick notes* ».

Il faut éviter de prononcer la consonne R à la façon des méridionaux qui grasseyent et prononcent R de la gorge. La traduction littérale du mot allemand FLATTERZUNGE indique beaucoup mieux l'effet à obtenir que l'indication : coup de langue roulé. *Flatter* signifie léger, voletant ; *zunge* signifie *coup de langue* (Altès 1956, p. 330 – c'est l'auteur qui souligne).

René Le Roy, quant à lui, soutient qu'on peut aussi l'exécuter avec la gorge, puis que le résultat est presque exactement le même. Il mentionne également que le *Flatterzunge* n'est utilisé que dans la musique moderne⁴⁶ (Le Roy 1966, p. 51).

5.2 Vers une émancipation de l'instrument

5.2.1 Les bois en tant qu'instruments polyphoniques

Vers la fin des années 1960, alors que le sérialisme a vécu son âge d'or, beaucoup de compositeurs sont à la recherche de nouvelles pistes d'exploration musicales. On cherche, entre autres, de nouvelles façons d'utiliser les instruments de musique acoustiques, de les émanciper. En 1966, John C. Heiss publie un premier article consacré à la flûte, intitulé « *For the flute : a list of double-stops, triple-stops, quadruple-stops, and shakes* » (Heiss 1966). Il définit le concept de son multiple et en donne quelques exemples applicables à la flûte. Ces notions sont reprises en 1968 dans un deuxième article (*Some multiple-sonorities for Flute, Oboe, Clarinet, and Bassoon* – Heiss 1968), où elles sont généralisées pour être appliquées à l'ensemble de la famille des bois. Les sons multiples constituent une pratique relativement nouvelle à ce moment-là (du moins, en musique classique occidentale) et le terme *multiphonique* mettra encore quelques années à s'imposer.

En 1967, Bruno Bartolozzi bouscule plusieurs préconceptions à propos des bois dans son ouvrage pionnier *New Sounds for Woodwinds* : leur capacité limitée à produire des timbres variés ainsi qu'à jouer des intervalles plus petits que les demi-tons de l'échelle chromatique tempérée et surtout, leur incapacité à produire des accords de toutes sortes et donc, d'accéder à un statut d'instruments réellement polyphoniques (Bartolozzi 1969, p. 11).

Les travaux de Bartolozzi se concentrent ainsi sur les multiphoniques, c'est-à-dire sur la coexistence de plusieurs (généralement de deux à cinq) modes de résonance dans le tuyau de

⁴⁶Ce qui peut faire sourire aujourd'hui.

l'instrument, et il s'intéresse surtout aux bois : flûte, hautbois, clarinette, basson. Il cherche ainsi à comprendre et à faciliter l'exécution de trois éléments :

1. la transition entre les sons monophoniques et multiphoniques ;
2. la production d'accords homogènes, dans lesquelles un son fondamental et ses partiels auront plus ou moins la même intensité ;
3. la production d'accords dont les sons auront des timbres variables

(Bartolozzi 1969, p. 38-51).

Il vise ainsi à amener les instrumentistes à maîtriser la pratique des multiphoniques et ainsi, à pouvoir les manipuler avec précision. Par exemple, cette manœuvre en trois étapes : à partir d'un doigté donné, laisser sonner la fondamentale seule, puis passer à la multiphonique qui lui est associée, et enfin ne laisser sonner qu'un seul des partiels supérieurs. Pour chaque instrument, de nombreux exemples sont fournis, accompagnés du doigté et du type d'embouchure (position des lèvres sur l'embouchure ou sur l'anche) nécessaires à l'obtention des résultats voulu.

L'ouvrage de Bartolozzi contient aussi quelques indications sur d'autres techniques comme le *smorzato* (vibrato ample produit avec les lèvres) ou le *bisbigliando* (variations timbrales sur une même hauteur grâce à l'usage de différents doigtés), mais surtout des explications détaillées sur l'utilisation des harmoniques et partiels générés avec différents doigtés. Selon son approche, les doigtés qui ne génèrent qu'une seule note sont qualifiés de doigtés à valeur simple (*einwertig*), alors que ceux qui sont susceptibles de générer des accords de deux sons ou plus sont qualifiés de doigtés à valeur multiple (*mehrwertig*). Ainsi, l'idéal de Bartolozzi consiste à n'exercer aucune discrimination entre les sons selon leurs qualités timbrales ou polyphoniques : chaque doigté est susceptible de produire un ou plusieurs sons et, au même titre que le piano, la flûte accède au statut d'instrument polyphonique parce qu'elle permet de jouer soit un seul son, soit plusieurs à la fois (Bartolozzi 1969, p. 39-40).

5.2.2 Vers une extension du registre instrumental

La recherche sur les multiphoniques amorcée par Heiss et Bartolozzi ouvre alors la porte à l'exploration d'autres modes de jeu qui n'appartiennent pas à la palette traditionnelle de la flûte. En plus d'en faire un instrument polyphonique, on cherche maintenant d'autres manières d'en augmenter les possibilités. Une manière d'y arriver est de viser une extension du registre

instrumental. Si la production de sons se situant dans le registre suraigu est surtout rendue possible par la découverte de nouveaux doigtés, la production de sons se situant sous le *si* grave – supposément la note la plus grave de la flûte – est également possible grâce à certains modes de jeu alternatifs. En 1972, après avoir exploré en détail le monde des multiphoniques, John Heiss en fait l’objet de son article « The Flute : New Sounds » (Heiss 1972, p. 153-158). Puis, certaines de ses idées seront reprises et/ou développées par Thomas Howell, dans son ouvrage *The Avant Garde Flute* (1974).

Une première manière d’arriver à produire des sons plus graves est fermer une des extrémités du tuyau (la flûte traversière fonctionnant normalement selon le principe d’un tuyau résonnant à deux extrémités ouvertes). On peut le faire en couvrant le trou de l’embouchure avec la surface du menton se situant juste sous les lèvres. Cela exclut la production de sons selon le mode de résonance habituel de l’instrument, mais on peut recourir à des effets comme les percussions de clés. Ces percussions, exécutées avec un doigté donné appartenant à la première octave, donneront ainsi une note dont la hauteur se situe environ une septième majeure sous la note correspondant au doigté choisi (Heiss 1972, p. 154). Cette idée est reprise par Thomas Howell : pour sa part, il suggère de bloquer le trou de l’embouchure avec la langue, et propose également quelques doigtés permettant d’étendre le registre des percussions de clés vers l’aigu. Il décrit aussi une technique que l’on nommera plus tard couramment *tongue ram*, tout aussi appropriée pour obtenir des sons graves (toujours une septième majeure sous la première octave), et qui consiste à couvrir le trou de l’embouchure avec les lèvres, de souffler dans l’instrument et de rapidement l’obstruer complètement avec la langue (Howell 1974, p. 22-23).

Une autre technique, plutôt audacieuse, consiste à jouer de la flûte comme on jouerait d’un instrument de la famille des cuivres, donc en faisant vibrer les lèvres dans le trou de l’embouchure. Heiss mentionne cette technique brièvement dans son article ; elle sera décrite plus en détail par Howell, deux ans plus tard. Encore une fois, ce mode de jeu fait de la flûte un tuyau dont une extrémité est fermée et l’autre ouverte, ce qui a pour effet d’en baisser les fréquences de résonance fondamentales. Les doigtés peuvent être utilisés pour modifier la longueur du tuyau résonnant, mais comme sur la clarinette, les partiels suivant la fondamentale correspondront alors aux harmoniques impaires (ce qui signifie que le second partiel se situe une douzième au-dessus

de la fondamentale). Comme sur les cuivres, la production de notes pédales (donc très graves) est également possible, et donne aussi un timbre similaire à celui des notes pédales produites par les cuivres. Toutefois, Howell décrit le timbre obtenu avec les autres notes d'une manière bien particulière, comme « *une sorte de timbre qui ne peut être décrite que comme étant extrêmement vulgaire, en fait très proche d'un Bronx cheer*⁴⁷ » (Howell 1974, p. 29).

Une troisième d'arriver à une extension du registre grave, celle-ci connue et pratiquée depuis les années 1950, notamment par des flûtistes de jazz comme Herbie Mann et Sam Most, consiste à utiliser la voix en simultané avec le son de flûte⁴⁸ (Heiss 1972, p. 16). L'effet est optimal avec les notes graves de la flûte, et permet non seulement un jeu polyphonique, mais aussi un renforcement acoustique des timbres produits à la flûte. Si les hauteurs produites par la flûte et par la voix sont bien ajustées, on pourra même arriver à produire des sons différentiels. Howell indique toutefois que cela fonctionne mieux si la note jouée à la flûte est plus haute que la note chantée, en raison du spectre harmonique de la flûte (Howell 1974, p. 30).

5.2.3 L'introduction progressive de la microtonalité

Comme on l'a vu, Bruno Bartolozzi a remis en question le paradigme associé à l'usage exclusif du tempérament égal à l'instrument. Il est tout à fait possible avec la flûte de produire des sons dont la hauteur se situe en-dehors de l'échelle des douze demi-tons tempérés. Toutefois, pour ce faire, on doit renoncer à l'homogénéité de timbre et à la régularité d'intonation pour lesquelles l'instrument a été conçu. C'est ce que soutient Thomas Howell dans *The Avant-Garde Flute* :

Il n'est pas possible de jouer de la flûte avec un timbre de qualité – par cela, j'entends un son concentré et contrôlé – en-dehors des hauteurs pour lesquelles l'instrument a été d'abord conçu, en se donnant une marge de manœuvre approximative de cinq à dix cents. (...) Il n'y a pas moyen de varier l'intonation sans transformer la flûte en quelque chose d'autre. Avec les doigtés normaux, le problème est la distorsion ; la flûte crée un monde expressif dualiste qui est souhaitable pour certains, mais pas pour d'autres. (...) Le rapport habituel entre les trous correspondant aux hauteurs se modifie et le lien entre les propriétés de l'instrument quant à l'intonation et à l'acoustique, et la notion de focus à laquelle on les associe est brisé. Nous

⁴⁷Citation originale : « *a kind of timbre that can only be described as extremely vulgar, not at all unlike a Bronx cheer* ». Le *Bronx cheer* est décrit par le *Urban dictionary* comme étant un son fort, flatulent et peu élégant, exprimant le mépris, qui est obtenu en plaçant la langue entre les lèvres et en soufflant à travers celles-ci. (Voir l'URL <<http://www.urbandictionary.com/define.php?term=Bronx+Cheer>> (repéré le 25 juin 2018).

⁴⁸Heiss affirme que la première occurrence de sons vocaux produits en simultané avec le son de la flûte se retrouve sur l'album *The Herbie Mann-Most Quintet*, enregistré en 1956 sous étiquette Bethlehem (numéro BCP-40).

entrons alors dans un monde où aucun son ne se comporte de façon semblable aux autres. Les instrumentistes faisant usage de ces doigtés atypiques doivent s'attendre à de grands changements quant à la relation qu'ils entretiennent avec leur instrument : le concept normal de focus tonal ne tient plus ; la réponse instrumentale devient imprévisible, sauf lorsqu'on acquiert une certaine expérience⁴⁹ (Howell 1974, p. 7, 13, 16).

L'expérience et la pratique, comme le mentionne Howell, semblent être la clé de la maîtrise des microintervalles et des échelles extra-tonales. En plus de devoir prévoir la réaction de l'instrument, les flûtistes doivent également entraîner leur oreille à reconnaître ces nouvelles fréquences et ces timbres inhabituels. Encore une fois, on a affaire à une pratique qui demande un travail patient et régulier de la part de l'instrumentiste. Toutefois, l'usage de l'ensemble de ces nouvelles « notes » est aujourd’hui entré dans la pratique instrumentale régulière : on les retrouve dans une grande partie des œuvres des quarante dernières années, et les modifications structurelles apportées à certains instruments, comme le système de clés alternatif breveté par Eva Kingma (voir [ci-haut](#), en note de bas de page) prouvent que la microtonalité et les échelles alternatives sont maintenant bien installées dans le langage musical contemporain.

5.2.4 Une conception différente du timbre musical

Comme on l'a vu, l'usage des multiphoniques et des hauteurs de notes ne se situant pas sur l'échelle des demi-tons tempérés impliquent certaines concessions quant au timbre de l'instrument. Au départ considérée comme un désavantage, cette inconstance de la flûte à l'extérieur de la « zone de confort » pour laquelle elle a été conçue a fini par être perçue comme une manière d'accéder à toute une diversité de moyens d'expression. D'abord évités, les sons s'écartant du timbre homogène recherché par les flûtistes depuis le XIX^e siècle ont été explorés, puis ont ouvert la porte au monde des bruits musicaux.

John Heiss, à l'instar de la compositrice Joyce Meekel dans sa pièce *The Shape of Silence* (1969), préconise l'usage de différents sons vocaux (voyelles et consonnes) pour articuler et soutenir les sons graves de la flûte tout en leur donnant une qualité timbrale particulière (Heiss

⁴⁹Citation originale : « *It is not possible to play a flute with good tone quality – by which I mean focused, controllable sound – at any pitch other than that for which the instrument was built in the first place, give it or take it a leeway of roughly five to ten cents. [...] There is no way to vary intonation without turning the flute into something else. With normal fingering the problem is distortion; the flute creates a dualistic expressive world desirable to some but not to others. [...] [T]he usual relationship of tone-holes becomes modified and the usual intonational and acoustical properties that we normally associate with the notion of focus break down. We enter a world where no two sounds behave alike. Performers using these atypical fingerings must undergo great change in their relationship to the instrument : the normal concept of tonal focus breaks down; instrumental response becomes unpredictable except by experience. »*

1972, p. 156). De son côté, Howell suggère la notation en alphabet phonétique des syllabes et consonnes pouvant être utilisées comme éléments d'articulation. Combinés aux résonances du tuyau de la flûte, les sons vocaux sont en mesure de donner lieu à la production d'une grande diversité de « bruits colorés » (Howell 1974, p. 24-28).

Dans *The Avant-Garde Flute*, Howell fournit également une liste complète de doigtés permettant d'explorer différents timbres alternatifs. Il les regroupe selon différentes catégories : les harmoniques simples, les harmoniques complexes renforcées, les hauteurs altérées, les notes « faibles » dans le cas desquelles la configuration des trous sur le tuyau tend à « briser » la colonne d'air plutôt que de la renforcer et les doigtés « forts » permettant une projection inhabituelle. Ainsi, plutôt que d'être qualifiées de bonnes ou mauvaises, d'appropriées ou d'inappropriées, les différentes combinaisons de doigtés sont explorées de manière systématique en vue du résultat sonore qui leur est associé ; la diversité de timbres produits est alors considérée comme intéressante plutôt qu'indésirable⁵⁰ (Howell 1974, p. 14-21).

C'est ce changement de paradigme qui fera en sorte que les différentes techniques de jeu décrites plus haut seront plus naturellement intégrées dans le langage musical des compositeurs écrivant pour la flûte lors des trois dernières décennies du XX^e siècle. L'extension du registre des timbres et du registre de la flûte, ainsi que l'exploration de la microtonalité ont ouvert la voie à l'inclusion du bruit au monde sonore de la flûte. Les expressions employées dans les premiers articles consacrés aux nouvelles techniques de jeu sont éloquentes : John Heiss intitule la troisième section de son article de 1972 « Éléments de bruits dans la sonorité » (*Noise elements in the tone* – Heiss 1972, p. 155), alors que Thomas Howell parle de « bruit coloré » (*Colored noise* – Howell 1974, p. 27).

6 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons voulu dresser un portrait du bagage acquis par le flûtiste du XXI^e siècle. Nous avons d'abord vu de quelle manière l'instrument qu'il.elle a aujourd'hui entre les mains a évolué aux gré des innovations technologiques et des changements esthétiques qui ont eu lieu depuis la Renaissance, jusqu'à l'invention de la flûte moderne par

⁵⁰Citation originale : « simple harmonics, complex reinforced harmonics, inflected pitches, weak pitches in which the configuration of tone-holes tends to break up the vibrating air column rather than reinforce it, strong fingerings for unusual projection ».

Theobald Boehm en 1847. Il nous a ensuite paru pertinent d'examiner ce qui est transmis aux étudiant(e)s-flûtistes lors de leur formation, puisque la plupart des institutions d'enseignement préconisent une certaine esthétique sonore ainsi que des manières particulières de travailler à l'instrument, et que les enseignants ont en tête, parfois malgré eux, une idée bien précise de ce dont un(e) flûtiste professionnel(le) doit être capable afin de pouvoir évoluer dans le monde musical actuel. Nous avons ensuite évoqué quelques raisons pour lesquelles certaines techniques de jeu, encore considérées comme alternatives quelque quarante ans après leur découverte par les musiciens occidentaux, restent encore peu pratiquées et enseignées. Ces techniques, que nous avons choisi de nommer « techniques étendues », sont apparues progressivement dans le langage musical en occupant successivement plusieurs fonctions différentes, toujours avec ceci de particulier qu'elles se distinguent généralement des modes de jeu communément admis.

Les techniques étendues correspondent ainsi à des explorations et des expérimentations qui ont mené au développement d'expertises instrumentales particulières, d'abord chez les flûtistes de jazz – Sam Most et Herbie Mann utilisant la voix en simultané avec leur son de flûte, puis chez les musiciens associés à l'avant-garde de leur époque, comme Patrick Purswell (un expert du *buzzing*, la mise en vibration de l'instrument avec une anche lippale), Harvey Sollberger, Robert Cantrick et Robert Dick – des musiciens à la fois flûtistes improvisateurs et compositeurs, qui sont des pionniers des nouvelles techniques de jeu – et enfin, à une théorisation des techniques développées (Bartolozzi, Heiss et Howell, entre autres). À travers la chronologie des traités consacrés aux techniques étendues à la flûte, il est intéressant de constater une évolution de la nomenclature. D'abord, on a découvert de nouveaux sons (*New sounds for woodwinds* (1969), de Bruno Bartolozzi ; « The flute : new sounds » (1972), de John Heiss) ; ensuite, il a été question de techniques d'avant-garde (*The avant-garde flute* (1974), de Thomas Howell) et de nouvelles techniques (*Neue Spieltechnik in der Querflöte* (1974), de Martin Gümbel) ; enfin, on a parlé de techniques étendues (dans les ouvrages de Robert Dick, notamment, publiés en 1986 et 1987) puis simplement, de techniques de jeu contemporaines, avec *Flûtes au présent* de Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay (1995) ou encore *The techniques of flute playing*, de Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott (2002). Ces nomenclatures successives montrent bien à quel rythme l'intégration des techniques étendues dans la pratique instrumentale s'est effectué.

Pistes de réflexion et apports du chapitre

Instrumentistes :

- Aspects historiques de la facture instrumentale
- Meilleure compréhension des aspects historiques et culturels de l'esthétique sonore
- Revue des principaux traités pédagogiques (historiques et contemporains) de la flûte

Compositeurs.trices et musicologues :

- Aperçu des objectifs poursuivis lors des changements apportés à la facture de l'instrument
- Conception claire de l'esthétique sonore des flûtistes
- Résumé des aspects techniques maîtrisés par les flûtistes formé.e.s dans la tradition classique occidentale

Grâce à la mise en contexte de ce premier chapitre, nous sommes maintenant en mesure d'examiner plus en détail en quoi consiste le monde sonore de la flûte traversière. Nous avons amorcé cette thèse en nous intéressant aux musiciens qui manipulent cet instrument. Dans le chapitre suivant, nous examinerons le fonctionnement de l'instrument lui-même, à travers des notions en lien avec l'acoustique de la flûte, le geste musical qui lui est associé et différentes classifications de l'ensemble des sons qu'il est possible de produire avec la flûte.

Chapitre 3

Portrait d'ensemble et classification des techniques de jeu à la flûte

Sommaire

1	Introduction	53
2	Fonctionnement acoustique de la flûte traversière	56
3	Portrait d'ensemble des techniques étendues	66
4	Classification des techniques de jeu à la flûte	87
5	Conclusion	104

1 Introduction

Après la mise en contexte effectuée dans le premier chapitre, qui mettait en lumière l'instrument que les flûtistes ont actuellement à leur disposition, le bagage qu'ils et elles acquièrent lors de leur formation musicale et l'esthétique sonore qui est véhiculée à travers l'apprentissage et la pratique de l'instrument, il s'agira, dans ce chapitre, de présenter l'ensemble des techniques de jeu qui ont été développées jusqu'à maintenant et qui sont à la disposition des flûtistes d'aujourd'hui. Comme on l'a vu, l'émancipation de la technique instrumentale a donné lieu à l'élaboration de toute une variété de modes de jeu dits alternatifs, que nous avons choisi de nommer « techniques étendues ». Lorsqu'il s'agit de les énumérer et de les décrire, bref, d'en présenter un portrait

aussi complet, logique et organisé que possible, des questions relatives à la nomenclature et à la classification se posent.

Le travail des pionniers des années 1960-1970 (Bruno Bartolozzi, John Heiss, Thomas Howell, Martin Gümbel, Robert Dick, entre autres) s'est d'abord concentré sur le développement des multiphoniques, puis sur l'extension du registre (grave, aigu et microtonal) et, finalement, sur l'élaboration de techniques ayant pour but d'introduire le bruit dans le langage musical. Dès 1975, la plupart des techniques utilisées à ce jour avaient été énumérées et décrites, et, bien souvent, par les flûtistes qui les avaient intégrées à leur jeu. Toutefois, la terminologie associée à tous ces « effets sonores » a mis un moment à se fixer. Il semble que la publication de la première édition de *The Other Flute* par Robert Dick en 1975 ait été déterminante à cet égard. Des termes tels que « *tongue ram* », « *jet whistle* » et « *pizzicato* » ont été dès lors mis en usage courant chez les flûtistes et les compositeurs, et se sont répandus jusqu'à être communément adoptés par la plupart d'entre eux d'aujourd'hui.

Dans les ouvrages et sites web publiés depuis le début des années 2000¹, les auteurs désignent la plupart des techniques de jeu par des termes communément admis et usités ; s'ils fournissent des exemples en accompagnement à leurs explications (sous forme d'extraits de partitions ou de vidéos), ils n'ont toutefois plus besoin de tout décrire en détail. Le mode de production sonore associé à une technique donnée – dûment nommée – et le résultat sonore qui en est attendu sont généralement déjà clairs pour le.la musicien.ne qui est familier.ère avec le monde de la flûte.

On aurait toutefois tort de considérer cette terminologie comme acquise : en effectuant une revue de la littérature consacrée aux techniques étendues, on remarque certains amalgames ainsi que certaines zones de confusion. Par exemple, le terme *whistle tone* désigne généralement le son de faible amplitude produit par l'oscillation de l'air sur le biseau de l'embouchure, mais on l'utilise aussi pour certaines techniques de *jet whistle*, où un souffle délicat dans le tuyau de l'instrument produit des sons similaires (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 14, section 2.4.1). Ou encore, le terme *son éolien* (désignant un son bruité produit par le souffle et les résonances de l'instrument, sans création d'ondes stationnaires à l'intérieur du tuyau) peut parfois être utilisé

¹On pensera, par exemple, à *The techniques of flute playing* de Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott (2002) et aux sites web de Mats Möller (qui n'est malheureusement plus disponible à l'heure actuelle), de Matthias Ziegler ([\(s.d.\) \[site web\]](#)) et de Rogier de Pijper ([\(s.d.\) \[site web\]](#)), notamment.

dans les cas où on recouvre l'embouchure et on souffle à travers l'instrument, ce qui constitue une technique pouvant également être définie comme une forme particulière de *jet whistle*.

La question de la classification prend ici toute son importance. Dans les deux exemples décrits ci-dessus, la confusion s'explique par le fait que les techniques ont été nommées d'après le résultat sonore qu'elles permettent d'obtenir, et non d'après la manière de produire le son. Dans la littérature, différentes classifications sont adoptées par les auteurs. Certains (Dick, Howell et Valade, entre autres) distinguent les techniques de variation du timbre des autres « effets spéciaux », alors que d'autres (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, Artaud et Geay 1995, ainsi que Gümbel 1974, par exemple), adoptent leurs propres catégories, en général davantage basées sur leur pratique instrumentale ou sur les différents résultats sonores pouvant être recherchés par les compositeurs.

Dans ce chapitre, nous présenterons donc le fonctionnement acoustique de la flûte traversière, puis l'ensemble des techniques étendues selon leur manière de créer le son ou d'influencer la production sonore. Ensuite, nous proposerons une classification de ces modes de jeu basées sur la typologie du geste de Claude Cadoz et Marcelo M. Wanderley (2000) ainsi que sur le système de classification organologique de Hornbostel et Sachs (1914), puis nous fournirons quelques explications supplémentaires sur le fonctionnement de certains modes d'émission sonore alternatifs, avant de terminer par une description des articulateurs qui permettent aux instrumentistes de moduler les paramètres de leur jeu. Ce portrait d'ensemble ne se veut pas exhaustif, car de nouvelles possibilités et de nouvelles nuances pourront toujours être découvertes et mises en pratique ; toutefois, nous tenterons de refléter ce qui est recensé dans la littérature et le répertoire actuels pour la flûte traversière.

Par ailleurs, on pourra soulever la question de la notation. Celle-ci n'a pas été abordée dans le cadre de ce chapitre. En effet, tout comme pour la nomenclature des modes de jeu, il n'existe pas de consensus absolu quant à l'usage de symboles précis pour la notation des différentes techniques. Tant pour la microtonalité que pour les timbres alternatifs, plusieurs possibilités existent ; le choix de la notation dépend, entre autres, des influences des compositeurs.trices et de la manière dont ils.elles intègrent ces divers éléments à leur langage musical, et de la manière dont les techniques de jeu sont intégrées au gestes musicaux. Toutefois, pour ceux et celles

qui désireraient en savoir plus au sujet de la notation, on pourra suggérer la consultation des ouvrages de Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay (1995, p. 124-130), Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott (2002, p. 11-54), Martin Gümbel (1974) et Nancy Toff (1986, p. 230-239).

Champs d'expertise

- Acoustique musicale
- Étude du geste instrumental
- Techniques instrumentales et orchestration
- Étude et classification des modes de production sonore

2 Fonctionnement acoustique de la flûte traversière

2.1 Registre

Le registre de la flûte traversière en *do* s'étend sur trois octaves et demi, du *do* central (C_4 , 262,81 Hz) pour l'instrument avec patte de *do* et du *si*₃ (248,06 Hz) pour l'instrument avec patte de *si*, jusqu'au *fa*#₇. Il est aussi possible d'émettre le *sol*₇ en modifiant la position du bouchon présent dans la tête de l'instrument, mais cela entraîne une altération des qualités de résonance et d'accord pour le reste du registre de l'instrument² (Dick 1987, p. 5).

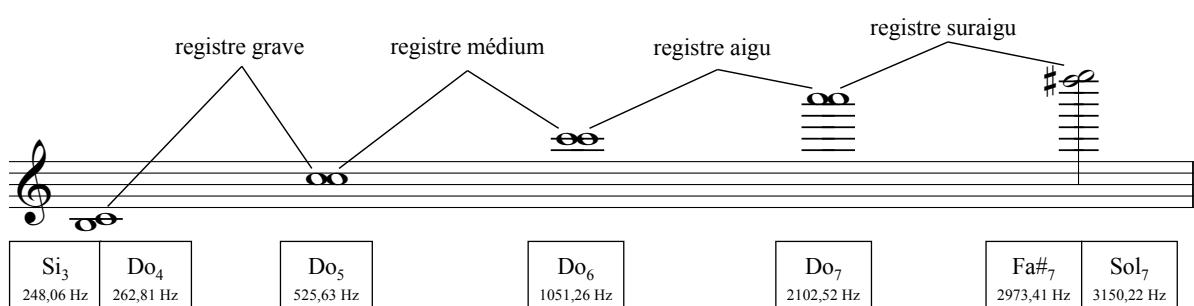


FIGURE 3.1 – Registre de la flûte traversière en *do*. Crédit : Julie Delisle

Le registre (figure 3.1) est habituellement subdivisé par octave, les première, deuxième, troisième et quatrième octaves correspondant respectivement aux registres grave, médium, aigu

²Citation originale : « While the end-plug's position can be altered to produce G_7 , it is done at the cost of resonance and tonal quality throughout the rest of the instrument's range. »

et suraigu. Le tableau 3.1 donne quant à lui les fréquences correspondant aux degrés de l'échelle tonale qu'il est possible d'émettre avec l'instrument³.

Fréquences des notes en Hz (diapason <i>la</i> , à 442 Hz)												<i>Si</i> ₃ 248,06
Do₄ 262,81	Do#₄ 278,44	Ré₄ 295,00	Ré#₄ 312,54	Mi₄ 331,13	Fa₄ 350,82	Fa#₄ 371,68	Sol₄ 393,78	Sol#₄ 417,19	La₄ 442,00	La#₄ 468,28	Si₄ 496,13	
Do₅ 525,63	Do#₅ 556,89	Ré₅ 590,00	Ré#₅ 625,08	Mi₅ 662,25	Fa₅ 701,63	Fa#₅ 743,35	Sol₅ 787,55	Sol#₅ 834,38	La₅ 884,00	La#₅ 936,57	Si₅ 992,26	
Do₆ 1051,26	Do#₆ 1113,77	Ré₆ 1180,00	Ré#₆ 1250,16	Mi₆ 1324,50	Fa₆ 1403,26	Fa#₆ 1486,70	Sol₆ 1575,11	Sol#₆ 1668,77	La₆ 1768,00	La#₆ 1873,13	Si₆ 1984,51	
Do₇ 2102,52	Do#₇ 2227,54	Ré₇ 2360,00	Ré#₇ 2500,33	Mi₇ 2649,01	Fa₇ 2806,53	Fa#₇ 2973,41	(Sol₇) 3150,22					

TABLE 3.1 – Fréquences correspondant au registre tonal de la flûte (*la* 442 Hz).

2.2 Structure

La flûte traversière moderne est souvent fabriquée en métal (alliage de nickel, argent Sterling, or de 10 à 19 carats, alliage ou couches superposées d'or et d'argent, platine, titane), et parfois en bois (grenadille, bois de rose). L'épaisseur du tube se situe entre 0,14 et 0,18 millimètres ; quant au diamètre intérieur, il fait 19 millimètres (Coltman 1979, p. 499). Le corps (incluant le pied) est cylindrique, et la tête est légèrement conique à l'extrémité de l'instrument. À l'intérieur de la tête, un bouchon de liège ajustable permet de réduire la longueur acoustique effective de l'instrument jusqu'à la rendre inférieure à la longueur réelle de l'instrument (Wolfe et al. 2001, p. 130). Les flûtes actuelles, basées sur l'échelle Powell-Cooper, ont ainsi une longueur réelle de 670 millimètres et une longueur effective acoustique de 598 millimètres (McGee (s.d.) [site web]).

La plupart des trous de l'instrument ont approximativement le même diamètre. Les trois trous situés le plus près de l'embouchure font exception. Les deux premiers sont les plus petits de l'instrument et sont souvent utilisés comme trous de registre pour certaines notes du registre suraigu, ou encore pour les trilles où l'on joue en alternance deux notes situées respectivement dans la première et la deuxième octave, ou dans la deuxième et la troisième octave. Quant au troisième trou, il est utilisé comme trou de registre pour plusieurs notes (*ré* médium, *ré* aigu, *ré#*

³Pour refléter les habitudes de jeu de l'auteure de cette thèse, les fréquences ont été calculées en fonction du *la* à 442 Hz, selon une échelle de douze demi-tons logarithmiquement égaux.

médium et *la* aigu), mais aussi pour faire la transition entre *do* et *do#* dans les registres médium et aigu (Wolfe et al. 2001, p. 129).

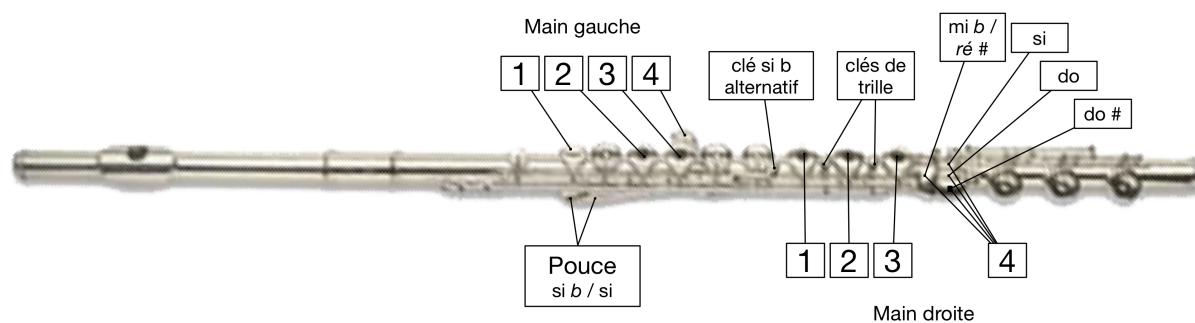


FIGURE 3.2 – Clés et position des doigts sur la flûte traversière. Crédit : Julie Delisle

2.3 Mise en vibration

Le trou de l’embouchure est surélevé par une cheminée, sur laquelle est posée la plaque de l’embouchure. Celle-ci repose sur le menton, et le bord intérieur de l’embouchure se trouve juste sous la lèvre inférieure. Les lèvres dirigent le jet d’air vers le biseau extérieur de l’embouchure. Le jet d’air qui prend forme entre les lèvres de l’instrumentiste constitue la source d’énergie qui permet d’entretenir l’oscillation. L’instrumentiste a la possibilité d’en moduler la vitesse, la forme et la dimension, mais aussi de faire varier la distance parcourue par le jet d’air entre les lèvres et le biseau de l’embouchure. Le jet d’air s’échappera à intervalles réguliers à l’intérieur et à l’extérieur du biseau de l’embouchure à une fréquence déterminée par la distance entre l’ouverture des lèvres le biseau d’une part, et la vitesse du jet d’autre part. Ce phénomène est à l’origine de la vibration sonore : il s’agit du son de biseau (*edge tone* en anglais). La figure 3.3 illustre ce phénomène.

Le jet d’air dirigé contre le biseau est une anche d’air, dite faible : si un résonateur (en l’occurrence un tube) se trouve à proximité, le jet d’air oscillera à une fréquence correspondant à celle des vibrations de l’air contenu dans le tuyau⁴ et déterminée par les propriétés de celui-ci (Castellengo et al. 1994, p. 222-223).

⁴Dans la littérature sur l’acoustique de la flûte, on retrouvera souvent l’expression « colonne d’air ». Autant que possible, nous ne l’utiliserons pas ici, puisqu’elle induit une confusion entre ce que l’on entend sur le plan acoustique et ce que l’on entend dans le langage instrumental. En effet, les instrumentistes utilisent souvent cette expression pour décrire le mouvement de l’air de leur système respiratoire jusqu’à l’embouchure de l’instrument.

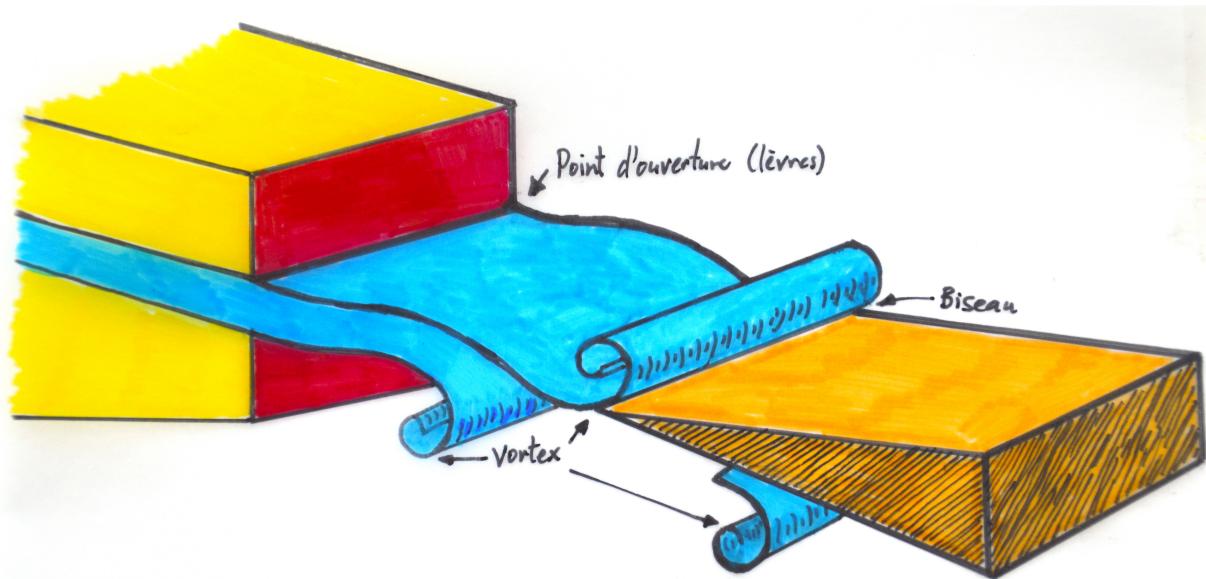


FIGURE 3.3 – Modèle simplifié du son de biseau (*edge tone*). Adapté d'après Dougherty, N.S. et al. 1994, p. 3. Crédit : Julie Delisle

2.4 Ondes stationnaires

C'est ce phénomène qui permet aux vibrations en cours dans le tube d'un instrument à vent de se stabiliser et de donner lieu à la production sonore. Les ondes stationnaires sont dues à la différence d'impédance entre l'air à l'intérieur et à l'extérieur du tuyau de l'instrument (Wolfe (s.d.) [site web](c)). Les ondes créées à l'intérieur du tuyau par la mise en vibration de l'ancre d'air (l'oscillation du jet d'air sur le biseau) sont réfléchies au bout du tuyau en raison de ce changement d'impédance. Des nœuds et des ventres de pression, ainsi que des nœuds et des ventres de mouvement des molécules se forment alors à l'intérieur du tuyau. Ainsi, les ondes stationnaires qui se créent ont une longueur dépendante de celle du tuyau, ainsi que de l'ouverture des extrémités du tuyau. Il y aura donc une différence entre un tuyau aux deux extrémités ouvertes d'une part, et un tuyau à une extrémité ouverte et une extrémité fermée d'autre part.

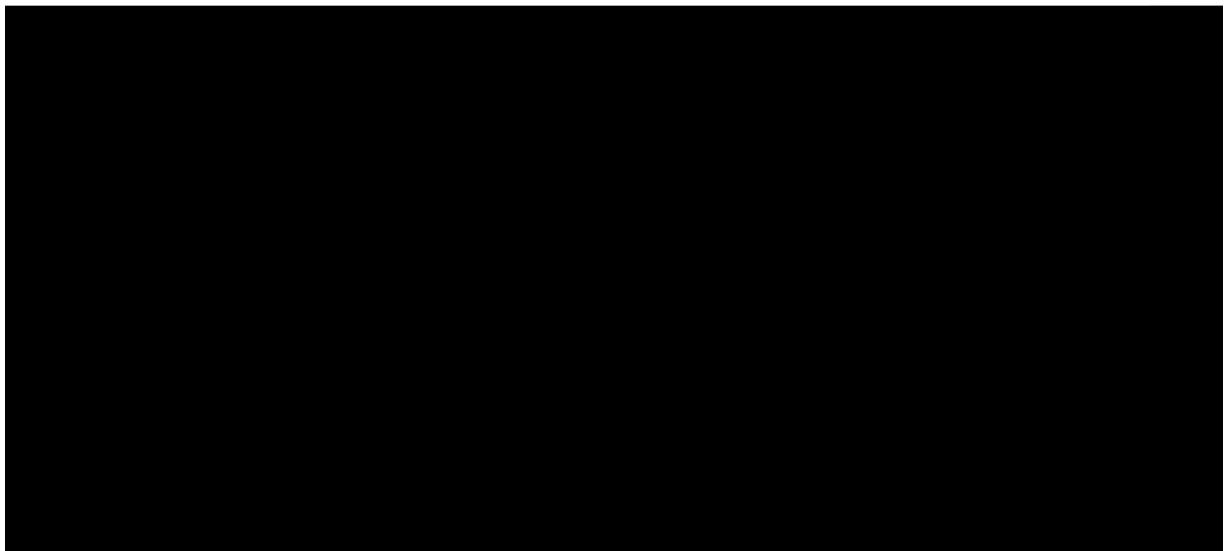
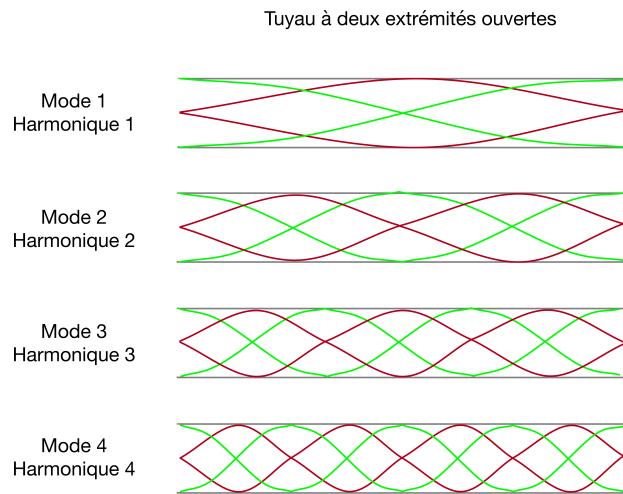


FIGURE 3.4 – Nœuds et ventres de pression dans deux types de tube. En rouge : pression ; en vert : mouvement. La longueur et, par conséquent, la fréquence de l'onde stationnaire diffèrent significativement entre les tuyaux avec deux extrémités ouvertes et les tuyaux avec une extrémité fermée et une extrémité ouverte. De plus, dans le second cas, seules les harmoniques impaires peuvent être émises. Crédit : Julie Delisle

Pour le premier type de tuyau (deux extrémités ouvertes), on aura à chaque bout un nœud de pression acoustique et un ventre de mouvement, tandis qu'un retrouvera nécessairement au milieu un ventre de pression et un nœud de mouvement. Pour le second type, les conditions à l'extrémité fermée du tuyau seront inversées par rapport à celles décrites plus haut, et seules les harmoniques impaires pourront résulter d'une mise en vibration de l'air contenu dans ce type de tuyau. De plus, les fréquences des modes de résonance seront plus basses que dans le cas du tuyau aux deux extrémités ouvertes, puisque la longueur des ondes stationnaires résultantes en sera affectée.

Il est à noter que le diamètre du tuyau influence sa longueur effective. Plus le diamètre est grand, plus la longueur effective du tuyau sera grande. Ainsi, dans le cas de la flûte comme dans bien d'autres cas, la réflexion des ondes s'effectuera légèrement à l'extérieur du tuyau, et non pas directement à son extrémité.

2.5 Impédance acoustique et modes de vibration

Le spectre d'impédance se définit comme le rapport de la pression acoustique sur le volume de matière mis en vibration. Dans le cas de la flûte, il s'agit du volume d'air à l'intérieur du tube. On le représente habituellement avec les fréquences en abscisse, et avec le niveau de pression en Pascals seconde par mètre cube ($\frac{Pa.s}{m^3}$) en ordonnée. Pour les instruments à vent, la mesure d'impédance acoustique peut s'effectuer avec l'instrument seul, sans l'instrumentiste. On obtient alors un spectre, composé de valeurs variant selon la fréquence, qui correspond à la réponse acoustique de l'instrument pour un doigté donné. C'est le spectre d'impédance qui détermine quelles notes peuvent être jouées à ce doigté, et qui permet de dire à quel point ces notes seront stables et près de l'échelle tempérée (Wolfe (s.d.) [site web](d)).

Par ailleurs, c'est la modulation de la pression du jet d'air qui permet de sélectionner le minimum d'impédance correspondant à l'un des partiels⁵ pour un doigté donné. Les pics minimums dont l'impédance est inférieure à $10^6 \frac{Pa.s}{m^3}$ se trouvent en général aux fréquences des harmoniques que l'on peut jouer à partir de ce doigté et avec une technique standard⁶. La figure 3.5 montre

⁵Au lieu du terme *partiel*, les instrumentistes utilisent souvent le terme *harmonique* en contexte de jeu pour désigner la même chose. Mais pour être plus exact, il faudrait parler de partiels, étant donné que la fréquence de ces sons n'est pas toujours exactement égale à un multiple entier de la fréquence du premier mode de résonance du tuyau pour un doigté donné, soit la fréquence fondamentale pour ce doigté.

⁶En excluant les techniques permettant d'émettre des partiels d'ordre plus élevé, comme les *shadow clusters*, qui sont obtenus avec une vitesse et une pression du jet d'air beaucoup plus élevées, sur un laps de temps très court, grâce à une impulsion du diaphragme.

un exemple de spectre d'impédance pour le doigté du *si*₃, la note la plus grave de la flûte en *do* (avec patte de *si*). Les huit premiers pics minimaux d'impédance se situent aux fréquences correspondant aux premiers modes de résonance du tuyau selon cette configuration :

1. *Si*₃ : 248,06 Hz
2. *Si*₄ : 496,13 Hz
3. *Fa*#₅ : 744,19 Hz
4. *Si*₅ : 992,26 Hz
5. *Ré*#₆ : 1240,32 Hz
6. *Fa*#₆ : 1488,38 Hz
7. *La*₆ : 1736,45 Hz
8. *Si*₆ : 1984,51 Hz

Les notes du registre aigu sont plus difficiles à jouer avec une nuance dynamique réduite parce que leur minimum d'impédance est plus haut que celui des notes du registre grave. Cela est dû au fait que les modes de vibration correspondant aux partiels d'ordre plus élevé sont plus sensibles aux pertes acoustiques dues à la friction à l'intérieur du tube de l'instrument. De plus, le nombre de résonances possibles décroît à mesure que le nombre de trous ouverts augmente. Cela est dû au fait que les trous ouverts le long du tube agissent comme un filtre passe-bas, dont la fréquence de coupure se situe autour de 1500-2000 Hz. Ce phénomène minimise la possibilité d'atteindre des minimums d'impédance dont la fréquence serait plus élevée que la fréquence de coupure du filtrage (Wolfe et al. 2001, p. 131,141), donc des partiels d'ordre plus élevés pour un doigté donné. C'est d'ailleurs ce qui explique certaines différences timbrales entre des notes obtenus avec peu ou pas de trous ouverts d'une part, et plusieurs trous ouverts d'autre part⁷.

2.6 Contenu harmonique et bruité de la sonorité

Enfin, il est important de mentionner que la sonorité de la flûte traversière est caractérisée par un mélange de contenu harmonique et de bruit filtré par les résonances du tuyau. La proportion de l'un et l'autre de ces éléments constitutifs dépend du comportement du jet d'air, qui est principalement déterminé par sa vitesse, par la distance entre le biseau et l'extrémité du canal par

⁷En guise d'exemple, on pourra comparer les spectres d'impédance du *si* grave (B3) et du *sol* aigu sur la page web de Joe Wolfe consacrée à l'acoustique de la flûte, en sélectionnant l'onglet « *modern B* », puis les notes mentionnées (voir Wolfe ([s.d.](#)) [[site web](#)] (b), Flute acoustics).

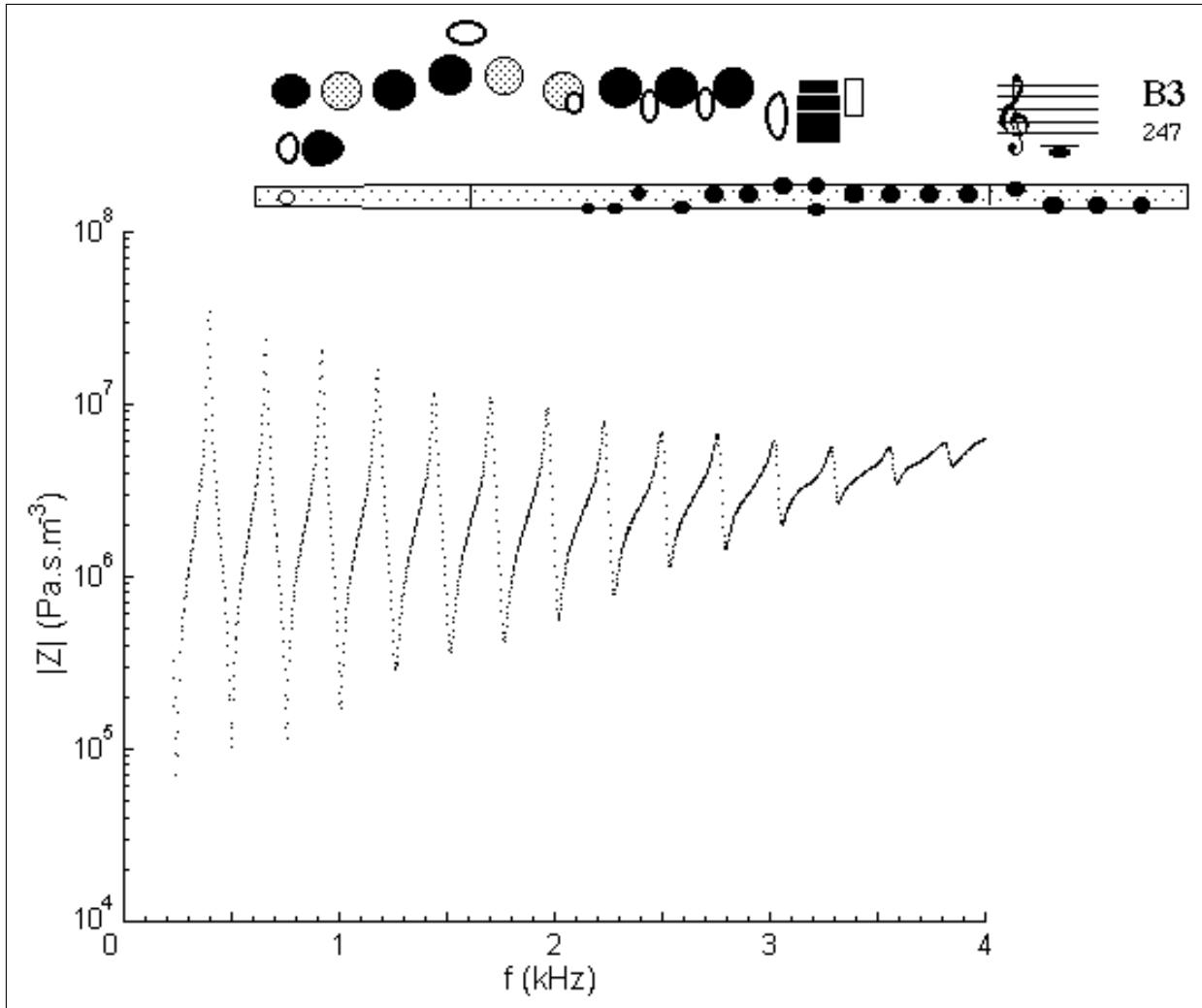


FIGURE 3.5 – Spectre d’impédance du si_3 et fréquences des premiers partiels. Dans le cas du Si_3 , l’instrumentiste peut émettre les sept premiers partiels assez aisément, puis émettre le huitième avec une vélocité d’air accrue. Avec l’aimable autorisation de Joe Wolfe (Wolfe (s.d.) [site web](b), Flute acoustics).

où s’écoule l’air (les lèvres) et par la viscosité de l’air ambiant⁸. Ainsi, le jet d’air peut s’écouler de manière laminaire ou turbulente.

Dans le cas d’un jet d’air laminaire, l’air qui s’échappe du canal formé par les lèvres du ou de la flûtiste suit un courant linéaire, puis forme des tourbillons (appelés vortex). Comme on l’a vu, ces vortex se forment en alternance de part et d’autre du biseau de l’embouchure, à une fréquence déterminée par les modes de résonance du tuyau. Ce cas de figure est typique des sons émis à faible amplitude, avec un jet d’air dont la vélocité est faible (de la Cuadra 2005, p. 52).

⁸Ces variables permettent de calculer la valeur du nombre de Reynolds, qui détermine si le jet d’air sera laminaire (valeur inférieure à 3000) ou turbulent (valeur supérieure à 3000, et pouvant aller jusqu’à 10 000) (de la Cuadra 2005, p. 53, Blanc 2009, p. 20).

Ainsi,

un jet d'air laminaire soumis à une excitation périodique [due aux interactions avec le résonateur qu'est le tuyau] oscille à la même fréquence que cette excitation et amplifie la perturbation jusqu'à ce qu'il atteigne un niveau de déplacement latéral qui empêche sa structure d'être cohésive, ce qui amène le jet à se briser en vortex qui deviendront ensuite des turbulences⁹ (de la Cuadra 2005, p. 14-15).

La figure 2.6, une photographie obtenue avec la méthode Schlieren, montre le flux convectif de la fumée d'une chandelle, avec un air ambiant calme. Le flux est d'abord laminaire, mais la transition vers un flux turbulent est visible au tiers supérieur de l'image. Celle-ci a été réalisée en utilisant un miroir schlieren d'un mètre de diamètre¹⁰.

Le jet d'air devient turbulent lorsque l'air arrive à une plus grande vitesse au biseau de l'embouchure, ce qui se passe lors de conditions de jeu à des nuances dynamiques plus élevées ou dans le registre aigu ou suraigu. Les vortex se transforment donc en turbulences, au cœur desquelles l'air se déplace à une vitesse très élevée. « *Un écoulement turbulent se caractérise par un champ de vitesse présentant de grandes fluctuations en espace et en temps. [...] Les jets turbulents sont sources de bruit. Dans un instrument, ce bruit est filtré par le résonateur, et fait partie intégrante du son produit* (Blanc 2009, p. 20). »

S'il est vrai que dans une esthétique classique occidentale, on vise à réduire au minimum la part de bruit dans la sonorité pour ne conserver que le contenu harmonique, il reste que ce contenu bruité est caractéristique du timbre de la flûte traversière (de la Cuadra 2005, p. 53). Il se pourrait même que ce bruit filtré résultant des turbulences du jet d'air tende à augmenter le contenu en hautes fréquences du son, et ainsi son potentiel de projection sonore, spécialement dans les nuances dynamiques plus fortes et dans le registre aigu.

Ainsi, pour un maximum de projection sonore, l'instrumentiste devrait viser un équilibre entre l'activation d'un nombre élevé de modes de résonance harmoniques d'une part, et l'apport contrôlé de bruit dans les hautes fréquences d'autre part. Toutefois, cette dernière affirmation

⁹Citation originale : « *Thus, a laminar jet submitted to a periodic excitation, oscillates at the same frequency of the excitation and amplifies the perturbation until it reaches a lateral displacement that prevents its structure from being cohesive, eventually causing the jet to break into vortices that later become turbulences.* »

¹⁰Citation originale : « *This Schlieren photograph shows the thermal convection plume rising from an ordinary candle in still air. The plume is initially laminar, but transition to turbulence occurs in the upper 1/3 of the image. The image was made using the 1-meter-diameter schlieren mirror of Floviz Inc. by Dr. Gary Settles* ». Repéré le 8 octobre 2018 à l'URL <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laminar-turbulent_transition.jpg#/media/File:Laminar-turbulent_transition.jpg>.



FIGURE 3.6 – Crédit : Gary Settles, sous licence Creative Commons (CC BY-SA 3.0).

n'est qu'une hypothèse qui devrait être vérifiée par des expérimentations dont l'envergure dépasse le cadre de cette thèse.

3 Portrait d'ensemble des techniques étendues

3.1 Extension des possibilités timbrales de l'instrument

Acoustiquement, les propriétés timbrales de la flûte traversière de Boehm se traduisent par un spectre harmonique¹¹ dont les partiels sont répartis de manière très uniforme à mesure que l'on progresse vers l'aigu. Selon Bork et Meyer (1988¹²), le timbre de la flûte est considéré comme étant particulièrement beau lorsque la fondamentale et la première harmonique (à l'octave) sont d'intensité à peu près égale, tandis que la deuxième harmonique (à la douzième) est d'une intensité d'environ 10 à 15 décibels plus faible.

3.1.1 Variation de la position d'embouchure

Ce timbre idéal pourrait être considéré comme un ingrédient de base, que le ou la flûtiste peut influencer grâce à plusieurs éléments de sa technique instrumentale. Étant donné que le registre dynamique de la flûte est plutôt limité (se situant, en termes d'intensité sonore, entre 67 et 86 décibels pour le registre grave, et entre 83 et 100 décibels pour le registre aigu), on a souvent recours à la modulation du timbre afin d'accentuer les changements dynamiques. Si l'intensité sonore peut être régulée par une ouverture plus ou moins grande des lèvres, le timbre peut, en premier lieu, être ajusté grâce à la modulation du degré de pression du jet d'air et en modifiant l'angle avec lequel l'air est soufflé. Ceci permet d'ajuster les rapports d'intensité entre la fondamentale et les premières harmoniques du spectre (Meyer 2009, p. 66).

Ces techniques sont de plus en plus utilisées par les flûtistes d'aujourd'hui, même par ceux et celles qui se spécialisent dans des répertoires ne faisant pas nécessairement appel aux techniques étendues. Mais elles constituent également une source d'inspiration pour plusieurs compositeurs qui n'hésitent pas à spécifier dans la partition la position d'embouchure à adopter ou la qualité de timbre désirée¹³. Certain.e.s flûtistes et compositeurs.trices se sont également lancé.e.s dans une exploration plus poussée des possibilités permises par les changements d'embouchure. Les

¹¹Un spectre harmonique est composé de partiels dont les fréquences correspondent à des multiples entiers de la fréquence fondamentale.

¹²BORK, Ingolf und Jürgen MEYER, « Zum Einfluß der Spieltechnik auf den Klang der Querflöte. », *Tibia* 13, 1988, p.179-190; cités dans Meyer 2009, p. 64-65.

¹³On peut notamment penser à *Cassandra's Dream Song* de Brian Ferneyhough (Londres : Peters Edition Limited, 1975), dont la partition comprend des indications telles que « *tight lip!* » (page 1, ligne 6), ou encore « *dark tone, wide embouchure* » (page 2, ligne C).

bamboo tones décrits par Robert Dick en sont un bon exemple. Ce timbre particulier peut être obtenu en tournant la flûte sur son axe de manière à découvrir considérablement le trou de l'embouchure (Dick 1986, p. 28). La technique et son nom ont été repris par Wil Offermans dans une de ses études ; dans ses explications, il décrit le timbre des *bamboo tones* en ces termes :

Ce mot devrait être interprété comme un moyen de nommer un timbre spécifique, le mot « bambou » désignant le caractère creux, couvert ou venteux du timbre sonore. [...] De manière comparable au traverso, la plupart des flûtes de bambou peuvent produire une grande variété de timbres. Sans être contraints à l'égalité ([à l'homogénéité du timbre et de la hauteur]), ces instruments de bambou permettent de créer toutes les sortes de couleurs¹⁴ (Offermans 1992, p. 45).

3.1.2 Utilisation des résonateurs vocaux

Par ailleurs, les flûtistes (et autres instrumentistes à vent) utilisent fréquemment les résonateurs de leur conduit vocal afin d'effectuer un pré-filtrage de la source d'excitation sonore (le souffle), par exemple par un déplacement de la langue dans la bouche, par un arrondissement des lèvres ou par des mouvements de la mâchoire inférieure (Breault 2013, p. 118-119). Ces manœuvres leur permettent de raffiner l'ajustement du timbre effectué grâce à une modification de l'angle et de la pression du jet d'air, tel que décrit plus haut. Si les descriptions de ces techniques de modulation du timbre ont longtemps été absentes des traités de pédagogie instrumentale, elles sont de plus en plus enseignées¹⁵. On les utilise non seulement de manière à accentuer les variations timbrales, mais aussi comme stratégie de renforcement acoustique.

Robert Dick présente, dans *Tone Development Through Extended Techniques*, un premier moyen d'utiliser les résonateurs vocaux comme renforcement acoustique : il s'agit du *throat tuning*. Il explique que les vibrations créées par l'oscillation du jet d'air sur le biseau de l'embouchure ne résonnent pas que dans le tuyau de l'instrument, mais aussi à travers la bouche, le cou (en particulier les plis vocaux) et la poitrine du flûtiste, qui constituent, avec le corps de la flûte, les quatre résonateurs principaux ayant une influence sur la sonorité obtenue. Le *throat tuning* consiste donc à ajuster la position et la tension des plis vocaux comme si l'on chantait la note qui est jouée, de manière à ce que la résonance du larynx soit optimale (Dick 1986, p. 9).

¹⁴Citation originale : « [T]his word [bamboo] should be interpreted as a specific timbre, with bamboo standing for a certain hollow, warm, covered or windy tone quality. [...] Comparable with the traverso, most bamboo flutes do produce a wide variety of timbres. Without any obligation to equality, these bamboo instruments create all kinds of colours ».

¹⁵Ces techniques font partie de l'enseignement des flûtistes et pédagogues Trevor Wye, Robert Langevin et Mirjam Nastasi, entre autres.

Un autre moyen d'influencer le timbre de manière significative est de changer la voyelle formée par les résonateurs vocaux. Les résonances ainsi créées à l'intérieur de la bouche permettront d'influencer le contenu du spectre sonore, et plus précisément, les rapports d'intensité entre les harmoniques aiguës. Robert Dick soutient que certaines syllabes sont plus indiquées que d'autres lorsqu'il s'agit d'optimiser l'articulation : « *lors de l'articulation, le choix de certaines syllabes qui favorisent l'émission de partiels aigus, même au point d'arriver à une certaine nasalité, vont faciliter une réponse acoustique rapide de l'instrument*¹⁶ ». Il suggère ensuite l'usage de différentes voyelles, à changer en fonction du registre : « *ooh* » pour le grave, « *ah* » pour le médium et enfin, « *ee*¹⁷ » pour l'aigu (Dick 1986, p. 13).

Toutefois, cette utilisation des voyelles comme manière de moduler le timbre a été explorée et exploitée par plusieurs compositeurs, dont Karlheinz Stockhausen. Dans la section de sa thèse de doctorat portant sur l'œuvre *Kathinkas Gesang*, Marie-Hélène Breault décrit l'utilisation de phonèmes distincts par le compositeur ainsi que leur notation dans la partition :

Le timbre du premier *mi* est noté par le phonème [u] et le timbre du second, par le phonème [α]. Considérés séparément, sur le plan du timbre-qualité, les deux *mi* correspondent à deux unités élémentaires distinctes. [...] Dans le cas de l'"Exercice 3" de *Kathinkas Gesang*, la transition continue impliquant, d'une part, le sone créé par l'émission du phonème-sonème [α], constitue un disone, ou une modulation de timbre (Breault 2013, p. 129-130).

3.1.3 Utilisation des harmoniques naturelles et de doigtés alternatifs

Une autre manière d'obtenir différents timbres consiste à varier le doigté utilisé pour une même note. S'il est possible d'émettre une note à partir d'un doigté donné, c'est parce que cette note correspond à l'un des modes de résonance qui sont associés à ce doigté. Ainsi, plusieurs des notes des registres médium, aigu et suraigu correspondent en réalité à des harmoniques naturelles des sons graves. Le doigté correspondant à la note grave est parfois modifié afin d'optimiser la résonance de l'instrument ainsi que l'émission du partiel correspondant à la note devant être jouée : c'est le cas notamment du *ré* et du *ré#* du registre médium¹⁸. D'autres notes sont jouées avec un doigté complètement différent mais pourraient s'inscrire dans le spectre d'une

¹⁶Citation originale : « *[w]hen tonguing, use of syllables that favor higher overtones, even to the point of nasality, will help the flute to respond faster* ».

¹⁷Ces voyelles, ici notées en référence à la langue anglaise, correspondent aux voyelles « o », « â » et « i » en français.

¹⁸Ces notes sont habituellement jouées avec la clé de l'index gauche ouverte, celle-ci servant de clé de registre.

fondamentale du registre grave, comme c'est le cas du *si*¹⁹, du *do* et du *do#* du registre médium, et des notes s'étendant du *ré* au *fa* aigu. Quant aux notes s'étendant du *mi* médium au *do#* aigu, elles sont jouées avec le même doigté que les notes correspondantes à l'octave inférieure ; dans ce cas, c'est simplement le partielle correspondant à la première harmonique – l'octave – qui est émis au lieu de la fondamentale.

Une première possibilité de variation du timbre par le doigté consiste à émettre ces notes à partir du doigté de la note grave correspondant à la fondamentale du spectre dans lequel elles s'inscrivent. Selon Thomas Howell, ces sons contiennent moins de partiels aigus à cause de la longueur accrue de la colonne d'air vibrante (Howell 1974, p. 14). Les auteures Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott décrivent le changement timbral obtenu en ces termes : « *les rapports altérés entre les différentes résonances se produisant à l'intérieur du tuyau de la flûte vont causer des changements dans le timbre, ce qui résulte en un son plus lisse que celui produit avec le doigté original*²⁰ » (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 14). Ce procédé correspond à l'appellation « harmoniques naturelles », puisque les notes émises correspondent aux partiels d'un spectre harmonique.

Toutefois, certains doigtés, qui ne correspondent généralement pas à ceux utilisés lors du jeu conventionnel, ont un spectre d'impédance plus irrégulier que ceux mentionnés plus haut²¹. Si certaines résonances correspondant à ces doigtés se rapprochent des fréquences des demi-tons de l'échelle tempérée, les notes ainsi obtenues auront un timbre distinct qui reflétera le rapport plus irrégulier entre les partiels de leur spectre. L'émission d'une même note grâce à plusieurs doigtés utilisés en alternance permet ainsi d'obtenir une variation du timbre facilement perceptible. Cette alternance de doigtés peut se faire à une vitesse variable, allant de très lente à très rapide ; ce procédé est à la base de la technique appelée « trille de timbre » ou *bisbigliando*.

Thomas Howell et Robert Dick classifient, chacun à leur manière, les timbres obtenus grâce aux différents doigtés. Chez Howell, ceux-ci sont regroupés selon les catégories suivantes : « *a) harmoniques simples, b) harmoniques complexes renforcées, c) hauteurs modifiées, d) notes*

¹⁹Dans les cas où la flûte est dotée d'une patte de *si*, le *si* de la première octave, joué avec les clés du pouce et de l'index gauche fermées, correspond à l'harmonique d'octave du *si* grave, la note la plus grave de la flûte.

²⁰Citation originale : « *[t]he altered resonance relationships within the flute tube cause changes in timbre, resulting in a glassier sound than that produced with the original fingering* ». Dans la version allemande du texte, l'expression « *a glassier sound* » est traduite par « *ein blasseres Klangresultat* », ce qui suggère l'idée d'un timbre moins brillant et confirme l'affirmation de Thomas Howell.

²¹Par exemple, tous les doigtés de multiphoniques dont les partiels ne s'inscrivent pas dans une série harmonique.

plus faibles pour lesquelles la configuration des trous d'intonation a tendance à briser la vibration de la colonne d'air plutôt que de la renforcer; e) doigtés forts pour une projection sonore hors du commun²² » (Howell 1974, p. 14). Quant aux catégories de Robert Dick – sons normaux, diffus, assourdis, brillants et perçants²³ – elles décrivent en détail le contenu spectral des sons qui leur sont associés :

- **Sons normaux** : fondamentale très forte, deuxième partielle fort, et troisième, quatrième, cinquième, sixième, septième et huitième partiels progressivement de plus en plus faibles.
- **Sons diffus** : fondamentale très forte, deuxième partielle fort, troisième et quatrième partiels plutôt faibles, et cinquième et sixième partiels très faibles, s'ils sont présents.
- **Sons assourdis** : fondamentale forte, deuxième et troisième partiels faibles. Si les partiels plus aigus sont présents, ils sont extrêmement faibles.
- **Sons brillants** : fondamentale forte, deuxième partielle très fort, troisième partielle fort, et quatrième, cinquième et sixième partiels progressivement de plus en plus faibles.
- **Sons perçants** : fondamentale plutôt forte et partiels aigus très forts (Dick 1987, p. vii, introduction).

3.2 Échelles musicales alternatives et altération de la hauteur

3.2.1 Microtonalité et échelles extra-tonales

Dans les paragraphes précédents, il a surtout été question de variations du timbre. Toutefois, il n'est pas rare que l'usage d'un doigté alternatif modifie la fréquence de résonance du tuyau et aie donc une influence sur la hauteur de la note émise. De plus, un changement spectral aura un effet direct sur le centre de gravité spectral (centroïde) et donc, sur la perception de la hauteur²⁴ (Marozeau 2004, p. 19). Ainsi, les variations de timbre et de hauteur vont souvent de pair, qu'elles s'effectuent grâce à l'usage de doigtés alternatifs ou par une modification de la position d'embouchure.

Le choix du doigté et celui de la position d'embouchure sont donc deux stratégies qui permettent d'avoir accès aux échelles microtonales et extra-tonales. Si plusieurs compositeurs basent

²²Citation originale : « *a) simple harmonics b) complex reinforced harmonics c) inflected pitches d) weak pitches in which the configuration of tone-holes tends to break up the vibrating air column rather than reinforce it e) strong fingerings for unusual projection* ».

²³Ma traduction des adjectifs *normal*, *diffuse*, *muted*, *bright* et *edgy*.

²⁴Citation exacte : « *une variation de la distribution de l'énergie dans l'enveloppe spectrale, résumée par le centroïde spectral, peut facilement faire varier la perception de la hauteur* ».

leur langage musical sur l'usage d'une échelle en quarts de tons tempérés, les flûtistes interprétant leur musique doivent adapter leur technique de manière à obtenir le résultat désiré, comme le soutiennent Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott : « *Dans la littérature contemporaine pour flûte, la microtonalité est employée de manière calculée ; l'émission précise des hauteurs nécessite une extension de la technique digitale habituelle. [...] Il est à noter que toutes les hauteurs microtonales sont aussi sujettes aux principes de base de l'intonation*²⁵ » (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 48-49). Par ailleurs, Thomas Howell met les compositeurs en garde contre l'utopie d'une flûte pouvant parfaitement jouer tous les quarts de tons, et affirme qu'en fait, l'instrument est mieux adapté à l'échelle en 31^e d'octaves : « *La flûte n'est pas un piano en 24 quarts de tons[.] [...] [Elle] est en fait mieux adaptée au jeu se situant dans une échelle de 31 degrés tempérés que dans une échelle en quarts de tons se situant entre les douze degrés du tempérament égal*²⁶ » (Howell 1974, p. 18).

3.2.2 Le *Pitch bending*

Le *pitch bending* est une technique qui consiste à tourner la flûte sur son axe, vers l'intérieur ou vers l'extérieur, de manière à varier la hauteur de la note émise. Dans ce cas-ci, la modification de la grandeur du trou de l'embouchure aura une incidence sur la fréquence fondamentale émise, en réduisant ou en augmentant la longueur effective du tube. De plus, la modification de l'angle du jet d'air aura une influence supplémentaire sur la hauteur de la fondamentale et sur le spectre sonore résultant, et donc sur le centre de gravité spectral et par conséquent, sur la hauteur perçue.

En résumé, une rotation vers l'intérieur diminuera la hauteur perçue du son émis, tandis qu'une rotation vers l'extérieur l'augmentera. L'amplitude de la variation dépend de la longueur de la colonne d'air vibrante, les longueurs les plus restreintes correspondant aux hauteurs les plus flexibles. Un *pitch bend* vers le haut sera accompagné d'une augmentation du volume sonore et du caractère diffus du timbre, alors qu'un *pitch bend* vers le bas sera accompagné d'une baisse du volume sonore ; dans le cas d'un *pitch bend* allant jusqu'à un demi-ton vers le bas, les nuances se limiteront à un registre se situant entre *ppp* et *mp* (Dick 1987, p. 140).

²⁵Citation originale : « *In contemporary flute literature, microtonality is calculatedly employed; performing the pitches precisely necessitates an extension of current fingering technique. [...] It should be noted that all microtonal pitches are also subject to the standard principles of intonation* ».

²⁶Citation originale : « *The flute is not a 24-tone piano[.] [...] [It] is better adapted to playing in 31-tone equal temperament than in quarter tones within 12-tones equal temperament* ».

3.2.3 Le *glissando*

La technique du *pitch bending* est souvent associée au *glissando* : Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott la nomment d'ailleurs « *embouchure glissando* » (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 46). Pierre-André Valade, lui, distingue le *pitch bend* du *portamento* : le premier désigne un *glissando* sur une seule note, alors que le second désigne un glissando entre deux notes et se distingue par l'usage obligatoire des doigts pour influencer la hauteur (Valade 1990, p. 28). Quant à Matthias Ziegler, il explique que le *glissando* peut aussi être effectué grâce à un léger mouvement des lèvres, et que souvent, en réalité, on a recours à une combinaison de rotations de la flûte sur son axe, de mouvements des lèvres et de mouvements des doigts afin de modifier la hauteur (Ziegler (s.d.) [site web]).

Par contre, par le terme *glissando*, Robert Dick ainsi que Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay désignent uniquement les variations progressives de la hauteur produites grâce à un mouvement des doigts et décrivent de manière détaillée la meilleure manière d'arriver à un résultat sonore satisfaisant. Chez ces auteurs, on distingue deux gestes : celui consistant à actionner les clés par un mouvement très progressif, et celui consistant à boucher ou déboucher progressivement les trous des clés de la flûte à plateaux ouverts. Dans le cas du piccolo et des flûtes alto, basse et contrebasse, on doit se restreindre à la première de ces deux techniques²⁷. Lors de son apprentissage des techniques de *glissando*, Robert Dick dit avoir été inspiré par le flûtiste jazz Steve Kujala, un expert du *glissando* par le maniement des clés, ainsi que par le flûtiste indien Hariprashad Chaurasia, chez qui il a observé la technique consistant à glisser ses doigts de manière à progressivement ouvrir les trous des clés²⁸ (Dick 1987, p. 76).

3.3 Altérations périodiques et apériodiques du son

3.3.1 Contrôle, exagération et perturbation du vibrato

Le vibrato fait partie intégrante de la technique des flûtistes depuis le début du XX^e siècle ; il en a été question dans le chapitre précédent. Une modulation régulière de l'amplitude et de la hauteur du son de flûte, une fois la résonance établie dans le tuyau, est en effet considérée depuis

²⁷ARTAUD, Pierre-Yves et Gérard GEAY, *Flûtes au présent* (1995), p. 42 et DICK, Robert, *The other flute* (1987), p. 76.

²⁸Voir également, de Robert Dick, l'étude #3 tirée des *Flying lessons*, vol. 2 (New York : Multiple Breath Company, 1983), qui porte sur les *glissandi* et qui a été inspirée par le jeu de Hariprashad Chaurasia.

longtemps comme une manière d'ornementer la sonorité. Toutefois, les techniques de vibrato peuvent être considérées comme étendues dans la mesure où elles sortent de leur rôle d'ornement pour devenir un aspect du jeu en soi, dont on peut contrôler les paramètres avec précision.

Le vibrato « de base » à la flûte ressemble à celui des chanteurs : il se produit principalement au niveau de l'appareil vocal (même si les plis vocaux ne vibrent pas la plupart du temps) et implique deux phénomènes, combinés à différents degrés selon les interprètes. Le premier est une alternance entre la compression et l'expansion de la cavité se situant sous la glotte (en position ouverte), qui entraîne une variation du degré de tension. Le second, lui, consiste en l'alternance périodique entre l'élargissement et le rétrécissement de la glotte (ce qui équivaut à l'ouverture et à la fermeture des plis vocaux), alors que la tension est constante à l'intérieur de la cage thoracique, ce qui affecte le flux d'air passant à travers la glotte de manière périodique (Gärtner 1981, p. 59). Le vibrato se produit donc lorsque l'action des muscles de l'abdomen, de l'appareil vocal, du thorax et du diaphragme sont bien coordonnés, et qu'il n'existe pas de tension inutile au niveau du larynx.

Certains auteurs, notamment Nancy Toff (Toff 2012, p. 110-111) et Martin Gümbel (Gümbel 1974, p. 7), distinguent, de manière archétypale, deux types de vibrato : le vibrato de diaphragme et le vibrato de larynx (ou de gorge). Dans le premier cas, ce sont les variations de pression d'air dues aux contractions périodiques du diaphragme et des muscles abdominaux qui produiront la modulation de hauteur et d'amplitude dans le son. Dans le second, ce sont les contractions des muscles du larynx et de l'appareil vocal qui moduleront la sonorité. Nancy Toff est d'avis que cette seconde technique est potentiellement dangereuse, parce que susceptible d'induire une trop grande tension dans la gorge ; de plus, les deux auteurs sont d'avis qu'il est facile de tomber dans une version caricaturale du vibrato (nommée « chevrottement » par Gümbel) qui rappelle les bêlements de la chèvre.

De là, il est possible d'user de plusieurs stratégies différentes afin d'exagérer le vibrato, de le rendre apériodique ou d'en augmenter ou diminuer considérablement la fréquence et l'amplitude. Dans les cas où le but est d'en augmenter la vitesse tout en gardant une grande amplitude, on peut exagérer les contractions périodiques du larynx. Le timbre ainsi obtenu possède une qualité particulière (Gümbel 1974, p. 7) : le vibrato est pointu, comme si l'on appliquait une modulation

en dents de scie au son. On peut aussi faire usage de contractions prononcées des muscles abdominaux, de fréquence et d'amplitude variables selon les besoins. Cette dernière technique permet beaucoup de latitude ainsi qu'une grande flexibilité, puisque ces muscles sont faciles à contrôler. C'est notamment cette technique que l'on utilise dans les pièces s'inspirant du jeu au *shakuhachi*²⁹.

3.3.2 Vibrato de langue

Cette technique, pouvant être pratiquée indépendamment du vibrato conventionnel (celui résultant de l'action coordonnée des muscles du larynx, de l'abdomen, du thorax et du diaphragme), consiste à moduler le son par un mouvement d'ondulation de la langue à l'intérieur de la bouche, comme le décrivent Levine et Mitropoulos-Bott : « *Cet [effet] est créé en articulant "[y] [y] [y]"*. Le son résultant est plus irrégulier et diffus que le vibrato normal³⁰ (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 32). » Quant à Martin Gümbel, il compare l'effet obtenu à un trémolo très délicat (Gümbel 1974, p. 8), que l'on pourrait rapprocher du flattement, une technique de vibrato de doigts propre au traverso baroque.

3.3.3 Vibrato de doigts

Il s'agit ici d'une application détournée de la technique du *bisbigliando*. Dans les cas où la variation de hauteur induite par le changement de doigté n'est pas trop importante (lorsqu'ils correspondent à deux degrés très rapprochés sur une échelle microtonale), la variation de timbre résultant de l'alternance entre les doigtés peut s'apparenter à un vibrato. Comme les doigts et les muscles responsables de la production du vibrato peuvent très bien fonctionner de manière indépendante, il est tout à fait possible de combiner ces deux effets afin d'obtenir une modulation complexe de la sonorité.

3.3.4 Vibrato de lèvres ou *smorzato*

Ici, ce sont des contractions périodiques ou apériodiques des lèvres (Artaud et Geay 1995, p. 17, Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 33) ou une alternance entre l'ouverture et la fermeture

²⁹La pièce *Atem-Lied* (1997), pour flûte basse solo, du compositeur japonais Toshio Hosokawa (Tokyo : Schott Music Co. Ltd., 2010), est un bon exemple de cette esthétique sonore.

³⁰Citation originale : « *This [effect] is created by articulating "[y] [y] [y]"*. The resulting sound is more irregular and diffuse than the normal vibrato. »

de l'embouchure résultant d'un mouvement de la mâchoire inférieure (Gümbel 1974, p. 7) (ou encore une combinaison des deux) qui permettent d'obtenir l'effet qui porte le nom de *smorzato*. La variation de timbre et d'amplitude est alors très importante, et donne l'impression que le son est brisé ou hachuré. Bruno Bartolozzi suggère d'utiliser cette technique en combinaison avec l'usage de doigtés alternatifs, ou encore de l'utiliser lors de la production de multiphoniques (dont il sera question un peu plus bas), de manière à faire apparaître et disparaître certaines notes de l'accord (Bartolozzi 1969, p. 26-27). Dans *Cassandra's Dream Song*, Brian Ferneyhough utilise même simultanément un *smorzato* à vitesse variable en conjonction avec un vibrato ample et rapide³¹, ainsi qu'un *fluttermouth* !

3.3.5 Le *fluttermouth* ou *Flatterzunge*

Comme on l'a vu, la technique du *fluttermouth* ou *Flatterzunge* n'est pas nouvelle, et fait même partie du répertoire standard de la flûte depuis la fin du XIX^e siècle³². Il existe deux manières de produire cet effet : par un roulement de la langue (consonne roulée alvéolaire³³), et par une vibration du dos de la langue contre ou près de la luette (consonne roulée uvulaire³⁴). Acoustiquement, l'effet résulte de l'introduction périodique (à une fréquence d'environ 25 Hertz) de composantes bruitées au son, s'apparentant aux transitoires d'attaque. Cette perturbation de la vibration entraîne une modulation périodique de l'amplitude d'environ 15 dB (Meyer 2009, p. 67).

Historiquement, certains auteurs semblent exprimer une préférence pour la vibration de langue (Altès 1956, p. 330, Gümbel 1974, p. 9), alors que d'autres sont d'avis que la différence entre les deux techniques est si peu perceptible que l'interprète devrait pouvoir choisir celle qui lui convient le mieux (Howell 1974, p. 26, Le Roy 1966, p. 51). Aujourd'hui, il est maintenant admis que les flûtistes devraient idéalement maîtriser les deux techniques : selon la nuance, le registre, la vitesse de battement et le grain désirés, une des deux techniques est souvent plus indiquée que l'autre. Par exemple, dans le grave ainsi que dans les passages plus doux, Levine et

³¹Dans la partition : Sheet 2, ligne A - «*fast, heavy vibrato*».

³²L'article de Wikipédia sur le *fluttermouth* (Wikipédia 2018 [site web](b)) donne à titre d'exemple les pièces *Casse-Noisette* (1892) de Piotr Illyich Tchaikovsky et *Don Quixote* (1897) de Richard Strauss. On retrouve le *fluttermouth* également dans le *Sacre du Printemps* (1910) de Stravinsky et dans plusieurs pièces pour flûte et piano, dont la *Sonatine* (1946) de Pierre Sancan et le *Le Merle Noir* (1952) d'Olivier Messiaen.

³³Notée [r] dans l'alphabet phonétique international – voir Wikipédia 2018 [site web](a) à ce sujet. Il est à noter que dans le cas spécifique de la flûte, les consonnes à l'origine de la vibration du *fluttermouth* ne sont pas voisées.

³⁴Identifiée par le symbole [v] – voir Wikipédia 2017 [site web](b) à ce sujet.

Mitropoulos-Bott affirment que le *fluttermouth* de gorge est préférable, tandis que le *fluttermouth* de langue semble être plus approprié dans les passages plus forts (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 12). De plus, selon Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay, la vitesse de roulement est plus rapide avec la technique de gorge qu'avec la technique de langue (Artaud et Geay 1995, p. 19).

Finalement, Robert Dick souligne le fait que la variante uvulaire est la plus efficace avec les multiphoniques, les timbres alternatifs, les sons résiduels et les *whisper tones* (sons de biseau), et qu'elle a l'avantage de permettre une articulation simultanée des sons avec la langue. De plus, il est possible d'en contrôler la vitesse, en variant le degré de pression sur la luette. Quant à la variante alvéolaire, elle est plus indiquée en combinaison avec les *jet whistles* ainsi que dans toutes les situations où les composantes bruitées font déjà partie de la sonorité (Dick 1987, p. 136).

3.4 La flûte comme instrument polyphonique

3.4.1 Les multiphoniques

La flûte traversière a longtemps été considérée comme un instrument strictement monophonique. Toutefois, en 1958, Luciano Berio demande l'émission de deux notes en simultané dans sa *Sequenza I per flauto*³⁵, et quelques années plus tard, comme on l'a vu au chapitre 2, Bruno Bartolozzi et John Heiss se passionnent pour le développement de nouvelles techniques de jeu impliquant la production de plusieurs notes en simultané, qui permettent d'émanciper la flûte en ce sens et d'en faire un instrument polyphonique. La technique la plus emblématique de la flûte polyphonique est sans conteste la multiphonique (*Mehrklang* en allemand).

Selon Pierre-André Valade, la multiphonique se définit comme suit :

On appelle SON MULTIPLE ou MULTIPHONIQUE l'émission simultanée de plusieurs hauteurs par un instrument monodique. Sur la flûte, cet effet est rendu possible par le jeu de doigtés pouvant donner chacun plusieurs notes en fonction du rapport vitesse d'air/ouverture des lèvres. [...] Les doigtés dont le résultat est le plus satisfaisant intègrent une ouverture située vers le milieu de l'instrument (Valade 1990, p. 24-25).

Afin de bien saisir le fonctionnement des multiphoniques, il est nécessaire de comprendre que le son produit par chaque doigté de flûte consiste en un spectre complexe (harmonique

³⁵BERIO, Luciano, *Sequenza I per flauto solo*, Milan : Edizioni Suvini Zerboni, 1958, p. 5.

ou non, mais dans tous les cas, composé de plusieurs partiels³⁶). S'il est possible de jouer chaque partielle séparément – on y arrive principalement en variant l'angle du jet d'air sur le biseau de l'embouchure – on peut aussi, grâce à une plus grande ouverture des lèvres, faire coexister plus d'un mode de résonance à l'intérieur du tube de l'instrument : de deux à cinq en simultané, selon Robert Dick. De plus, celui-ci ajoute que tout comme les sons à hauteur unique, les multiphoniques n'ont pas toujours le même timbre : « *Du point de vue du timbre, les multiphoniques varient entre des sons plutôt clairs et normaux, jusqu'à des sons extrêmes aux qualités brillantes ou étouffées. [...] Chaque doigté, sur chaque flûte, sans exception, donne au moins une multiphonique, mais plus habituellement de quatre à six*³⁷ » (Dick 1987, p. 83).

3.4.2 Harmoniques doubles ou triples

Cette première catégorie de multiphoniques correspond aux doigtés du registre grave (du *si* grave au *do#* médium), c'est-à-dire à ceux qui permettent d'obtenir un tuyau sans ouverture en leur milieu. Ces doigtés permettent d'obtenir un spectre principalement harmonique ; on les utilise d'ailleurs comme moyen de varier le timbre de notes aiguës qui correspondent aux partiels supérieurs de ce spectre³⁸. À partir de ces doigtés de fondamentales graves, il s'agit simplement de faire coexister plusieurs partiels voisins³⁹. L'appellation « harmonique double » est en fait une traduction de l'expression anglaise « *double harmonics* » utilisée par Levine et Mitropoulos-Bott (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 14), ainsi que de l'expression allemande « *Doppelflageolett* », utilisée par Martin Gümbel, qui parle également de multiphonique par technique de registre (*Mehrklänge durch Registertechnik*) (Gümbel 1974, p. 14). Dans le cas où plus de deux partiels sont émis simultanément, on pourra parler, de manière conséquente, d'harmoniques triples et quadruples.

³⁶Ce spectre est d'ailleurs la cause du timbre particulier obtenu avec chaque doigté. À ce sujet, voir la section 2.1 du présent chapitre.

³⁷Citation originale : « *Timbrally, multiphonics vary from clear, normal sounding tones to extremes of bright and muted qualities. [...] Every fingering on every flute, without exception, yields at least one multiphonic, more usually four to six* » (c'est l'auteur qui souligne).

³⁸Voir à ce sujet, dans la section 2.1 du présent chapitre, la rubrique intitulée *Utilisation des harmoniques naturelles et de doigtés alternatifs*.

³⁹De deux à quatre, selon les cas. Cette technique est plus facilement réalisable sur les grandes flûtes (alto, basse et contrebasse). De plus, dans certains cas, il est possible d'émettre simultanément deux (ou même trois) partiels qui ne sont pas immédiatement voisins, comme l'harmonique d'octave (2^e partielle) et l'harmonique de quinzième (4^e partielle).

3.4.3 Multiphoniques inharmoniques

Les multiphoniques appartenant à cette catégorie fonctionnent selon le même principe que les harmoniques doubles, triples et quadruples, sauf qu’elles sont produites à partir de doigtés créant une ouverture au milieu du tube. Nous les qualifions ici d’inharmoniques parce que les fréquences des partiels constituant la multiphonique – et donc le spectre d’un son unique qui serait joué à partir de ce doigté – ne sont pas nécessairement des multiples entiers d’une même fondamentale (la fondamentale correspondant dans le cas présent au premier pic minimal du spectre d’impédance). Ainsi les intervalles séparant les différents partiels peuvent aller de la seconde à l’octave, ce qui permet d’accéder à une grande variété de diades et d’accords à trois, quatre et cinq sons. La facilité d’émission, le timbre et la stabilité de chaque multiphonique (mais aussi de tous les partiels qui les composent) sont extrêmement variables ; dans plusieurs traités⁴⁰, les listes de doigtés de multiphoniques – qui occupent généralement une place importante de ces ouvrages – comprennent également des annotations qui permettent de les distinguer selon un ou plusieurs de ces critères.

3.4.4 Utilisation de la voix en simultané

Il s’agit ici, simplement, de combiner la vibration des plis vocaux au jeu conventionnel de la flûte (établissement d’une résonance dans le tube par la production d’une oscillation de l’anche d’air sur le biseau de l’embouchure). John Heiss en fait mention dans son article de 1972 : il affirme que le registre grave est le plus approprié pour pratiquer cette technique (Heiss 1972, p. 156). Pour Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay, la technique peut se pratiquer sur toute l’étendue du registre de la flûte, mais sur une étendue vocale d’au plus deux octaves : avec un peu d’entraînement, le ou la flûtiste peut atteindre le niveau de contrôle nécessaire pour maîtriser la technique (Artaud et Geay 1995, p. 199). Il est possible de faire varier indépendamment la hauteur du son de flûte et celle de la voix chantée ; de plus, on peut moduler l’amplitude relative de l’une par rapport à l’autre. Comme les muscles de l’appareil vocal sont déjà en action lors de la production du son de flûte, notamment lors de l’établissement du vibrato⁴¹, la voix et le son de flûte auront tendance à se moduler respectivement, ce qui peut entraîner certaines difficultés,

⁴⁰Notamment ceux de Robert Dick, de Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay, et de Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott.

⁴¹Voir la section 3.3.1 de ce chapitre.

mais aussi donner lieu à plusieurs phénomènes acoustiques et perceptifs intéressants. De plus, étant donné que le flux d'air sert d'excitateur à la fois pour les plis vocaux et l'anche d'air de la flûte, les timbres créés auront bien souvent une composante bruitée importante (Dick 1987, p. 143-144).

3.4.5 Les sifflements résonants

Cette technique consiste à produire un sifflement avec les lèvres (comme on le ferait sans l'instrument), mais d'en ajuster la hauteur pour qu'elle soit équivalente à l'une des fréquences de résonance du tuyau de la flûte. Ainsi, on sifflera une note correspondant à l'un des partiels appartenant au doigté choisi, et le sifflement sera amplifié par la résonance de l'instrument. Thomas Howell décrit cette technique dans *The Avant-Garde Flute*; il décrit le timbre obtenu comme étant très clair et cristallin (« *very clear and glassy* »), tout en étant distinct de celui des *whistle tones*. Il mentionne également qu'il est possible de siffler directement dans le trou de l'embouchure, ce qui permet d'obtenir un autre type de timbre (Howell 1974, p. 28).

3.4.6 Les sons résultant de la polyphonie

Les sons différentiels et additionnels sont, en quelque sorte, un effet secondaire des techniques polyphoniques décrites plus haut. Ces sons ont une fréquence correspondant à la différence entre les fréquences de deux sons émis simultanément dans le premier cas, et à la somme de ces fréquences dans le second cas. Il est principalement possible de les obtenir en jouant certaines multiphoniques (Bruno Bartolozzi en fournit quelques exemples dans *New sounds for woodwinds* (Bartolozzi 1969, p. 18) ou en émettant simultanément des sons venant respectivement des plis vocaux et de la flûte. Si Thomas Howell insiste sur le potentiel de renforcement acoustique de la technique (dans le cas où les hauteurs sont bien ajustées (Howell 1974, p. 30), Robert Dick indique que deux sons aux fréquences voisines peuvent se moduler entre eux donner lieu à un phénomène de battement. Si les sons différentiels sont généralement plus facilement audibles que les sons additionnels, ces derniers donnent l'impression d'une plus grande énergie contenue dans les hautes fréquences et changent ainsi considérablement le timbre perçu. C'est d'ailleurs ce qui, selon lui, explique la sonorité perçante de plusieurs multiphoniques (Dick 1987, p. 83).

3.5 Modes d'excitation alternatifs impliquant le souffle

Cette section est consacrée aux techniques de jeu qui impliquent l'utilisation du souffle, mais dont le mode d'excitation sonore est différent de celui utilisé habituellement pour produire un son à la flûte. Elle regroupe ainsi les sons de biseau, les sons éoliens, les sons de trompette ou de trombone, les techniques de *jet whistle* et les *whistle tones* à embouchure couverte.

3.5.1 Sons de biseau ou *Whistle tones*

Les sons de biseau sont généralement nommés *whistle tones*, excepté chez Pierre-André Valade et Robert Dick, qui les appellent plutôt, respectivement, « harmoniques sifflées » (Valade 1990, p. 31) et « *whisper tones* » (Dick 1987, p. 140). Le principe en est simple : il s'agit du son causé par l'oscillation du jet d'air sur le biseau de l'embouchure. Bien que les sons de biseau aient une fréquence qui soit déterminée par les propriétés du tuyau de la flûte, ils n'entraînent pas la création d'ondes stationnaires à l'intérieur de celui-ci. Le son résultant est donc très similaire à une onde sinusoïdale dont la fréquence équivaut à celle de l'oscillation se produisant au biseau de l'embouchure. Ainsi, les hauteurs de note des sons de biseau vont correspondre aux partiels qu'il est possible d'obtenir avec un doigté donné. Dans le cas d'un doigté ne créant pas d'ouverture au milieu du tuyau, les fréquences des sons de biseau seront équivalentes à celle d'une série harmonique.

La plupart des auteurs s'entendent sur le fait que l'ajustement du placement des résonateurs vocaux (langue, palais et lèvres – en bref, l'angle du jet d'air ainsi que la voyelle formée à l'intérieur de la bouche) est ce qui permet de choisir un partiel plutôt qu'un autre (Ziegler (s.d.) [site web], Dick 1987, p. 140-141, Offermans 1992, p. 50 et Howell 1974, p. 26-27). Thomas Howell indique qu'en variant le degré de couverture de l'embouchure, il est possible de faire varier la hauteur d'un partiel donné : jusqu'à 10 cents vers le bas, et jusqu'à un demi-ton vers le haut (Howell 1974, p. 26-27). Le degré de pression d'air, lui, doit être suffisamment limité afin d'empêcher l'instrument complet d'entrer en vibration.

3.5.2 Sons éoliens

Dans le cas des sons éoliens (*aeolian sounds* ou *air sounds* en anglais, *Lufttöne* en allemand), les résonances du tuyau sont entendues, mais sans création d'ondes stationnaires ou d'une

oscillation au niveau du biseau de l'embouchure. Elle peut être utilisée seule, ou en combinaison avec le son « standard » de la flûte, afin de lui ajouter une composante bruitée. Comme le décrit Pierre-André Valade,

[I]e SON SOUFFLÉ ou SON ÉOLIEN s'obtient en supprimant le timbre, partiellement ou en totalité, pour ne laisser entendre que le bruit de l'air sur le biseau [...] ou à travers l'instrument [...] Détendez les lèvres en agrandissant le faisceau d'air de façon à le rendre diffus par rapport au biseau de l'embouchure. Vous pouvez mettre la lèvre inférieure légèrement sur les dents (comme en prononçant la lettre « F »). Cette technique permet de doser très souplement le rapport son/souffle dans toutes les dynamiques (Valade 1990, p. 16).

Avec les sons éoliens, il n'est pas possible de changer de partie grâce à une surpression d'air (*overblowing*) comme lors de l'émission d'un son avec lequel il y a création d'ondes stationnaires. Par conséquent, il n'est possible de les exécuter que sur un registre restreint, allant du *si* grave (ou du *do* dans le cas où la flûte ne comprend pas de patte de *si*) au *si bémol* médium. Afin d'obtenir les notes de la deuxième octave, donc pour les notes allant du *ré* au *si bémol* médium, on laissera la clé de l'index gauche ouverte (Artaud et Geay 1995, p. 118).

3.5.3 Sons de trompette et de trombone

Les sons de trompette et de trombone (ou *buzz tones*) correspondent aux cas où le son est produit grâce à une vibration des lèvres entre elles. On peut utiliser cette technique avec ou sans la tête de la flûte : dans le premier cas, la vibration des lèvres aura lieu à l'intérieur du trou d'embouchure, tandis que dans le second cas, on placera plutôt les lèvres dans le trou à l'extrémité supérieure du corps de la flûte. Le degré de pression d'air, la tension des lèvres et le placement des résonateurs à l'intérieur de la bouche sont les principaux facteurs qui permettent de déterminer les propriétés du son qui sera émis (Ziegler (s.d.) [site web], Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 18). Curieusement, la technique des sons de trompette ne fait pas partie du répertoire des auteurs français consultés (notamment Pierre-André Valade et Pierre-Yves Artaud), mais elle avait déjà été décrite au début des années soixante-dix par des auteurs américains d'avant-garde comme John Heiss (1972, p. 154) et Thomas Howell. Ce dernier mentionne d'ailleurs que les *buzz tones* avaient déjà été utilisés par plusieurs compositeurs (Patrick Purswell et Robert Cantrick, par exemple) au moment où il a publié *The Avant-Garde Flute* (Howell 1974, p. 28-29).

3.5.4 Techniques de *Jet whistle*

Le *jet whistle* se définit comme tout son produit par la mise en vibration de l'instrument par l'émission d'un flux d'air directement dans le tuyau de la flûte, en recouvrant le trou de l'embouchure avec les lèvres. Bien que Martin Gümbel, Pierre-Yves Artaud et Pierre-André Valade n'en fassent pas mention dans leurs ouvrages respectifs, la technique n'est pas nouvelle : Heitor Villa-Lobos l'a utilisée dès 1953 dans sa pièce *The Jet Whistle* (Heiss 1972, p. 156). Robert Dick les décrit ainsi : « *Les jet whistle sont des résonances soufflées et à hauteur semi-déterminée du tube de la flûte et varient entre de courts et violents "cris" (desquels ils tirent leur nom) et des sonorités très douces et soutenues, qui rappellent les sons résiduels*⁴² » (Dick 1987, p. 142).

Il détaille aussi quatre paramètres pouvant influencer le volume, la hauteur et le timbre des *jet whistles* :

1. **L'angle de l'embouchure** change la fréquence fondamentale et le contenu spectral du son : une embouchure tournée vers l'extérieur permettra de renforcer les partiels aigus, tandis qu'une embouchure tournée vers l'intérieur renforcera les fréquences graves.
2. **La voyelle formée à l'intérieur de la bouche** ainsi que le **le doigté choisi** auront également une influence sur la hauteur et le timbre du *jet whistle*.
3. Finalement, **la pression d'air** déterminera l'intensité sonore du *jet whistle* et aura une influence sur la hauteur et le contenu fréquentiel du son. De manière générale, une pression d'air accrue donnera lieu à une augmentation de la fréquence fondamentale et renforcera les partiels aigus (Dick 1987, p. 142-143).

Ces changements de paramètres peuvent, dans une certaine mesure, être effectuées de manière dynamique afin de créer plusieurs morphologies sonores distinctes.

3.5.5 *Whistle tones* à embouchure couverte

Ce que nous nommons ici « *whistle tones* à embouchure couverte » correspond en fait à une variante de la technique de *jet whistle*. Il s'agit notamment d'un mode d'émission sonore typique du répertoire sonore du compositeur Salvatore Sciarrino⁴³, encore relativement peu utilisé (chez

⁴²Citation originale : « *Jet whistles are breathy, semi-pitched resonances of the flute's tube, and vary from short, violent 'shrieks' (from which they draw their name) to very soft, sustained sonorities not unlike residual tones* »

⁴³Voir, par exemple, *L'Opera per Flauto*, vol. 1 et 2 (Milan : Ricordi) : les pièces *All'Aure in una lontananza* et *L'Orologio di Bergson* sont basées en bonne partie sur ce mode de jeu.

les auteurs consultés pour la rédaction de ce travail, Carin Levine et Christina Mitropoulos-Bott (2002, p. 17) sont les seules à en faire mention). Il s'agit en effet d'une technique difficile à maîtriser et qui demande un certain entraînement. Matteo Cesari, dans sa thèse consacrée à l'œuvre pour flûte du compositeur italien, décrit la technique et précise que lors de l'émission d'un *jet whistle*,

[il] se crée une vibration de l'air qui permet d'atteindre les harmoniques de la fondamentale doigtée par le musicien. [...] [E]n obstruant le trou de l'embouchure avec la langue et en dosant la pression de l'air, le flûtiste est capable de viser une harmonique bien précise de la fondamentale doigtée. Au contraire de la technique de *whistle tone* avec embouchure ordinaire, cette technique permet un contrôle majeur lors de notes tenues, ainsi qu'un timbre différent. [...] [Il suffit de c]ouvrir l'embouchure en posant la langue sur le bord inférieur et souffler de manière à produire un sifflement à l'intérieur de la flûte. [...] De cette manière, il est possible de produire une série de partiels pour chaque doigté [...] [et] d'obtenir un son avec différents degrés de bruit, allant de quelque chose qui s'apparente au bruit rose à un sifflement très pur (Cesari 2015, p. 30-31).

3.6 Articulations sonores et percussions

3.6.1 Articulations résonnantes et *pizzicato*

De manière générale, en ce qui concerne la flûte, le *pizzicato* – aussi appelé *tongue-click* ou *slap* – désigne une technique percussive exécutée avec la langue, les lèvres ou les deux, sans qu'un flux d'air en provenance des poumons soit impliqué dans la production sonore⁴⁴. Le son résultant est semblable à celui du *pizzicato* des instruments à cordes : l'attaque est très présente, alors que la résonance connaît une extinction très rapide. C'est avec le doigté choisi qu'on pourra changer la hauteur du son émis. Levine et Mitropoulos-Bott distinguent le *pizzicato* de lèvres du *pizzicato* de langue. Dans le premier cas, les lèvres sont pressées l'une contre l'autre et une certaine pression d'air à l'intérieur de la bouche leur est appliquée de manière à provoquer leur ouverture subite. Dans le second cas, la pression d'air est appliquée à la langue maintenue fermement contre le palais ; le dégagement subit de l'air contenu à l'intérieur de la bouche entraîne la production d'un son court à l'attaque bien définie (Levine et Mitropoulos-Bott 2002, p. 24-25). Une troisième variante est décrite par Matthias Ziegler dans la section de son site web consacrée aux techniques percussives : on l'exécute en obstruant l'ouverture entre les lèvres avec la langue et en retirant

⁴⁴Une accumulation de la pression d'air derrière la langue, libérée par l'attaque, est toutefois ce qui permet d'obtenir l'effet percussif recherché.

celle-ci subitement à l'intérieur de la bouche, presque comme si l'on s'apprêtait à cracher dans l'instrument (Ziegler (s.d.) [site web]). En fait, la plupart des consonnes plosives permettent de faire entendre la résonance de l'air à l'intérieur de l'instrument et ce, parce qu'elles entraînent une variation importante et subite de la pression d'air au niveau de l'embouchure. Pierre-Yves Artaud et Gérard Geay mentionnent d'ailleurs qu'il est possible de recréer cet effet avec les syllabes traditionnellement utilisées pour l'articulation des notes à la flûte (« simple : TE, double : TE KE TE KE, ou triple : TE KE TE TE KE TE ») (Artaud et Geay 1995, p. 116).

3.6.2 Techniques de *tongue ram*

Les techniques de *tongue ram* se distinguent des *pizzicati* en ce qu'elles nécessitent une embouchure recouverte (les lèvres se plaçant à la périphérie du trou de l'embouchure). De plus, le flux d'air créant une pression à l'intérieur de la bouche n'est plus libéré mais bien subitement bloqué par la langue ou les lèvres. Ainsi, un jet d'air court et rapide est subitement interrompu par une action de la langue (Ziegler (s.d.) [site web]) ; la percussion ainsi créée donne lieu à une résonance amplifiée par le tuyau de la flûte. La manière la plus habituelle d'exécuter cette technique consiste à souffler directement dans le trou de l'embouchure et d'obstruer rapidement celui-ci avec la langue. Il est aussi possible, toujours en maintenant le trou de l'embouchure couvert, d'obstruer le flux d'air en plaçant la pointe de la langue sur le palais, derrière les incisives supérieures. Ceci est réalisable en inspirant et en expirant, du moment que les muscles de la langue sont bien activés. Le son résultant aura une fréquence se situant environ une septième (mineure ou majeure, selon les cas) sous la fréquence fondamentale correspondant au doigté choisi (Valade 1990, p. 10).

3.6.3 Excitation sonore par des vibrations de la langue ou de la gorge

Ce mode de jeu s'apparente au *fluttermouth* ; dans ce cas, le trou de l'embouchure est recouvert, et la vibration – qu'elle se produise au bout de la langue (*fluttermouth* de langue) où près de la luette (*fluttermouth* de gorge) – se produit directement à l'intérieur du tuyau de l'instrument, sans qu'il y ait création d'ondes stationnaires causées par une oscillation au niveau du biseau. Bien que l'émission d'une vibration près de la luette fournisse une excitation suffisante à la production d'un son dans l'instrument, la vibration du bout de la langue donne de meilleurs

résultats. La hauteur du son, qui comprend une grande part de composantes bruitées, dépend de la vitesse de la vibration. Selon Thomas Howell, la régulation de la vitesse du *flutter* permet de l'ajuster aux résonances de l'instrument et d'en optimiser le renforcement acoustique (Howell 1974, p. 28). L'effet obtenu peut s'apparenter au bruit d'un moteur, ou d'un ballon de baudruche se dégonflant.

3.6.4 Percussions de clés

Bien simplement, la percussion d'une ou plusieurs clés contre le corps de la flûte agit comme un excitateur qui fait ressortir les résonances du tuyau. Cette excitation n'est pas continue et donne lieu à un son court et instantané. Ensuite, les propriétés du son résultant dépendent du doigté choisi et du ou des doigts qui frappent. Comme le dit Matthias Ziegler dans son site web : « *Des doigtés différents donneront des timbres (couleurs) et des dynamiques différents pour une même longueur de tube*⁴⁵ (Ziegler (s.d.) [site web]). » Les percussions de clés peuvent être utilisées seules, ou pour « *colorer certaines attaques* » (Valade 1990, p. 15), ainsi que pour articuler tous types de sonorités, en incluant les multiphoniques, les *whistle tones*, les sons résiduels et les *jet whistles* (Dick 1987, p. 136). Le degré de couverture de l'embouchure influence la hauteur du son produit : une embouchure ouverte produira une note se rapprochant de celle normalement associée au doigté choisi, tandis qu'une embouchure complètement recouverte donnera lieu à des résonances dont la fréquence se situe environ une septième majeure sous celle de la note habituelle. Pierre-André Valade souligne que « *[p]lus la colonne d'air est longue à l'intérieur du tube [...], plus le résultat sonore est perceptible* » (Valade 1990, p. 15). Afin de maximiser la résonance, Robert Dick suggère, autant que possible, d'utiliser la clé de *sol* (annulaire de la main gauche) comme élément percussif, du fait qu'elle soit située au centre du tube. De plus, il affirme que la voyelle formée à l'intérieur de la bouche peut avoir une influence sur le contenu spectral du son résultant : les résonances du conduit vocal pourront ainsi être perceptibles dans les hautes fréquences (Dick 1987, p. 136-137).

⁴⁵Citation originale : « *Different fingers produce different tone colours and dynamics with the same length of tube.* »

3.7 Modifications structurelles de l'instrument

En dehors de l'accord, pour lequel on modifie la position de la tête de la flûte et ainsi, la longueur du tube, les modifications structurelles apportées à l'instrument lors du jeu standard sont peu nombreuses. Toutefois, des compositeurs et des instrumentistes ont expérimenté de ce côté afin de trouver de nouvelles sonorités.

3.7.1 Utilisation de parties séparées de l'instrument

Une première possibilité de modification structurelle consiste à ne pas utiliser toutes les parties de la flûte. Dans le cas où l'on jouerait avec la tête seulement, la plupart des modes de jeu demeurent réalisables (si l'on exclut, bien entendu, les percussions de clés et les autres effets pour lesquels le mécanisme du corps est nécessaire). Il est possible de jouer avec le tube ouvert, d'en obstruer l'extrémité avec la paume de la main (dans ce cas, la hauteur du son se situe à plus ou moins une octave sous celle obtenue avec un tube ouvert) ou d'insérer un doigt dans l'orifice situé à l'extrémité de la tête. En modifiant la position du doigt, on peut arriver à moduler la hauteur du son obtenu, un peu comme lorsqu'on joue d'une flûte à coulisse.

Il est aussi possible de jouer sans la tête de la flûte ; dans ce cas, le biseau de l'embouchure est remplacé par le rebord du tuyau à l'extrémité supérieure du corps de la flûte. La sonorité obtenue se rapproche de celles des flûtes obliques orientales de type *ney*, et les rapports de hauteur entre les notes sont modifiés. En effet, comme la tête de flûte n'est plus comptée dans le calcul de la longueur du tube, les proportions à la base du placement des trous sur l'instrument ne sont pas conservées.

3.7.2 La Matusiflute

Un autre exemple de modification structurelle de l'instrument est la *Matusiflute* de Matthias Ziegler. Le corps de la flûte est conservé tel quel, mais la tête est percée d'un trou supplémentaire, qui lui est recouvert d'une membrane. La tension de cette membrane est régulée par un mécanisme que le ou la flûtiste contrôle avec son pouce droit (description extraite de Ziegler 2010 [site web]). La mise en vibration de la membrane permet d'accéder à une plus grande variété de timbres et d'augmenter le rayonnement acoustique de l'instrument⁴⁶.

⁴⁶Il est possible de visionner une démonstration de la Matusiflute en ligne (voir Ziegler 2010 [vidéo YouTube]).

4 Classification des techniques de jeu à la flûte

Dans les sections précédentes, des précisions sur la structure et le fonctionnement acoustique de la flûte ont été fournies et l'ensemble des techniques de jeu étendues a été présenté. Afin d'unifier ce portrait d'ensemble, nous proposons ici une classification des techniques de jeu basée sur la typologie du geste instrumental de Claude Cadoz et Marcelo M. Wanderley (2000) d'une part, et sur le système de classification organologique de Erich von Hornbostel et Curt Sachs (1914) d'autre part. En ce qui concerne la typologie du geste de Cadoz et Wanderley, certaines notions proposées par les auteurs nous permettront de dégager les différentes fonctions que peuvent avoir les techniques étendues dans le processus de production sonore. Quant au système de Hornbostel et Sachs, il nous permettra de classifier les différents modes d'émission sonore de la flûte, qui pourra ainsi appartenir à différentes catégories d'instruments. Finalement, nous fournirons quelques explications de nature acoustique sur le fonctionnement des principaux modes d'émission sonore, puis nous présenterons l'ensemble des articulateurs dont l'action est à la base du geste producteur de son chez les flûtistes et ce, pour chacune des catégories de modes de jeu qui auront été énumérées.

4.1 Fonctions des techniques étendues

4.1.1 Typologie du geste instrumental de Cadoz et Wanderley

Afin de procéder à une première classification des techniques de jeu à la flûte, nous emprunterons certaines notions tirées de l'article « Gesture – Music » de Claude Cadoz et Marcelo M. Wanderley (2000). Nous nous intéresserons particulièrement à leur typologie du geste instrumental, qui comporte trois catégories applicables aux gestes des musiciens. Par définition, un geste instrumental doit comprendre une interaction avec un objet physique – l'instrument – et donner lieu à la production d'un phénomène physique résultant de cette interaction, qui deviendra la base d'un message à communiquer ; en bref, le geste devra donner lieu à la production d'un phénomène sonore et musical.

Les trois fonctions des gestes instrumentaux sont les suivantes :

- Le *geste exciteur* : il s'agit du geste qui permet de fournir l'énergie présente dans le phénomène sonore perçu. Il peut être instantané ou continu.
- Le *geste de modification* : ce geste est en lien avec les propriétés physiques de l'instrument, et affecte la relation qui existe entre le geste exciteur et le son résultant. Le geste de modification peut être structurel (ce qui correspond à une modification dans la construction de l'instrument) ou paramétrique (dans ce cas, on assiste à une modification des paramètres sonores corrélée au geste effectué).
- Le *geste de sélection* : il se présente chaque fois que l'instrumentiste doit procéder à un choix entre plusieurs éléments similaires et propres à la technique de l'instrument. Il se distingue des deux précédents en n'étant pas responsable de la production d'énergie et en n'ayant pas d'influence sur les paramètres du son résultant durant son émission (Cadoz et Wanderley 2000, p. 79-80).

Ces trois fonctions du geste instrumental ont été appliquées à la flûte par Cléo Palacio-Quintin dans son article « Composition interactive : du geste instrumental au contrôle de l'électronique dans Synesthesia 4 : Chlorophylle ». Comme elle le souligne, il peut exister une certaine ambiguïté entre les définitions respectives des gestes de modification et de sélection : tout dépend si l'on se place du point de vue de l'instrumentiste ou du point de vue de l'acoustique. En effet, la sélection d'un doigté peut être évidemment considérée comme un geste de sélection par l'instrumentiste, mais constitue en fait un geste de modification du point de vue de l'acoustique, parce que deux doigtés différents vont modifier les propriétés du tuyau résonnant (Palacio-Quintin 2012, p. 29-30). Étant donné que, dans cet exemple, le choix du doigté se fait avant le début de l'émission sonore, nous allons considérer qu'il s'agit d'un geste de sélection. Cela dit, on pourra considérer le choix du mode de production sonore également comme un geste de sélection.

4.1.2 Types de techniques étendues d'après leur fonction

En partant de ces notions, nous allons définir trois catégories de techniques de jeu. Nous les appliquerons au cas de la flûte ; toutefois, cette première classification pourrait tout à fait être utilisée pour les techniques de jeu d'un autre instrument.

Le premier type de technique correspond au choix du geste excitateur ; il désigne toutes les techniques en lien avec le choix du mode de production sonore. Par exemple, on peut choisir de jouer un son unique, une multiphonique, un *whistle tone*, un son éolien, un *jet whistle*, une percussion de clés, un *tongue ram* ou une articulation résonnante. Ces techniques constituent toutes différentes façons de faire entrer l'instrument en vibration, donc de fournir l'énergie nécessaire à la production d'un son.

Le deuxième type de technique désigne les gestes de sélection, ou plutôt, les choix effectués avant le début de la mise en vibration de l'instrument. Les techniques étendues faisant partie de cette catégorie sont habituellement celles qui ont une influence sur la hauteur du son, sur le timbre ou sur ces deux éléments, comme le choix d'un doigté ou le choix de produire un timbre particulier en modifiant certains paramètres gestuels *a priori*, comme la position d'embouchure.

Le troisième et dernier type de technique désigne les gestes de modification paramétrique effectués durant le phénomène d'émission sonore. En d'autres mots, il s'agit de tous les types de modulations et d'altérations périodiques ou apériodiques du son. Les techniques de vibrato, de *smorzato* et de *fluttermouth* en sont de bons exemples.

4.2 Classification organologique des gestes excitateurs

4.2.1 Types de gestes excitateurs

Si les deux dernières catégories exposées plus haut sont assez faciles à appréhender, la première des trois reste toutefois complexe et nécessite une étape de classification supplémentaire. Nous avons vu plus tôt que les gestes excitateurs, tels que définis par Cadoz et Wanderley, peuvent être continus ou instantanés, tout dépendant du type d'énergie fournie. De plus, du point de vue du fonctionnement acoustique de l'instrument, on peut distinguer deux rôles dans la production d'un phénomène sonore : l'excitateur (l'élément responsable de la mise en vibration de l'instrument) et le résonateur (Guillaume 2006, p. 55).

Pour la plupart des modes de production sonore à la flûte, les gestes excitateurs seront soit continus (dans les cas où le souffle en provenance des poumons constitue la source d'énergie), soit instantanés (dans le cas des techniques percussives, où l'excitation est nécessairement de très courte durée). Cependant, il existe des situations où le geste d'excitation se produit à l'extérieur

de l'instrument : c'est le cas notamment des techniques de *pizzicato* et d'articulations résonnantes qui n'impliquent pas la production d'un son continu. Dans ces cas, la flûte sert simplement de résonateur. Ainsi, pour résumer, nous obtenons trois sous-catégories de gestes excitateurs : les gestes continus, les gestes instantanés et les cas où la flûte devient un résonateur.

4.2.2 Système de classification organologique de Hornbostel et Sachs

La définition de ces trois sous-catégories peut être renforcée en ayant recours aux notions à la base du système de classification d'Erich M. von Hornbostel et Curt Sachs, expliqué dans leur article de 1914 intitulé « Systematik der Musikinstrumente : Ein Versuch ». Désireux de mettre en place un système qui tienne à la fois compte de la facture instrumentale et des modes de mise en vibration des instruments, Hornbostel et Sachs ont défini quatre grandes familles d'instruments de musique : les idiophones, les membranophones, les cordophones et les aérophones. L'identification des familles, des groupes et des sous-catégories d'instruments est basée sur le système de notation décimale de Dewey, qui permet d'introduire de nouvelles distinctions entre les instruments sans avoir à redéfinir sans cesse la classification déjà établie.

Évidemment, on pourra avancer qu'une flûte reste une flûte, peu importe le mode de jeu sélectionné par l'instrumentiste, et il pourra sembler à certain.e.s bizarre que l'on cherche à décortiquer les sons de flûte en effectuant ce genre de classification. Cependant, la classification des modes d'excitation sonore de la flûte d'après le système Hornbostel-Sachs nous semblait pertinente, parce qu'elle permet d'établir des analogies entre des techniques de production sonore qui peuvent sembler abstraites aux non-initiés d'une part, et des instruments qui sont familiers à la plupart des gens d'autre part. Ainsi, le fait de rattacher la diversité des sons de flûte à différentes catégories permet de donner une première idée du timbre résultant des différentes techniques utilisées.

Dans le cadre de notre classification des techniques de jeu à la flûte, ce sont les familles des aérophones et des idiophones qui nous intéressent particulièrement. Un aérophone, communément appelé « instrument à vent », est un instrument pour lequel l'émission d'une colonne d'air est l'agent principal de mise en vibration de l'instrument. Le geste producteur de son des aérophones correspond au geste excitateur continu tel que décrit par Cadoz et Wanderley. Quant aux idiophones, ils sont des instruments – souvent à percussion – dont la mise en vibration se

fait à partir de leur matériel même et dont les propriétés sonores sont définies par la rigidité et l'élasticité du matériel (Hornbostel et Sachs 1914, p. 569-570). Le geste excitateur des idiophones est, lui, généralement instantané.

4.2.3 Classification organologique des gestes excitateurs de la flûte

Les gestes excitateurs de la flûte sont donc assimilables à trois catégories : les aérophones (gestes continus), les idiophones (gestes instantanés) et les résonateurs (lorsque le geste d'excitation se produit à l'extérieur de l'instrument). Dans la majorité des cas, la flûte est utilisée comme un aérophone ; c'est d'ailleurs sa vocation première. Si l'on adopte le système de notation décimale de Dewey tel qu'utilisé par Hornbostel et Sachs, il s'agit alors d'un instrument à vent (l'air en vibration est contenu à l'intérieur de l'instrument - 42).

Lors de son utilisation conventionnelle et pour les techniques de jeu telles que les multiphoniques, les sons éoliens et les *whistle tones*, la flûte est un aérophone à anche d'air sans conduit⁴⁷ (421) ainsi qu'une flûte traversière à tuyau unique comprenant des trous pour les doigts (421.121.12). Dans le cas particulier où la flûte serait jouée sans sa tête, à la manière des flûtes orientales, elle devient une flûte à bouche terminale isolée et ouverte, comprenant des trous pour les doigts (421.111.12). Si la flûte traversière est utilisée comme instrument à anche lippale, elle devient une trompette tubulaire à embouchure latérale (432.122), mais elle peut également être apparentée aux trompettes à clés (423.21)⁴⁸.

Il existe des cas où la flûte devient un instrument pratiquement inclassable. En ce qui concerne la technique qui consiste à faire entrer l'instrument en résonance par une vibration de la langue dans le trou de l'embouchure, la flûte pourrait devenir un cas spécial de la trompette à embouchure latérale. Il serait toutefois possible de créer une nouvelle catégorie : avec ce mode de jeu particulier, la flûte pourrait être qualifiée d'aérophone à anche linguale. Enfin, la flûte demeure un aérophone dans le cas des *jet whistle*, mais devient avec cette technique un objet encore non défini par la classification de Hornbostel et Sachs, à moins de l'apparenter au corrugaphone, un tuyau ondulé et souple que l'on tourne sur son axe afin de le faire siffler en induisant une différence de pression

⁴⁷La traduction française des termes utilisés par les auteurs Hornbostel et Sachs est tirée de l'article Wikipédia recensant les aérophones présents dans le système de classification (voir Wikipédia 2018 [site web](d)).

⁴⁸Il est à noter que dans la classification de Hornbostel et Sachs, les trompettes tubulaires font partie de la catégorie des trompettes naturelles et ne comprennent donc pas de dispositif pour modifier la hauteur sur le corps de l'instrument.

d’air à l’intérieur. Mais dans le cas de ces deux modes de production sonore, étant donné la façon inusitée de faire entrer l’instrument en vibration, on pourra aussi classer la flûte dans la catégorie des aérophones inclassables (43)⁴⁹.

Par ailleurs, les *tongue rams* avec obturation du trou de l’embouchure par la langue ainsi que la technique consistant à frapper l’extrémité ouverte de la tête de flûte avec la paume de la main constituent des cas particuliers de la famille des aérophones, même s’il s’agit de gestes excitateurs instantanés. Dans les deux cas, la flûte devient un aérophone plosif (413) : le phénomène sonore est causé par une simple compression de l’air, suivie d’un relâchement. Les autres cas de gestes excitateurs instantanés sont toutefois assimilables à la famille des idiophones. Dans le cas des percussions de clés, la flûte devient un idiophone frappé consistant en un tube individuel (111.231) et appartient en cela à la sous-catégorie des idiophones à percussion (111.2).

Finalement, pour les techniques de *pizzicato*, de *tongue ram* sans obturation du trou de l’embouchure et pour les articulations résonantes, la flûte devient un simple tuyau résonnant, puisque le geste excitateur se produit à l’extérieur de l’instrument. La flûte est donc utilisée comme résonateur.

⁴⁹Cette catégorie ne fait pas partie de celles qui sont énumérées dans l’article original. On la retrouve toutefois dans la page Wikipédia en langue anglaise consacrée au sujet. Voir Wikipédia 2018 [site web](c).

	Type de vibration	Type de structure	Type de résonance	Mode de jeu
aérophone	anche d'air	flûte complète	avec ondes stationnaires	son à résonance unique
	anche lippale	flûte sans tête	avec résonances partielles	son à résonances multiples
	anche linguale	tête seule	avec ondes stationnaires	sons de biseau (<i>whistle tones</i>)
	aérophone plosif	flûte complète	avec résonances partielles	résonance du tuyau (sons éoliens)
	jet whistle	flûte sans tête	avec ondes stationnaires	flûte à encoche (<i>ney</i>)
		flûte complète	avec ondes stationnaires	son à résonance unique
		flûte sans tête	avec résonances partielles	sons de biseau (<i>whistle tones</i>)
		flûte complète	avec ondes stationnaires	résonance du tuyau (sons éoliens)
		flûte complète	avec résonances partielles	trompette avec embouchure
		tête seule	avec ondes stationnaires	trompette sans embouchure
idiophone	idiophone frappé	flûte complète	vibration de la langue dans le trou de l'embouchure	
		flûte sans tête	tongue ram avec obstruction du trou de l'embouchure	
		flûte complète	percussion de l'extrémité de la tête avec la paume de la main	
résonateur		flûte complète	jet whistle	
		flûte sans tête	percussions de clés (avec tête)	
	résonateur	flûte complète	percussions de clés (sans tête)	
			tongue ram sans obstruction du trou de l'embouchure	
			pizzicato	
			consonnes diverses / articulations sans souffle	

TABLE 3.2 – Tableau-résumé des différents modes d'excitation sonore à la flûte

4.3 Fonctionnement acoustique de cinq modes d'excitation alternatifs

Dans la première de ce chapitre (Cf. section 2), les explications concernaient la manière conventionnelle de jouer de la flûte traversière, où la production sonore est assurée par une combinaison de l'oscillation du jet d'air se produisant sur le biseau de l'embouchure et des résonances du tuyau de la flûte. Pour conclure cette section, avant d'aborder le sujet des articulateurs permettant de moduler les paramètres de l'expression sonore, il convient de fournir quelques explications supplémentaires sur certains modes d'excitation sonore alternatifs, soit les multiphoniques, les *whistle tones* ou sons de biseau, les sons éoliens, les sons de trompette (aérophone à anche lippale) et les *jet whistles*.

4.3.1 Multiphoniques

Comme on l'a vu, la notion de spectre d'impédance permet de constater que pour la plupart des doigtés (ou combinaisons de trous ouverts et fermés), l'émission de plusieurs notes à des hauteurs distinctes est possible. Les doigtés correspondant à des hauteurs près de l'échelle tempérée résultent d'une optimisation de la réponse acoustique de l'instrument d'une part, et de l'ergonomie de l'instrument d'autre part. Cependant, certains de ces doigtés ainsi que d'autres plus inhabituels ont pour propriété le fait d'avoir deux, trois ou quatre pics minimums d'impédance assez bas, pics dont les rapports de fréquence ne s'inscrivent pas nécessairement dans un spectre harmonique. En modifiant les propriétés du jet d'air, l'instrumentiste peut arriver à émettre les sons correspondant à plusieurs de ces pics d'impédance à la fois :

Si l'instrumentiste utilise un jet d'air large, il est possible d'exciter deux fréquences simultanément, donnant deux notes, mais l'effet ne s'arrête pas là. Si les deux notes de base réagissent en retour au jet d'air en raison d'une interaction non linéaire avec le tube de la flûte, cette interaction générera [d'autres] excitations à des fréquences qui correspondront aux multiples de la somme et de la différence entre les deux fréquences de base $nf_1 \pm mf_2$, où n et m sont de petits nombres entiers. Ce phénomène ne se produit que lorsque les deux fréquences de bases sont suffisamment loin d'être en rapport harmonique (entier)⁵⁰ (Wolfe et al. 2001, p. 140).

4.3.2 Whistle tones (ou sons de biseau)

Les *whistle tones* correspondent en fait aux sons de biseau, qui sont à l'origine de la vibration sonore de la flûte. Dans son chapitre consacré aux instruments de la famille des bois, Arthur Benade rappelle que « *[l']influence du tube domine celle de l'ancre chez tous les bois* » et que dans le cas de la flûte, « *"l'ancre" commandée en vitesse ne fonctionne qu'aux fréquences pour lesquelles le tube produit une variation maximale en vitesse au niveau de l'ancre* » (Benade 2000a, p. 54-55), c'est-à-dire aux fréquences correspondant à des minimums d'impédance. Ainsi, les sons de biseau ne seront émis qu'aux fréquences correspondant aux résonances du tube pour un doigté donné. Pour un doigté dont les résonances se rapprochent des multiples entiers de la

⁵⁰Citation exacte : « *If the player uses a wide air jet, then it is possible to excite both resonances simultaneously, giving two notes, but the effect does not stop there. The two basic tones react back on the air jet which, because its interaction with the flute tube at the embouchure lip is non-linear, generates excitations at frequencies that are multiple sum or difference frequencies $mf_1 \pm nf_2$ where n and m are small integers. This can happen only if the two basic frequencies are not very close to being in an harmonic (small integer) relationship.* »

fréquence fondamentale de résonance, les *whistle tones* émis sembleront donc provenir d'un spectre harmonique.

Michèle Castellengo et ses collaborateurs décrivent ainsi la nature des *whistle tones* :

Le transitoire de départ, au moment où le son naît, est fondamental parce qu'il définit le caractère acoustique de la flûte. Si on analyse la succession d'événements se produisant durant les premières millisecondes d'une attaque sonore, on trouvera un son très aigu et instable, combiné à une quantité plus ou moins grande de bruit. Il s'agit du son de biseau [*edge tone*] produit par l'oscillation du jet [d'air,] comme s'il était détaché du tube. Le rapport entre l'oscillation du jet et la vibration de l'air dans le tube s'établit ensuite, et les différentes harmoniques commencent à apparaître progressivement. [...] Le fait de traiter le son de biseau d'une manière particulière permet l'émission des « *whistle tones* »⁵¹ (Castellengo et al. 1994, p. 223).

4.3.3 Sons éoliens

Si le son de biseau est à l'origine du *whistle tone*, ce sont les résonances du tube qui sont à l'origine des sons éoliens. Castellengo et ses collaborateurs nomment ce son « son du tube » (*tube sound*) et le comparent à celui d'un ballon qui se dégonfle. Bien qu'il n'y ait pas de création d'ondes stationnaires dans ce cas, et donc pas de fréquence définie qui résonne, ce type de son est en quelque sorte « coloré » par les partiels du tuyau, ce qui lui donne une hauteur définie. C'est aussi cette coloration spectrale du bruit qui explique que l'on perçoive un son diffus et d'intensité faible à la fréquence du premier partielle lorsque l'instrumentiste sélectionne un partielle d'ordre plus élevé à partir du même doigté (Castellengo et al. 1994, 223).

4.3.4 Sons de trompette (aérophone à anche lippale)

Ici, comme pour les cuivres, la mise en résonance de l'instrument (la création d'ondes stationnaires) est provoquée par la vibration des lèvres, l'une contre l'autre. Autrement dit, c'est une anche lippale qui produit la vibration à l'origine du son. Dans le cas de la production sonore conventionnelle à la flûte, c'est une anche d'air qui produit la vibration. Cette anche est dite faible, parce que c'est la colonne d'air à l'intérieur de l'instrument qui déterminera ses fréquences de vibration. Par contre, dans le cas de l'anche lippale, l'anche est dite forte, parce que les lèvres sont

⁵¹Citation originale : « *The starting transient, the moment in which the sound is born, is fundamental for it defines the acoustic character of the sound of the flute. If the succession of events which occur during the initial milliseconds of a sound attack are analysed one finds first of all a very shrill, unstable sound with a greater or lesser degree of extraneous noise. This is the edge tone produced by the oscillation of the jet as if it were detached from the tube. The relationship between the oscillation of the jet and the vibration of the air in the tube is then established, and the various harmonics begin to appear progressively. [...] The treatment of the edge tone in a particular way permits the production of "whistle tones".* »

plus massives que l'air contenu dans l'instrument. Ainsi, c'est la régulation de la tension dans les lèvres qui permet de sélectionner un des modes de résonance de la colonne d'air contenue dans l'instrument (Benade 2000b).

Par ailleurs, il est aussi possible, avec un peu d'entraînement, d'arriver à jouer la note pédale correspondant à un doigté donné, comme sur les instruments de la famille des cuivres. La fréquence de la note pédale est déterminée par les résonances du tube au doigté donné. En combinant celles-ci, on arrive à trouver la fondamentale manquante du spectre harmonique qu'elles forment. Cette fondamentale manquante, qui ne correspond pas à une résonance propre du tube, correspond à la fréquence de la note pédale. Comme l'explique Joe Wolfe,

[ce] qui se passe, est que les résonances plus élevées (2e, 3e, 4e partiels et ainsi de suite) se combinent pour aider les lèvres à établir une résonance non linéaire à la fréquence de la fondamentale manquante [du spectre]. [...] Techniquement, il s'agit du processus que les physiciens et ingénieurs appellent *mode locking*, et qui est un effet caractéristique des oscillateurs non linéaires⁵² (Wolfe (s.d.) [site web](a)).

Par contre, contrairement aux instruments de la famille des cuivres, dont le tube est considéré ouvert aux deux extrémités en raison du design de l'embouchure, la flûte mise en vibration de cette manière correspond à un tube dont une des extrémités serait fermée. Cette configuration a trois conséquences : premièrement, il n'est possible de faire vibrer l'instrument qu'aux fréquences des partiels d'ordre impair (un peu comme sur la clarinette). Deuxièmement, la hauteur des sons résultants ne correspondra pas au doigté sélectionné, mais plutôt aux partiels d'un spectre dont la fréquence de résonance principale se situe une septième (mineure ou majeure, selon le doigté et la configuration du tube) sous celle de la note correspondant au doigté sélectionné. Et troisièmement, il sera plus difficile d'atteindre les notes pédales, étant donné que les résonances qui se combinent pour aider les lèvres en vibration à l'atteindre sont moins nombreuses que dans un spectre où les partiels d'ordre pair sont également présents.

4.3.5 Jet whistles

Du point de vue organologique, comme on l'a vu plus haut, le *jet whistle* est assez difficile à classifier. Toutefois, lorsqu'il s'agit d'expliquer le phénomène acoustique qui se produit lorsqu'on

⁵²Citation exacte : « What happens here is that the higher resonances (2f, 3f, 4f etc) combine to help the lips establish a nonlinear vibration at the frequency of the missing fundamental f. [...] Technically, this is the process that physicists and engineers call mode locking, and is an effect characteristic of nonlinear oscillators. »

exécute cette technique, une solution possible est d'examiner le fonctionnement des tuyaux ondulés chantants (*singing corrugated pipes* en anglais). Ces tuyaux se caractérisent par la présence de renflements circulaires situés à intervalles réguliers sur leur surface interne. Le principe à la base des instruments de cette famille consiste à faire entrer de l'air à l'intérieur du tube à une vitesse suffisante, par exemple en le faisant tournoyer dans les airs. Cela a pour effet de créer des tourbillons (vortex) d'air à chacune des encoches internes du tuyau, et ainsi de créer des résonances à l'intérieur de celui-ci.

Afin de poursuivre cette explication, il convient de se rappeler que les trous la flûte traversière moderne sont surmontés d'une cheminée sur laquelle viennent se poser les tampons des clés lorsque vient le moment de les fermer. La présence de ces cheminées suffit à recréer l'effet des ondulations ou encoches présentes dans les tubes chantants. Ainsi, quand l'instrumentiste couvre l'embouchure pour souffler directement dans le tuyau avec une certaine vélocité, des vortex d'air se créent à l'intérieur comme dans le cas des tuyaux ondulés.

Dans son article « Singing corrugated pipes », Frank Crawford explique que les irrégularités du tuyau sont essentielles à la production du sifflement :

Les ondulations [du tube] sont essentielles. Un tube de plastique lisse dont la longueur et le diamètre sont équivalents à ceux du tube ondulé ne [sifflera] pas si on le fait tournoyer, ou si on le tient à la fenêtre d'une voiture en mouvement. On entend bel et bien la fondamentale, avec un son très semblable au vrombissement faible et à la fondamentale bruitée émise par le tube ondulé dans les mêmes circonstances⁵³ (Crawford 1974, p. 279).

À cela, il ajoute que selon lui, le sifflement se produit lorsque la vélocité de l'air entrant à l'intérieur du tube produit une fréquence de perturbation au niveau des ondulations qui équivaut à l'un des modes de résonance du tube. C'est alors que l'on entendra un sifflement à la fréquence de ce mode de résonance.

Enfin, Crawford fait la distinction entre deux types de sons qu'il est possible d'obtenir avec un tube chantant : le sifflement (*singing* en anglais), qui consiste en un son pur dont l'étendue spectrale est relativement étroite, et le vrombissement (*roaring* en anglais), qui s'apparente à un

⁵³Citation originale : « *The corrugations are essential. A smooth plastic tube of the same length and diameter as the corrugated tube does not sing when you swing it, nor when you hold it outside a moving car's window. The fundamental does roar, sounding very much like the faintly-roaring, non-singing fundamental emitted by the corrugated tube under the same circumstances.* »

bruit de souffle dont l'étendue spectrale est très large⁵⁴ (Crawford 1974, p. 278-280). Pour la flûte, il s'agit précisément de la différence entre les *whistle tones* à embouchure couverte (déscrits à la section 3.5.5), produisant un sifflement très pur qui correspond à l'un des partiels du tuyau, et les *jet whistle* bruités, dont la sonorité s'étend du son résiduel très doux (vitesse d'air réduite) aux sons plus violents et criards (grande vitesse d'air).

4.4 Composantes du geste et définition des paramètres sonores

Une fois le geste excitateur – le mode de production sonore – choisi, il convient d'apporter quelques précisions du côté des gestes de sélection et de modification. Pour ce faire, nous ferons appel à un concept emprunté à la linguistique phonétique, celui d'*articulateur*. Un articulateur est, en phonétique, tout organe qui participe activement à l'émission des sons de la parole⁵⁵. Par extension, en termes de technique instrumentale, un articulateur pourrait être défini comme étant tout organe qui participe activement à l'émission des sons instrumentaux. Cette nouvelle définition ramène en fait à l'idée de geste instrumental ; toutefois, dans le cas présent, nous décrirons les articulateurs de manière à détailler plus spécifiquement l'ensemble des gestes de sélection et de modification qui font partie du jeu instrumental.

En premier lieu, le système respiratoire (par une action combinée des muscles de l'abdomen et du thorax ainsi que du diaphragme) est responsable, dans la majorité des cas, de fournir l'énergie nécessaire à l'excitation sonore. Le flux d'air ainsi dirigé vers l'extérieur passe ensuite par le larynx et les plis vocaux (qui ne vibrent pas, la plupart du temps), puis par la cavité buccale pour s'échapper par les lèvres. La position des résonateurs vocaux à l'intérieur de la bouche, celle de la langue ainsi que la position et le degré d'ouverture des lèvres auront ainsi un rôle à jouer dans la définition du timbre sonore produit. Finalement, la position des bras et des mains déterminera celle de l'instrument, posé sur le menton ou de la flûtiste, et les doigts actionneront les clés du mécanisme.

La position et l'action des articulateurs décrits au paragraphe précédent, ainsi que l'accord et la structure de l'instrument, auront une influence directe sur plusieurs paramètres du phénomène

⁵⁴Citation originale : « Singing consists of a pure tone of relatively narrow bandwidth. Roaring consists of a breathy, noisy tone of very wide bandwidth. »

⁵⁵Définition tirée du *Dictionnaire Larousse en ligne*, repéré le 25 juin 2018 à l'URL <<http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/articulateur/5559>> (s.d.).

sonore. En termes musicaux et perceptifs, il s'agit de la hauteur (déterminée par la fréquence fondamentale et la répartition de l'énergie acoustique à travers le spectre), de la durée (qui dépend de l'entretien de la source d'énergie), de l'intensité sonore et du timbre. Cette dernière notion est multidimensionnelle : le geste de sélection ou de modification peut avoir une influence sur plusieurs paramètres du timbre tels que le rapport d'intensité entre les partiels, le rapport de fréquences entre les partiels, la présence de formants, le rapport son/bruit et les transitoires d'attaque, pour ne nommer qu'eux.

4.5 Modes d'excitation, articulateurs et paramètres sonores

Pour résumer la notion d'articulateur sonore et apporter un complément explicatif au fonctionnement des différents modes d'excitation de la flûte, on trouvera ici la liste des paramètres propres aux articulateurs pour chaque type de geste excitateur, ainsi que les paramètres sonores sur lesquels ils ont un effet. Ces informations se basent sur mon expérience en tant qu'instrumentiste et ont été acquises par essais et erreurs. Des expérimentations supplémentaires, suivant une méthodologie rigoureuse, seraient nécessaires afin de valider ces explications sur le plan scientifique. Par contre, en ce qui concerne la flûte en tant qu'aérophone à anche d'air produisant une résonance complète (son standard), les informations fournies ont été complétées à partir de la section consacrée à la flûte du livre de Jürgen Meyer (Meyer 2009, p. 64-69).

4.5.1 Aérophone à anche d'air (son standard)

- **Position de l'instrument sur le menton** (action des mains et des poignets) : Affecte la fréquence fondamentale, les caractéristiques spectrales et le rapport bruit/son.
- **Degré de couverture du trou de l'embouchure** : Action directe sur la longueur effective du tuyau, donc sur la fréquence fondamentale et la réponse acoustique du tuyau.
- **Distance lèvres-embouchure et angle du jet d'air** : Action sur les caractéristiques de l'oscillation au niveau du biseau, donc sur la fréquence fondamentale, les caractéristiques spectrales et le rapport bruit/son.
- **Degré et forme de l'ouverture des lèvres** : Action sur la vitesse du jet d'air et donc sur les caractéristiques de l'oscillation au niveau du biseau. Permet de sélectionner les partiels qui seront émis et d'agir sur les caractéristiques spectrales et le rapport bruit/son.

- **Placement des résonateurs vocaux** (voyelle) : Action sur les caractéristiques spectrales, et plus précisément sur les rapports de fréquence entre les partiels. Des formants peuvent apparaître ou disparaître dans le spectre.
- **Articulation** (langue ou lèvres) : Action sur les transitoires d'attaque (influence la perception du timbre produit) et sur l'intensité perçue.
- **Larynx – positionnement et degré de tension** : Affecte la vélocité du jet d'air et l'influence des résonances du conduit vocal sur les caractéristiques spectrales du son.
- **Appareil respiratoire – vélocité du jet d'air** : Action directe sur la durée de l'excitation, sur l'intensité sonore et sur les caractéristiques de l'oscillation au niveau du biseau. Influence aussi la fréquence fondamentale, les caractéristiques spectrales du son et le rapport bruit/son.
- **Doigté sélectionné** : Action sur la longueur effective du tuyau et sur la réponse acoustique de celui-ci. Le doigté déterminera quels partiels peuvent être émis, en fonction du spectre d'impédance qui lui est propre.

4.5.2 Sons de biseau (*whistle tones*)

Chacun de ces articulateurs peut avoir une action sur la fréquence de l'oscillation qui s'établit au niveau du biseau, ainsi que sur le rapport bruit/son. En effet, le son propre au *whistle tone* peut être accompagné d'un bruit résiduel d'intensité plus ou moins élevée.

- **Position de l'instrument sur le menton** (action des mains et des poignets)
- **Degré de couverture du trou de l'embouchure**
- **Distance lèvres-embouchure et angle du jet d'air**
- **Degré et forme de l'ouverture des lèvres**
- **Larynx – positionnement et degré de tension**
- **Appareil respiratoire – vélocité du jet d'air** : Détermine aussi la durée de l'excitation sonore.
- **Doigté sélectionné** : Action sur la longueur effective du tuyau et sur la réponse acoustique de celui-ci. Le doigté déterminera quels partiels peuvent être émis, en fonction du spectre d'impédance qui lui est propre.

4.5.3 Sons éoliens

Dans le cas des sons éoliens, ce sont les caractéristiques du tuyau et celles du jet d'air qui déterminent principalement la qualité du son.

- **Appareil respiratoire et larynx – vélocité du jet d'air** : Détermine la durée et l'intensité de l'excitation sonore. A aussi un effet sur les propriétés spectrales.
- **Position de l'instrument sur le menton** : Action sur les propriétés spectrales.
- **Distance lèvres-embouchure et angle du jet d'air** : Action sur les propriétés spectrales.
- **Degré et forme de l'ouverture des lèvres** : Action sur les propriétés spectrales du bruit émis. Influence également le débit et la vélocité du jet d'air à la source de l'excitation sonore.
- **Placement des résonateurs vocaux** (voyelle) : Action sur les propriétés spectrales.
- **Articulation** (langue ou lèvres) : Action sur l'intensité perçue du bruit émis et sur ses propriétés spectrales.
- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances, donc a une action sur les propriétés spectrales du bruit émis.

4.5.4 Aérophone à anche lippale (son de trompette)

- **Appareil respiratoire et larynx – vélocité du souffle** : Détermine la durée et l'intensité du son, et a une incidence sur les caractéristiques de la vibration des lèvres sur l'embouchure.
- **Fréquence de la vibration des lèvres** : Affecte la fréquence fondamentale du son émis.
- **Amplitude de la vibration des lèvres** : Affecte l'intensité et les propriétés spectrales du son émis.
- **Position et tension des lèvres** : Affecte la fréquence et l'amplitude de la vibration des lèvres. Ici, l'extrémité du tuyau correspondant à l'embouchure est considérée comme fermée, donc ce paramètre a peu d'effet sur la longueur effective du tuyau.
- **Articulation** (langue ou lèvres) : Affecte l'intensité perçue et les propriétés du timbre.
- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances, donc la fréquence fondamentale du son émis.

4.5.5 *Jet whistle*

- **Appareil respiratoire et larynx – vélocité du souffle** : Détermine la durée de l'excitation, l'intensité sonore et a un effet direct sur la ou les fréquence.s émises lors de l'exécution de la technique.
- **Angle du jet d'air – lèvres et mâchoire inférieure** : A un effet sur la manière dont l'air entre dans le tuyau, donc sur la manière dont les vortex d'air se forment à l'intérieur de celui-ci. Par conséquent, affecte la fréquence et les propriétés spectrales du son émis.
- **Degré d'obstruction du trou de l'embouchure** : Comme l'angle du jet d'air, influence la fréquence et les propriétés spectrales du son émis, mais également le rapport bruit/son. En effet, une obstruction partielle du trou de l'embouchure entraîne la production d'une combinaison *jet whistle*-son éolien, et augmente par conséquent la part de bruit dans le son.
- **Placement des résonateurs vocaux** (voyelle) : Action sur les propriétés spectrales du son émis. En plus d'ajouter une certaine coloration timbrale au son émis, les articulateurs vocaux comme les lèvres et la langue agissent comme les aspérités à l'intérieur du tuyau, et entraînent la création de vortex d'air supplémentaires.
- **Articulation** : Action sur l'intensité perçue du son et sur les transitoires d'attaque (effet sur le timbre).
- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances.

4.5.6 Aérophone plosif (*tongue ram*)

- **Degré de couverture du trou de l'embouchure** : Change la longueur effective du tuyau de l'instrument, donc la fréquence de ses résonances. Affecte également les caractéristiques de l'action d'obstruction du flux d'air, donc l'intensité et les propriétés de l'attaque.
- **Placement des résonateurs vocaux** : Influence surtout la vélocité du jet d'air, donc l'obstruction du flux d'air, et par conséquent l'intensité et les propriétés de l'attaque.
- **Ouverture et tension des lèvres** : Comme le placement des résonateurs vocaux, les lèvres influencent directement la vélocité du jet d'air, donc la force de l'impact (intensité) et les transitoires d'attaque. Une tension réduite des lèvres résultera aussi en un son plus bruité, en raison des fuites d'air.

- **Appareil respiratoire et larynx – vélocité du souffle** : Action sur la force de l’impact et les transitoires d’attaque.
- **Type d’articulation** (langue) : Le type d’articulation aura une incidence sur le degré d’ouverture du trou de l’embouchure et sur les propriétés de l’action d’obstruction du flux, donc sera déterminant pour la plupart des aspects timbraux de cette technique.
- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances.

4.5.7 Idiophone frappé (percussions de clé)

Dans le cas des percussions de clé, la flûte est utilisée purement comme un idiophone. La résonance de la bouche n’aura que peu d’effet sur le timbre.

- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances.
- **Doigté.s utilisé.s pour effectuer la percussion** : Deux facteurs influencent l’intensité et le timbre du son émis. Le premier est le diamètre du trou se trouvant sous la clé qui sera frappée sur sa cheminée : plus la surface de contact est grande, plus l’intensité sonore sera élevée. Ainsi, il n’est pas recommandé d’utiliser les clés de trille ou la clé se trouvant sous l’index gauche (correspondant aux trois trous les plus petits de la flûte). Quant au second, il s’agit de la position du trou sur le corps de la flûte. Les résonances seront optimales si la percussion est effectuée par un doigt qui ferme déjà une clé lors de la sélection du doigté désiré, et si elle est effectuée près du centre du corps de la flûte (par exemple avec l’annulaire de la main gauche ou l’index de la main droite). Par contre, le choix de la clé n’a aucun effet sur la fréquence des résonances du tuyau (du moment qu’elle fait partie des clés fermées pour le doigté sélectionné).

4.5.8 Résonateur (*pizzicato* et articulations percussives)

Lorsque la flûte est utilisée comme un résonateur, c’est en fait une consonne plosive que l’on entend, combinée aux résonances du tuyau de la flûte. Les résonances que l’on entend sont alors similaires à celles des sons éoliens, mais elles ne sont pas combinées au bruit du souffle.

- **Appareil respiratoire et larynx – vélocité du souffle** : Détermine la pression de l’air qui sera bloqué par la langue, donc la force potentielle de l’impact de l’articulation.

- **Position de la langue** : Ce sont les propriétés de la plosivité de la consonne qui détermineront les caractéristiques des transitoires d'attaque, donc de l'articulation.
- **Placement des articulateurs vocaux** : Action sur la coloration spectrale du bruit émis.
- **Degré de couverture et angle de l'embouchure** : Action sur la longueur effective du tuyau, donc sur ses résonances. Ces facteurs déterminent aussi à quel point les résonances du tuyau feront partie du bruit émis.
- **Proximité de l'embouchure** : Déterminent aussi à quel point les résonances du tuyau feront partie du bruit émis.
- **Doigté sélectionné** : Détermine la longueur effective du tuyau ainsi que ses résonances.

5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté l'ensemble des techniques de jeu et des modes de production sonore de la flûte traversière de Boehm à travers une revue de la littérature consacrée aux techniques étendues, puis nous avons proposé différentes pistes pour les classifier, de manière à mieux structurer ce portrait d'ensemble de l'instrument. Le but de cette démarche était de rendre possible une meilleure compréhension de la technique de la flûte ainsi que de son fonctionnement acoustique.

On a vu que l'intégration d'une grande diversité de modes de jeu à la palette de l'instrument s'est faite progressivement et parallèlement à des changements de paradigmes musicaux. On a aussi pu constater que la flûte traversière donnait lieu à l'existence d'un monde sonore complexe, permettant de dépasser le jeu musical fait de notes, d'intensités et de durées.

Pistes de réflexion et apports du chapitre

Instrumentistes et compositeurs.trices :

- Aperçu du fonctionnement acoustique de l'instrument
- Aperçu du répertoire de modes de jeu de l'instrument

Ingénieur.e.s et artistes électroacoustiques/numériques :

- Possibilités de modélisations des paramètres de jeu de l'instrument
- Conception plus détaillée des éléments constitutifs du geste instrumental

Mais la question demeure : à quoi ressemblent véritablement ces sons ? Comment peut-on les décrire ? Est-ce qu'on peut leur assigner une étiquette qui ne soit pas directement reliée au geste de production sonore ? Dans le prochain chapitre, on verra que certaines approches analytiques d'abord conçues pour la musique électroacoustique proposent des pistes intéressantes afin de répondre à ces interrogations relatives à la description verbale des sons instrumentaux.

Chapitre 4

Le timbre de la flûte traversière et l'analyse musicale perceptive

Sommaire

1	Introduction	107
2	Outils perceptifs d'analyse musicale et sons instrumentaux	108
3	Pierre Schaeffer : Typologie et morphologie sonores	113
4	Denis Smalley : Spectromorphologie	124
5	Conclusion	133

1 Introduction

Les deux premiers chapitres avaient pour but de dresser un portrait aussi complet que possible de la flûte traversière, du point de vue de la technique instrumentale. En considérant cette grande variété de timbres qu'il est possible d'obtenir avec un seul instrument, on constate que la flûte traversière permet de donner naissance à un univers sonore très riche.

Comme dans le langage qui est composé de diverses associations de phonèmes, les sons instrumentaux, dans toute leur diversité, prennent tout leur sens lorsqu'ils sont intégrés à un discours musical. Pour ce faire, les sons doivent trouver leur identité; on doit pouvoir les cristalliser, pour ensuite les modeler, les sculpter, et les intégrer à une entité artistique.

La plupart des méthodes d’analyse musicale destinées à la musique instrumentale tiennent compte de paramètres sonores comme la hauteur, la durée et l’intensité. On a souvent tendance à penser les sons instrumentaux en termes de notes. Mais qu’arrive-t-il lorsque l’on tente d’intégrer la dimension du timbre instrumental et d’en articuler les subtilités à travers une composition musicale ?

Pour répondre à ces interrogations, ce chapitre propose d’explorer l’utilisation d’outils conçus d’abord pour les musiques électroacoustiques, dans le cadre d’une application instrumentale. Après une brève mise en contexte, la pertinence d’une telle approche sera expliquée, puis on verra dans quelle mesure les approches typomorphologique et spectromorphologique, proposées respectivement par Pierre Schaeffer et Denis Smalley, pourront être adaptées à la description du timbre instrumental, et en particulier à celui de la flûte traversière.

Champs d’expertise

- Analyse musicale perceptive
- Composition électroacoustique
- Sémiologie musicale et ontologie de l’œuvre musicale

2 Outils perceptifs d’analyse musicale et sons instrumentaux

2.1 Musiques instrumentales et musiques électroacoustiques

Les techniques étendues décrites lors des deux derniers chapitres s’inscrivent en fait dans un contexte musical particulier. Par le terme *musiques instrumentales* – au pluriel puisqu’il en existe une diversité de genres – on désigne ici la musique occidentale de tradition classique jouée sur des instruments acoustiques. La musique dont il est question ici a été conçue pour être jouée en situation de concert, généralement avec un ou plusieurs musiciens s’exécutant sur une scène, en s’adressant à un public assis face à lui ou à eux. Cette pratique artistique, qui ne génère habituellement que peu d’interaction entre les musiciens et leur public durant le temps de jeu, existe sous sa forme actuelle depuis déjà quelques siècles.

C’est avec l’éclatement du langage tonal vers la fin du XIX^e siècle et le début du XX^e siècle

que le timbre instrumental a commencé à gagner en importance dans la construction des discours musicaux. On a commencé à considérer le bruit comme un élément musical à part entière, et l'intégration de techniques étendues aux compositions musicales s'inscrit dans cette tendance. Le timbre est ainsi considéré comme un attribut perceptif du son au même titre que la hauteur, la durée et l'intensité. Dans ce chapitre, lorsqu'il sera question des musiques instrumentales, on désignera l'ensemble des langages musicaux post-tonaux qui intègrent le timbre comme élément porteur de forme – musiques dodécaphonique, sérielle, post-sérielle, spectrale, concrète instrumentale, etc.

Vers les années 1940-1950, les technologies de sonorisation et d'enregistrement s'améliorent ; on n'a qu'à penser aux magnétophones de plus en plus performants, et à l'invention du disque haute-fidélité. Non seulement ces technologies permettent une diffusion élargie des enregistrements musicaux, mais elles influencent directement la composition musicale, le jeu instrumental ainsi que les activités commerciales liées à la musique. C'est dans cette lignée que les principes de la musique concrète sont définis par Pierre Schaeffer dès 1943 et que les compositeurs affiliés au Studio für elektronische Musik de Cologne créent les premières pièces de musique électronique.

Dans cette lignée, la musique électroacoustique est celle qui est composée à base de sons enregistrés et/ou de sons de synthèse. Elle est la plupart du temps fixée sur support, et fait appel aux techniques de montage et de mixage en studio. Les musiques électroacoustiques sont habituellement conçues pour être diffusées sur haut-parleurs – on qualifie alors l'œuvre résultante d'acousmatique – et sont parfois « interprétées¹ » à la console de mixage. Les langages électroacoustiques, également d'une grande diversité, évoluent parallèlement aux langages instrumentaux depuis les années 1950, et il est aujourd'hui commun de dire qu'ils s'influencent grandement l'un et l'autre.

2.2 Le rôle de la partition

Une différence majeure subsiste toutefois entre les musiques instrumentales occidentales et les musiques électroacoustiques : l'usage de la notation musicale. En effet, l'acte de composer une pièce instrumentale revient à *écrire* cette pièce, à produire un document que des instrumentistes-interprètes déchiffreront de manière à savoir comment produire le geste musical qui répondra aux

¹Dans le but de diffuser la pièce, généralement fixée sur support en stéréo, dans un espace spatialisé, sur un ensemble de haut-parleurs.

attentes de la personne qui compose, et qui permettra à l'œuvre d'exister phénoménologiquement pour des auditeurs.trices.

À ce propos, le point de vue de Roman Ingarden, exprimé dans son ouvrage *Qu'est-ce qu'une œuvre musicale ?*, est éclairant. Selon lui, la production d'une partition de l'œuvre par la personne qui compose assure l'existence de celle-ci en tant qu'objet intentionnel. Toutefois, l'œuvre fixée sur la partition n'est pas un objet réel (à cause des limites de la notation en ce qui a trait à la représentation du phénomène musical), mais bien un objet intentionnel, « dont l'existence trouve sa source dans l'acte créateur du musicien, et son fondement (*Seinsfundament*) dans la partition (Ingarden 1989, p. 147-148). »

Ainsi, la partition constitue la trace des activités créatrices de l'auteur. Sans celle-ci, il n'y a pas de cristallisation de ses idées qui soit possible, ni d'interprétation qui permette à l'œuvre d'exister dans la réalité. Ingarden ajoute :

Du reste, l'existence de cet objet intentionnel possède, et doit posséder, des fondements divers et autonomes : les actes individuels psycho-physiques de l'auteur, les démarches concrètes dans le monde, qui font la base réelle de chaque interprétation particulière de l'œuvre, et finalement, les multiples actes de conscience et les réactions physiologiques de l'auditeur. L'œuvre musicale reste quelque chose qui ne peut être créé, avec quoi nous ne pouvons établir de relations qu'intentionnellement, et non réellement (p. 150).

On pourra objecter à cela qu'il subsiste toujours une part d'interprétation dans les musiques acoustiques, notamment quand la diffusion est contrôlée par une action supplémentaire à la console de mixage. Mais ce qui nous intéresse réellement ici, c'est le rôle de la partition en relation avec le timbre musical.

Par définition, la partition sert à avoir une vue d'ensemble de l'œuvre. Dans l'*Encyclopédie Larousse*², on insiste sur la conduite des voix et leur cohérence métrique :

Partition : Terme général s'appliquant à toute mise par écrit d'un morceau de musique, mais impliquant généralement le fait que toutes les parties y soient représentées de manière synoptique : par exemple, un morceau à 4 mains sera dit « en partition » si les 4 portées sont figurées les unes sous les autres, mais non si elles sont réparties sur deux pages en vis-à-vis. [...] Le mot « partition », qui signifie simplement « division, quadrillage », provient du début du XVII^e siècle, où l'usage alors nouveau de la barre de mesure fut considéré comme un auxiliaire de lecture précieux pour mettre ensemble plusieurs exécutants, d'où l'extension ultérieure du terme.

²Version en ligne ; voir <http://larousse.fr/encyclopedie/musdico/partition/169483>. Repéré le 19 octobre 2018.

Dans le *Petit Robert*³, on insiste plutôt sur la notion de partage de l’œuvre (étymologiquement), quitte à faire de la partition l’essence même de l’œuvre :

Partition (1636 – latin *partitio*, « partage », avec influence de l’italien *partitura*, « partition »)
– Notation d’une composition musicale, superposant les parties vocales et instrumentales, permettant une lecture d’ensemble. [...] PAR EXT. Composition musicale.

Or, qu’en est-il réellement du timbre musical ?

Enfin, pour le terme « partition », Wikipédia propose la définition suivante :

Une partition de musique est un document (en papier, en parchemin, ou en format électronique) qui porte la transcription d’une œuvre musicale. Cette transcription peut être faite avec plusieurs sortes de notations [...] et sert à traduire les quatre caractéristiques du son musical : la hauteur, la durée, l’intensité, le timbre (Wikipédia, 2018 [site web](f)).

Certes, on admet ici que le timbre peut être noté dans la partition, mais concrètement, comment y arrive-t-on ? Ici, il est pertinent de mentionner que le musicologue américain Charles Seeger distingue deux fonctions de la partition musicale : elle peut être *prescriptive* – elle indique aux musiciens quoi faire pour exécuter l’œuvre, comme elle peut être *descriptive* – en fournissant des informations sur le résultat sonore final (Seeger 1958). En ce qui a trait au timbre, il peut s’agir dans le premier cas de décrire la technique ou le geste musical visant à obtenir un résultat musical précis. Et dans le deuxième cas, de fournir une description verbale (ou dans une moindre mesure visuelle, par le biais de la notation) du timbre désiré.

Cependant, dans le cas de musiques instrumentales intégrant une grande variété de timbres et/ou dont les procédés d’écriture se rapprochent de ceux des musiques électroacoustiques, ou encore dans le cas des musiques mixtes intégrant les deux médiums (instruments et sons électroacoustiques), on constatera qu’il est difficile d’avoir accès à toute l’information nécessaire lorsqu’il s’agit d’effectuer un travail d’analyse complet à partir de la partition. Autrement dit, la partition à elle seule ne permet pas une compréhension de l’œuvre dans son ensemble. La représentation mentale des timbres obtenus à l’interprétation demande généralement un effort d’abstraction trop substantiel, à moins d’avoir intégré une notion précise du geste producteur de son (par exemple, si on est interprète de cet instrument soi-même et qu’on a acquis la maîtrise de

³Le *Petit Robert de la langue française*, édition 2015, p. 1817.

ce geste par la pratique), ou encore d'avoir mémorisé les sonorités d'un enregistrement, qui ne constitue pas l'œuvre en soi, mais une de ses interprétations.

Bien que l'arsenal des outils d'analyse musicale se soit enrichi de plusieurs éléments comme l'utilisation de principes mathématiques et statistiques, les techniques propres à l'acoustique et aux œuvres spectrales ou encore la description des masses et des trames sonores, il reste que les musiques instrumentales des dernières décennies posent quelques difficultés supplémentaires qui ne sont pas étrangères à l'intégration de la dimension du timbre aux processus compositionnels. Le recours à des enregistrements d'œuvres instrumentales afin de compléter les analyses amorcées à partir des partitions s'inscrit donc en continuité logique avec cette démarche d'intégration du timbre, à défaut de connaître intimement les œuvres comme objets intentionnels à partir de la partition, ce qui reste plus ou moins une utopie à moins de pouvoir l'interpréter soi-même. D'où la pertinence de se doter d'outils d'analyse adéquats basés sur l'écoute et la perception sonore.

Dans sa préface à l'ouvrage de Stéphane Roy sur l'analyse des musiques électroacoustiques, le musicologue et sémiologue Jean-Jacques Nattiez indique que « *plusieurs des auteurs qui ont proposé des méthodes d'analyse pour les musiques électroacoustiques ont affirmé qu'elles devaient se concentrer sur les stratégies de réception qu'elles déclenchent, puisque ces musiques "sont faites pour être entendues."* » (Roy 2004, p. 18). En fait, il en va de même pour plusieurs musiques instrumentales contemporaines.

Le but de la démarche qui est présentée dans ce chapitre est ainsi d'utiliser les outils d'analyse électroacoustique afin de caractériser de manière plus précise le timbre instrumental (en l'occurrence celui de la flûte) et de mieux comprendre comment la diversité des sons de la flûte traversière peut s'inscrire dans une pensée compositionnelle basée sur l'écoute musicale. Il se trouve que les approches proposées par Pierre Schaeffer et Denis Smalley fournissent, chacun à leur manière, un vocabulaire riche et précis pour la description des sons perçus, et que leurs terminologies respectives pourraient bien s'avérer être utiles dans notre démarche de description du timbre de la flûte traversière.

3 Pierre Schaeffer : Typologie et morphologie sonores

3.1 Contexte

Dans son *Traité des objets musicaux*⁴ (1966), Pierre Schaeffer développe une vision de l'écoute musicale où il tente de se distancier de la musique traditionnelle⁵, dont la tendance est de concevoir la musique comme une série d'objets stéréotypés organisés dans un discours dont les règles sont préétablies. Sa pensée est grandement influencée par la phénoménologie de la perception, notamment par les idées de Maurice Merleau-Ponty⁶.

Schaeffer fait très souvent référence à « *l'oreille* », une notion que l'on peut rattacher à la combinaison formée du système auditif (qui fournit les sensations) et des zones du cerveau responsables du traitement auditif (le cortex auditif, qui s'occupe de la perception). Ainsi, il questionne l'écoute musicale, la décortique, et distingue quatre façons de se servir de son *oreille* :

- **Ouïr** – Il s'agit ici, tout simplement, de « *percevoir par l'oreille* ».
- **Écouter** – Une fois le son perçu, on peut « *prêter l'oreille* », « *s'intéresser à* », en bref, se diriger vers la source sonore.
- **Entendre** – Ici, il s'agit « *d'avoir une intention* » dans la manière d'écouter. « *Ce que j'entends, ce qui m'est manifeste, est fonction de cette intention* ».
- **Comprendre** – Ce phénomène se situe au-dessus des trois autres, et est « *en double relation avec écouter et entendre* ». Ici, c'est la compréhension, antérieure et immédiate, qui dirige l'écoute (p. 104).

De plus, Schaeffer souligne le caractère ambigu du timbre en musique, qui peut se décliner en deux notions : « *l'une relative à l'instrument, indication de provenance que nous donne l'écoute ordinaire*⁷ [...] et *l'autre relative à chacun des objets fournis par l'instrument* ». À cela, il ajoute que « *le paradoxe [...] veut à la fois que les instruments aient un timbre, et que chaque objet sonore qu'on en tire ait, pourtant, son timbre particulier* (p. 232-233). » En gros, cela revient

⁴L'ensemble des citations de cette section provient du *Traité des objets musicaux*. À des fins de concision, seuls les numéros de pages seront indiqués dans cette section.

⁵Lorsqu'il utilise l'expression *musique traditionnelle*, Schaeffer entend généralement la musique classique de tradition occidentale telle qu'elle est enseignée dans les conservatoires, et non les répertoires de tradition orale.

⁶Schaeffer cite son ouvrage *Phénoménologie de la perception* à plusieurs reprises dans son *Traité*.

⁷Par opposition à l'écoute musicale.

à dire qu'il convient de dépasser la notion de timbre en tant qu'ensemble de caractéristiques permettant de reconnaître l'instrument, afin de pouvoir qualifier chaque son musical.

3.2 Objet sonore et écoute réduite

Conséquemment, Schaeffer introduit la notion d'*anamorphose fonctionnelle*, qui consiste à faire abstraction de certaines parties caractéristiques d'un son pour pouvoir le comparer à d'autres, sons sans buter sur l'obstacle de l'identification de la source. Il est possible d'y arriver grâce à des manipulations électroacoustiques (par exemple en coupant l'attaque d'un son, limitant ainsi la capacité de reconnaissance de l'instrument) ou grâce à un effort d'abstraction dans l'écoute. En comparant deux sons grâce à ce type d'écoute, ajoute-t-il, « *on constate [...] que l'oreille peut admettre entre ces sons un autre parallélisme qui présente plus d'intérêt musical que la recherche des causes* » (p. 241).

La difficulté inhérente à une telle démarche vient donc du fait que les objets musicaux sont des « *objets précis aimantés par tout un "champ" de conscience, où joue le naturel, tout comme le culturel.* » C'est dans cette optique qu'il introduit la notion d'*objet sonore* (par opposition à l'objet musical, stéréotypé et façonné selon des règles préétablies). L'objet sonore demande un effort de la part de l'auditeur : il est « *à la rencontre d'une action acoustique et d'une intention d'écoute* » (p. 271). Dans un même ordre d'idées, il distingue l'écoute musicale de l'écoute musicienne : la première est « *raffinée, mais figée* » ; la seconde, l'écoute musicienne, se veut être « *un renouvellement de l'écoute, [...] [une] interrogation de l'objet sonore pour ses virtualités* ». Il résume en disant que l'écoute musicienne serait « *l'écoute musicale de nouveaux objets sonores proposés à l'emploi musical* » (p. 353).

L'écoute réduite est donc une écoute « *décontextée* », musicienne, qui se traduit par une intention d'échapper aux perceptions conditionnées par l'éducation musicale traditionnelle et les habitudes d'écoute. Schaeffer la compare à l'écoute des phonéticiens, qui s'intéressent aux sons de la langue, ces objets nommés *phonèmes*, et les qualifient tout en s'efforçant de faire abstraction du langage qui les sous-tend (p. 289, 354).

3.3 Typologie et morphologie

Dans sa proposition du *solfège des objets sonores*, Schaeffer dénombre quatre étapes nécessaires à la démarche d'analyse qu'il propose :

- **Typologie** – Cette étape consiste à identifier les objets sonores, en effectuant un tri à partir de critères morphologiques. Autrement dit, on « trouve » les objets sonores, et on en détermine le type d'après une classification.
- **Morphologie** – Ici, « *les objets sonores identifiés et classés par la typologie sont comparés en contexture.* » Il s'agit à la fois de procéder à l'identification de « *critères sonores composants* » et ensuite de « *qualifier les objets sonores comme des structures de ces critères* ». On détermine également la « *classe* » de chaque objet sur la base de ses critères morphologiques.
- **Caractérologie** – Lors de cette étape, on revient sur les particularités des sons qu'on expérimente. Mais pas comme dans la musique traditionnelle : dans celle-ci, les « *références [sont] causales* », alors que dans cette démarche, elles ne sont qu'indicatives.
- **Analyse musicale** – Lors de cette dernière étape, on tente de tirer du sens des identifications et des descriptions effectuées lors des trois étapes précédentes. Il s'agira « *de procéder à des confrontations d'objets porteurs de critères aux fins d'explorer, face à eux, les propriétés du champ perceptif* » (p. 497).

Dans le cadre de ce chapitre, conformément aux objectifs de cette thèse, nous nous attarderons aux deux premières étapes de la démarche proposée par Schaeffer, la typologie et la morphologie, la caractérologie et l'analyse musicale s'inscrivant dans une vision plus large.

3.3.1 Critères propres à la musique traditionnelle et à la physique

Avec pour objectif de proposer une pensée musicale qui se distingue des présupposés musicaux et scientifiques de son époque, Schaeffer définit les critères du son considérés par la musique traditionnelle (de tradition occidentale classique) et par l'acoustique.

Il définit d'abord quatre « *critères analogiques de l'expérience musicale traditionnelle* » :

- **Volume** – Il est relatif à la notion d’étendue, à la « *dimension d’ampleur, indépendamment de la qualité de tonique [(la hauteur des sons)], qui laisse entendre que tous les sons sont ponctuels* ».
- **Timbre** – Il « *désigne une qualité des notes* » et « *ne renvoie pas à l’instrument* ». Par exemple, on peut utiliser les qualificatifs *sombre* et *clair* pour le timbre. Ici, il ne s’agit que d’une impression générale.
- **Richesse** – Il s’agit du caractère « *timbré* » du son, d’un critère relatif à la complexité des sons, à leur « *contexture plus ou moins chargée* ».
- **Éclat** – Il est relatif à la projection sonore, à l’atteinte de zones fréquentielles à laquelle l’oreille est sensible.

Puis il dresse la liste des quatre critères considérés par la physique⁸ (qu’il nomme « *propriétés annexes des sons purs* ») :

- **Force sonore** – Critère relatif à l’intensité sonore. Les décibels et les phones sont utilisés indifféremment par Schaeffer, qui mentionne par ailleurs les courbes de Fletcher⁹. On peut donc en déduire qu’il se concentre sur la sensation d’intensité plutôt que sur l’intensité sonore physique, liée à l’amplitude des vibrations.
- **Hauteur** – Elle est relative à la fréquence et est « *affectée, sensiblement, quoique à un moindre degré, par le niveau* ».
- **Volume** – Il correspond à une sensation, « *augmentant avec le niveau, et à niveau égal diminuant avec la fréquence* ».
- **Densité** – Il s’agit aussi d’une sensation, « *augmentant à la fois avec la fréquence et le niveau* » (p. 511-513).

Pour la définition de ces critères (force sonore, hauteur, volume, densité), Schaeffer se base sur les travaux de Stevens (1934). Le *Traité des objets musicaux* a été rédigé avant la réalisation de la plupart des études sur la perception du timbre instrumental recensées dans cette thèse (Cf. chapitre 4, section 2.4). À l’époque où les résultats de recherche de Stevens ont été publiés, on disposait d’un nombre relativement restreint d’informations solides sur l’acoustique des sons instrumentaux ainsi que sur leur perception. Stevens affirme que l’être humain effectue une discrimination des sons de quatre manières différentes à partir de deux dimensions physiques¹⁰.

Bien que les notions de dimensions perceptives et de leurs corrélats acoustiques n’avaient pas

⁸C’est Schaeffer qui mentionne la physique ; à la lecture du texte, il n’est cependant pas clair de quelle discipline il s’agit réellement. Comme Schaeffer semble surtout s’intéresser aux sensations et à la perception, on parlera plutôt de psychophysique ou de psychoacoustique.

⁹Les courbes de Fletcher décrivent la sensibilité du système auditif selon les fréquences.

¹⁰Citation originale : « *We have, then, four distinct types of discriminatory response, all of which arise from the interaction of a two-dimensional acoustic stimulus with a multi-dimensional nervous system* » (p. 459).

encore été définies avec précision à cette époque, on en conclut que les quatre critères proposés par Schaeffer correspondent aux quatre types de discrimination proposés par Stevens, et que les deux propriétés acoustiques dont il est question sont la hauteur et l'intensité.

3.3.2 Typologie sonore

Ainsi, la typologie « *répond à une nécessité d'identification des objets* » et consiste en un « *art de séparer les objets sonores* » (p. 397-398). Les objets sont identifiés sur la base de critères, qui sont « *des propriétés de l'objet sonore perçu, corrélat de l'écoute réduite, et non des propriétés mesurables du son physique* » (p. 501). Ces critères sont les suivants : masse, forme, entretien, facture, et originalité.

- La **masse** est la « *qualité par laquelle le son s'inscrit dans le champ des hauteurs* », la manière dont il l'occupe. (Les différentes classes de masse seront définies plus en détail dans le paragraphe suivant, sur la morphologie sonore.)
- La **forme** est, pour sa part, un « *profil qui sera reconnu* », relatif à l'évolution temporelle du son.
- L'**entretien**, quant à lui, est « *la façon dont le son se perpétue dans la durée* » : on déterminera s'il s'agit d'une impulsion, d'un son entretenu ou d'un entretien itératif (p. 401-402).
- Quant à la **facture**, elle correspond à la « *façon dont l'énergie est communiquée et se manifeste dans la durée, en relation étroite avec l'entretien* » (p. 432).
- Finalement, l'**originalité** consiste en la complexité de la structure de l'objet, qui peut être plus ou moins élémentaire ou complexe (p. 435).

Les différentes catégories d'objets sonores se retrouvent dans un tableau récapitulatif de la typologie sonore, mieux connu sous le nom de TARTYP (voir le tableau 4.1). Lorsqu'il s'agit d'utiliser cette classification pour les sons de flûte, on se rend rapidement compte qu'il est plus facile de moduler les objets sonores produits avec la flûte pour fournir des exemples correspondant aux catégories du tableau (par exemple, en modifiant leur facture) que d'utiliser la typologie du

Durée démesurée (macro objets) Pas d'unité temporelle		Durée mesurée Unité temporelle			Durée démesurée (macro objets) Pas d'unité temporelle	
Facture imprévisible	Facture nulle	Durée réduite Micro-objets			Facture nulle	Facture imprévisible
		Tenue formée	Impulsion	Itération formée		
Hauteur définie Masse fixe	En	Hn	N	N'	N''	Zn
Hauteur complexe	Ex	Hx	X	X'	X''	Zx
Masse peu variable	Ey	Tx Tn Trames particulières	Y	Y'	Y''	Zy Pédales particulières
	Unité causale		Causes multiples mais semblables			
Variation de masse imprévisible	E Cas général	T Cas général	W	F	K	P Cas général
	<— Sons tenus —>		Sons itératifs			
Objets équilibrés: N: masses toniques X: masses complexes Y: masses variables '': impulsions '': itérations		Objets redondants ou trop brefs: H: sons homogènes continus Z: sons homogènes itératifs T: trames K: cellules F: fragments			Objets excentriques E: échantillons A: accumulations P: pédales W: grosses notes	

TABLE 4.1 – Tableau récapitulatif de la typologie (TARTYP). Crédit : Robert Normandeau (avec son aimable autorisation), d’après le *Traité des objets sonores*, p. 459.

tableau pour caractériser les sons de flûte. Toutefois, les critères de masse et d’entretien restent utiles pour qualifier les différents modes de jeu de la flûte, lorsque l’on s’attarde un peu plus à leur morphologie sonore.

3.3.3 Morphologie sonore

En son essence, la morphologie « *tend à une qualification du sonore* ». Elle aide en fait à effectuer le tri nécessaire à la classification typologique, mais permet également de qualifier les objets sonores de manière encore plus fine. La description morphologique est le résultat d’un objet analysé en *contexture* :

Il constitue alors une micro-structure, qui possède son unité, sa continuité, son enveloppe temporelle, et c’est par rapport à cette structure que les critères sont alors identifiés, tout comme les valeurs l’étaient précédemment par rapport au contexte d’un ensemble d’objets (p. 502).

En effectuant une description morphologique, on porte une attention particulière à la masse et à l'entretien ainsi qu'à la variation de ces différents critères.

Classes des textures de masse et de timbre harmonique

La masse est, comme on l'a vu, la manière qu'a un son de s'inscrire dans le champ des hauteurs. Schaeffer distingue cette notion de celle de timbre, qu'il convient ici de définir, pour éviter toute confusion.

Dans le contexte de la morphologie des objets sonores, le *timbre* est un « *halo plus ou moins diffus* » et désigne « *d'une façon générale les qualités annexes qui semblent associées à la masse et permettent de la qualifier* » (p. 516). Pour cette notion, le terme *timbre harmonique* est aussi utilisé. Quant au terme *tonique*, il peut être rattaché à la périodicité du son, ou, en termes perceptifs, à la reconnaissance d'une hauteur. Enfin, le terme *cannelé* sous-entend une certaine ambiguïté perceptive dans la perception de l'occupation du champ des hauteurs.

Schaeffer dénombre sept *classes de textures de masse* :

- **Le son pur** – Il est décrit comme une « *tonique sans timbre harmonique* ». Ici, la texture de timbre harmonique est nulle. Exemple : le son sinusoïdal.
- **Le son tonique** – C'est une « *masse représentée par une hauteur repérable* ». La texture de timbre harmonique est tonique. Exemple : une note de piano.
- **Le groupe tonique** – Il s'agit d'une « *masse constituée de plusieurs groupes toniques distincts* ». La texture de timbre harmonique est tonique cannelée ou continue. Exemple : un accord au piano.
- **Le son cannelé** – C'est une « *masse ambiguë composée de toniques, de groupes toniques, de nœuds et de groupes nodaux* ». La texture du timbre harmonique est complexe ou continue. Exemple : son de gong ou de cloche.
- **Le groupe nodal** – Il est décrit comme une « *masse formée de plusieurs 'nœuds' distincts* ». La texture du timbre harmonique est complexe ou continue. Exemple : plusieurs cymbales de tailles différentes jouées ensemble.

- **Le son nodal** – Ici, il s’agit d’une « *masse formée d’un agrégat non repérable en hauteur* ».

La texture du timbre harmonique est complexe ou continue. Exemple : coup de cymbale.

- **Le bruit blanc** – C’est une « *masse complexe occupant tout le champ des hauteurs* ». La texture de timbre harmonique est nulle. Le bruit blanc électronique en est le meilleur, voire le seul exemple (p. 518).

Classes	Texture de masse	Texture de timbre harmonique	Dimensions Hauteur	Pour la flûte traversière
1	son pur	nul	Degrés	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Whistle tone</i> (son de biseau) • Son « standard » (aérophone à anche d'air) à résonance unique. Vaut pour la plupart des doigtés.
2	son tonique	tonique		<ul style="list-style-type: none"> • Son de trompette (aérophone à anche lippale) • <i>Tongue ram</i> • Percussions de clés (lorsque l'impulsion correspond à une note repérable) • <i>Pizzicatti</i> • <i>Jet whistle</i> sifflé (lorsque la partie bruitée est limitée au minimum)
3	groupe tonique	tonique cannelé ou continu		<ul style="list-style-type: none"> • Diades ou triades harmoniques • Multiphoniques (lorsque le bruit est limité au minimum) • Utilisation de la voix (peut aussi être cannelé, avec certains intervalles)
4	son cannelé	complexe ou continu		<ul style="list-style-type: none"> • Articulations de consonnes sans production d'ondes stationnaires • <i>Jet whistles</i> (lorsqu'il y a ambiguïté entre hauteur perceptible et bruit) <ul style="list-style-type: none"> • Multiphoniques très bruitées • Sons mixtes éoliens/standard
5	groupe nodal	complexe ou continu		<ul style="list-style-type: none"> • Certains <i>shadow clusters</i> (sons courts constitués d'harmoniques doubles ou triples dans l'aigu pour lesquelles on limite la production d'ondes stationnaires)
6	son nodal	complexe ou continu		<ul style="list-style-type: none"> • Sons éoliens (bruit coloré) • Percussions de clés ne correspondant pas à une hauteur précise • Roulements de la langue dans le trou de l'embouchure • <i>Jet whistles</i> (dans le cas où aucune hauteur n'est repérable)
7	bruit blanc	nul	Couleur	<ul style="list-style-type: none"> • Certains bruits de souffle (sons éoliens) se rapprochent du bruit blanc filtré, à la manière de certaines consonnes fricatives

TABLE 4.2 – Classes de textures de masse avec exemples pour la flûte traversière. Crédit : Julie Delisle, d'après le *Traité des objets sonores* p. 518.

Le tableau 4.2 propose des exemples des sept classes de texture de masse et de timbre harmonique tirés du répertoire sonore de la flûte traversière.

Le tableau TARTYP (résumant la typologie sonore de Schaeffer – voir tableau 4.1) fait état, en plus des masses fixes toniques et complexes, de masses variables à différents degrés. Du côté de la flûte, il est possible d'obtenir ces variations grâce à plusieurs techniques : le vibrato exagéré, le *pitch bend*, les *glissandi* de doigts, les traits rapides de notes et l'usage de la voix, entre autres.

Grain

Le grain est une des deux propriétés morphologiques de l'entretien qui, on le rappelle, est à la base de l'unité des objets, en ce sens qu'il en détermine les limites (le début et la fin). Le grain est une microstructure propre à la matière sonore qui, lorsqu'on y regarde de plus près, s'apparente à une « *succession d'attaques dont les saccades sont plus ou moins espacées, plus ou moins régulières* ». Schaeffer ajoute plus loin qu'il s'agit d'une « *signature du son, [...] [d'un] indice tantôt grossier, tantôt subtil, qui aide à l'identification* » (p. 548, 555).

Cette identification est probablement celle de l'instrument producteur de son ou, pour être rigoureux, du corps sonore à l'origine de la vibration. En effet, le grain sonore est comparé avec celui d'un tissu ou d'un minéral, qui renseignent sur la nature du matériau. Schaeffer en distingue trois classes (p. 551-553)¹¹ :

- **Grain de résonance** (ou harmonique) : Il donne une impression de scintillement, sans doute interprétable par des fluctuations d'intensité dans les partiels aigus d'un son, comme lors de la résonance d'une corde grave du piano ou d'une cymbale. Dans le cas de la flûte, on le retrouvera spécialement dans les sons graves joués dans une nuance brillante et *forte*. Une attaque abrupte est susceptible d'amplifier le grain de résonance, parce qu'elle modifiera l'aspect de la partie soutenue du son.
- **Grain de frottement** (ou compact) : On le reconnaît par l'impression de friction qu'il donne, comme lorsqu'on entend le frottement de l'archet sur la corde. Schaeffer donne également l'exemple du bruit d'air avec la flûte. De manière plus précise, on le retrouvera

¹¹ Des extraits sonores illustrant les trois classes de grain sont disponibles dans l'archive accompagnant cette thèse. Merci à Mirka Sévigny pour son aide lors de l'enregistrement des sons.

dans les sons éoliens et mixtes (avec ondes stationnaires), ainsi que dans les *jet whistles*. Par ailleurs, l'usage de la voix à l'unisson ou à l'octave, si elle est bien modulée, peut également produire un grain de frottement.

- **Grain d'itération** (ou discontinu) : Il se traduit par une sorte de frappement, par lequel on semble percevoir la présence d'aspérités. Le meilleur exemple de grain d'itération en ce qui concerne la flûte est l'usage du *fluttertongue*.

Ces trois types de grains peuvent être remarqués tels quels, ou encore être présents en combinaison dans les objets sonores.

Allure

L'allure est l'autre caractéristique propre à l'entretien. Elle s'apparente au profil dynamique de l'objet, mais peut aussi affecter sa masse. Elle « *donne une indication parmi d'autres sur l'histoire de l'énergie au cours de la durée* » (p. 549).

Comme pour le grain, il existe trois types d'entretien correspondant à des allures distinctes¹² :

- Entretien **mécanique**, qu'on peut qualifier de régulier ;
- Entretien **vivant**, qui se caractérise par quelques fluctuations ;
- Entretien **naturel**, qu'on peut qualifier de désordonné.

Le meilleur exemple d'allure dans le cas de la flûte traversière se trouve dans l'usage du vibrato, que ce soit le chevrotement (vibrato de larynx), le vibrato abdominal-thoracique, le *smorzato* (vibrato de lèvres) ou le *bisbigliando* (vibrato de doigts). L'allure vivante est, en quelque sorte, le type par défaut du vibrato instrumental. Dans les quatre cas, l'allure mécanique est reproduisible avec un certain entraînement, mais préférablement sur un laps de temps assez restreint. Quant à l'allure naturelle, chaque flûtiste peut la produire et la moduler à sa guise, grâce aux contrôles des muscles associés à l'usage du vibrato.

¹²Des extraits sonores illustrant les trois types d'entretien sont disponibles dans l'archive accompagnant cette thèse. Merci à Mirka Sévigny pour son aide lors de l'enregistrement des sons.

3.4 Classification ou description ?

Il semblait approprié de terminer cette section par quelques remarques. D'abord, il ne va pas de soi que l'on puisse pratiquer l'écoute réduite face à des échantillons de sons de flûte. En effet, il est presque impossible faire abstraction de la source sonore : on entendra toujours la résonance du tuyau, et on percevra toujours des indices du geste producteur de son. Cependant, étudier le tableau typologique de Schaeffer peut être un exercice profitable pour toute personne voulant approcher la flûte (ou tout autre instrument de musique) de manière créative. Il s'agit en effet d'un outil puissant pour favoriser la diversité de l'expression instrumentale.

En terminant, on retiendra que ce sont surtout les critères morphologiques et leurs nuances qui sont utiles à notre démarche de description du timbre instrumental. En particulier, les classes de masse peuvent aider à distinguer plusieurs instances de sons produits avec la même technique (par exemple des multiphoniques plus ou moins bruitées) ; quant aux critères d'entretien comme le grain et l'allure, ils donnent des indications utiles sur les qualités timbrales (spectrales) des sons ainsi que sur diverses techniques de modulation.

4 Denis Smalley : Spectromorphologie

4.1 Définition

« *Music is not created from nothing. If a group of listeners finds a piece of electroacoustic music 'rewarding' it is because there is some shared experiential basis both inside and behind the music.* »

Cette phrase, tirée de l'introduction de l'article-phare de Denis Smalley, « Spectromorphology : explaining sound-shapes » (1997), résume assez bien sa vision en tant que compositeur, ainsi que les principes à la base de son approche privilégiée, la spectromorphologie.

Smalley la définit comme un ensemble d'outils pour la description et l'analyse de l'expérience d'écoute. Ils sont relatifs à l'interaction entre les spectres sonores (*spectro-*) et la manière dont ils évoluent au cours du temps (*-morphologie*). Le système propose des modèles et des descriptions de processus, ainsi que des propositions pour comprendre les relations structurelles qui se forment

dans le flux temporel de la musique¹³ (Smalley 1997, p. 107).

La spectromorphologie n'est pas une méthode compositionnelle, mais est conçue plutôt pour devenir une aide à l'écoute spécialement dédiée à la musique électroacoustique. Comme on peut s'en douter, l'approche se base sur une attitude d'écoute particulière.

4.2 Stratégies d'écoute

4.2.1 Écoute acousmatique, écoute technologique

L'*écoute acousmatique* vient avec le désir de connaître la cause ou le mode de fabrication des sons. Cependant, ses principes de base veulent qu'il y ait une certaine rupture entre le geste réel et la production sonore comme telle, ou plutôt, entre le son et la source. En d'autres mots, elle demande de faire abstraction de l'*écoute technologique*, qui survient quand l'auditeur perçoit le geste producteur de son et l'appareillage technologique qui se trouve derrière. Dans un tel cas, ignorer la technologie revient à ignorer la source du son.

4.2.2 Écoute spectromorphologique

L'attitude d'écoute privilégiée par Smalley peut convenir à plusieurs genres de musique électroacoustique, ainsi qu'à certaines musiques instrumentales. En fait, la musique doit être partiellement ou entièrement acousmatique, en ce sens que les sources sonores sont cachées en totalité ou en partie. Notamment, le fait d'avoir recours à un enregistrement sur support rend l'expérience d'écoute acousmatique et dispose à l'écoute spectromorphologique, d'autant plus que le support permet une écoute répétée des objets d'analyse (Smalley 2009, p. 47). Les musiques instrumentales pour lesquelles on profitera particulièrement de ce type d'écoute sont celles ayant une certaine complexité spectrale et/ou timbrale, qui impliquent une certaine perte de sens de l'identité instrumentale (en d'autres mots, qui sont basées sur les timbres) ou encore qui exploitent les phénomènes de resynthèse timbrale, où l'orchestre devient une sorte d'*hyper-instrument spectromorphologique*. Enfin, l'écoute spectromorphologique se concentre

¹³Citation originale : « [T]ools for describing and analysing listening experience. The two parts of the term refer to the interaction between sound spectra (spectro-) and the ways they change and are shaped through time (-morphology). [...] A spectromorphological approach sets out spectral and morphological models and processes, and provides a framework for understanding structural relations and behaviours as experienced in the temporal flux of the music. »

sur l'expérience liée aux stimuli auditifs d'abord ; dans ce contexte, la partition est un mode de représentation inadéquat pour l'analyse perceptuelle (Smalley 1997, p. 109).

4.2.3 Propriétés intrinsèques et extrinsèques du son

En plus de faire abstraction du corps sonore (ou de l'instrument dans le cadre de la musique instrumentale), l'approche spectromorphologique tend à aller au-delà des descriptions d'événements sonores faisant référence à des éléments extrinsèques à la musique, pour se concentrer sur les paramètres internes du son. Toutefois, Smalley reste conscient du caractère inévitable d'une certaine intertextualité, en ce sens que ces paramètres internes du son tirent en fait leur signification de leur relation à des éléments extrinsèques à la musique. Autrement dit, la compréhension de l'œuvre musicale passe inévitablement par les référents culturels.

C'est ainsi que Smalley introduit le concept du rattachement à la source (*source bonding*), qu'il définit comme la tendance naturelle à relier les sons à leurs sources sonores supposées et à leurs causes, parce qu'ils semblent avoir des origines partagées ou associées entre elles¹⁴. Au-delà de la relation à la source sonore, la spectromorphologie fait référence à des phénomènes humains et/ou naturels comme les mouvements ou les processus de croissance et d'extinction.

Mais lorsqu'il y a intégration de sons instrumentaux et/ou vocaux, les choses se complexifient : l'écoute se polarise entre la musique de notes (composée de hauteurs et de rythmes) et le rattachement à la source (y compris dans l'établissement d'un lien avec le geste instrumental producteur de son). L'application de la démarche spectromorphologique à la musique instrumentale demande donc un certain effort d'abstraction. On reliera les sons à des gestes, mais de manière indirecte (Smalley 1997, p. 110-111).

4.2.4 Écoute réduite et spectromorphologie

Dans un même ordre d'idées, Smalley spécifie que la pratique de l'écoute réduite telle qu'elle a été définie par Pierre Schaeffer (1966) n'est pas compatible avec une approche spectromorphologique, pour deux raisons :

1. L'écoute réduite évite toute référence extrinsèque au matériau sonore dans son effort de faire abstraction de la source sonore.

¹⁴Citation originale : « *[Source bonding is] the natural tendency to relate sounds to supposed sources and causes, and to relate sounds to each other because they appear to have shared or associated origins.* » (p. 110)

2. L'écoute réduite provoque un changement d'échelle, et fait risquer de ne pas pouvoir sortir d'un mode d'écoute à très bas niveau, étant donné que l'on se concentre sur l'identification d'objets sonores.

Ces deux corrélats de l'écoute réduite risquent, selon Smalley, d'entraîner des distorsions perpectives liées à une vision plus globale des phénomènes musicaux (Smalley 1997, p. 111).

4.3 La relation entre le son et le geste

Un des principes à la base de ce lien entre le son et le geste qui le produit est que le geste est quelque chose d'organique. Il est lié à une expérience sensorielle et motrice, et implique en général une certaine dépense d'énergie (réelle ou fictive). Cette expérience correspond à un degré plus ou moins grand d'abstraction du geste.

4.3.1 Geste musical et abstraction

Smalley dénombre quatre niveaux d'abstraction du geste :

1. Premier ordre : Se rapporte à la production sonore directe.
2. Deuxième ordre : Se rapporte au son instrumental, et vient avec les habitudes d'écoute instrumentale. On fait abstraction du corps sonore pour se concentrer sur un instrument générique.
3. Troisième ordre : Se rapporte au geste réel ou imaginé dans la musique. Ici, la source sonore est de nature incertaine.
4. Quatrième ordre : Se rapporte aux vestiges gestuels, lorsque la source et la cause du son sont inconnus.

Il ajoute que l'habitude de la musique instrumentale implique un certain détachement par rapport à la nature du son, parce qu'on a tendance, par habitude, à l'appréhender en termes de notes. Par ailleurs, la multiplicité des niveaux d'abstraction ne pourrait pas exister sans les technologies d'enregistrement et de manipulation du son utilisées en musique électroacoustique (Smalley 1997, p. 111-112).

La pensée de Smalley s'articule donc entre une stratégie d'écoute particulière, à la fois acousmatique et connectée au geste producteur de son, ainsi qu'une façon très détaillée d'analyser ce geste et ses particularités. De plus, contrairement à l'approche proposée par Pierre Schaeffer,

la spectromorphologie peut s'exercer à plusieurs niveaux, de la plus petite cellule sonore à l'ensemble d'un mouvement ou d'une pièce. En effet, comme il l'indique, l'organisation de la structure musicale dépend du geste et du déploiement d'énergie en cours, dont dépendent à leur tour les évolutions spectrales et morphologiques du son. De ceux-ci, ensuite, découle le mouvement linéaire vers l'avant et la narrativité musicale. En résumé, la spectromorphologie permet de concevoir le geste musical, en le considérant dans sa conception élargie, dans une perspective structurelle.

4.4 Notions de base

La description de base des phénomènes sonores se fonde sur la définition de trois phases temporelles : l'amorce (*onset* en anglais), le régime soutenu (*continuant* dans le texte) et l'extinction (*termination* dans le texte). Elles sont similaires aux étapes temporelles de n'importe quelle amplitude, mais peuvent également s'appliquer à des processus de plus grande envergure.

Ensuite, sur la base de ces trois phases temporelles, Smalley dénombre trois archétypes sonores¹⁵ :

1. **L'attaque seule** – Comme son nom l'indique, la première phase temporelle, celle de l'amorce, est perceptible alors que les deux autres sont négligeables. Avec la flûte, on peut l'obtenir avec l'ensemble des techniques percussives : *pizzicati*, percussions de clé et *tongue ram*, notamment.
2. **L'attaque résonance** – Ici, l'amorce est immédiatement suivie par la résonance. On peut considérer l'ensemble des sons instrumentaux pour lesquels l'articulation est de courte durée comme s'identifiant à cet archétype. Pour la flûte, on pensera à l'ensemble des sons en staccato et aux autres sons dont l'excitation est brève.
3. **L'entretien gradué**¹⁶ – Cet archétype se caractérise par la présence d'un régime soutenu assez long pour être décelable, et qui peut être articulé de différentes manières. Son évolution peut avoir la forme d'une vague (*swelled*), être linéaire ou se rattacher à un geste précis, posé dans le but de créer une attente chez l'auditeur (Smalley 1997, p. 113). Dans le

¹⁵Des extraits sonores illustrant les trois archétypes sonores sont disponibles dans l'archive accompagnant cette thèse. Merci à Thierry Gauthier et à Mirka Sévigny pour leur aide lors des séances d'enregistrement.

¹⁶La traduction du terme *graduated continuant*, dans le texte original, est celle proposée par Stéphane Roy dans *L'Analyse des musiques électroacoustiques : modèles et propositions* (2004, p. 167).

cas de la flûte, la plupart des modes de production sonore impliquant le souffle peuvent produire des sons se rattachant à cet archétype.

4.5 Aspects spectraux du son

Jusqu'à maintenant, les propositions concernant la flûte traversière dans une perspective spectromorphologique étaient assez générales. Cependant, le vocabulaire développé par Smalley pour décrire l'occupation de l'espace spectral par un phénomène sonore est d'un très grand intérêt pour notre démarche.

4.5.1 Entre note, hauteur et bruit

Pour Smalley, la note peut être considérée de manière analogue à un atome : longtemps indivisible, on sait maintenant qu'on peut en observer la composition et l'analyser de l'intérieur. « *Une note peut être une note quand elle est vue de l'extérieur, ou plus qu'une simple note quand on en pénètre l'intérieur. En musique électroacoustique, il est cependant commun de se concentrer sur le spectre interne, et pas seulement avec les notes*¹⁷ » (Smalley 1997, p. 119).

Du côté de la hauteur des sons, Smalley indique qu'on peut l'écouter de manière intervallique, en se concentrant sur des hauteurs de notes mises en relation (ce que font la plupart des auditeurs habitués à la musique tonale), ou de manière relative ; c'est ce qui se produit quand les hauteurs sont plus isolées, et donc moins faciles à comparer entre elles.

Pour le bruit, une dimension supplémentaire est ajoutée dans la description de Smalley (qui s'ajoute aux critères de masse de Schaeffer) : son degré de transparence. Un son dit *granulaire* est plus diffus, associé aux textures aquatiques ou aériennes, aux débris, aux phénomènes de friction, tandis qu'un bruit dit *saturé* est beaucoup plus concentré. On parle plutôt de *saturation bruitée* quand « *une région de l'espace spectrale est occupée de manière si dense que toute reconnaissance de hauteur est impossible*¹⁸ » (Smalley 1997, p. 120).

Ainsi, des sons éoliens (sons de souffle) ou des *jet whistles* exécutés avec un souffle à vélocité relativement faible pourront être qualifiés de granuleux, tandis qu'un autre son faisant usage de la voix à un intervalle brouillant la perception de hauteur de la note générée par la flûte sera plus

¹⁷Citation originale : « *A note can be a note alone when viewed externally, or more than a single note when the interior is entered. Opportunities for internal spectral focus are common in electroacoustic music in general, not just with notes.* ».

¹⁸Citation originale : « *where an area of spectral space is closely packed such that pitch awareness is impossible* ».

susceptible de saturer l'espace spectral. On pourra aussi moduler le degré de transparence des sons de flûte entre ces deux extrêmes. Il est intéressant de noter que Smalley parle de textures aériennes lorsqu'il décrit les sons granuleux : il semble que ce soit dans le caractère de la flûte de correspondre à ce critère, et spécialement lorsque le mode de jeu ne produit pas de hauteur déterminée.

Par ailleurs, le degré de densité spectrale est en lien direct avec le degré de transparence d'un son. Il s'agit ici de déterminer si un son donné bloque ou laisse passer les autres sons, à différents degrés. L'évaluation ne se fait pas sur une échelle, mais plutôt grâce à des qualificatifs : plein, compressé, opaque, translucide, transparent, vide¹⁹. La densité spectrale peut aussi amplifier les impressions de proximité ou d'éloignement (Smalley 1997, p. 121).

4.5.2 Harmonicité et inharmonicité

Dans son approche, Smalley décrit le pôle harmonicité-inharmonicité de manière parallèle au pôle note-bruit. Le son inharmonique se situe quelque part entre le bruit et la note, dont il se rapproche grâce à son pattern intervallique interne. L'inharmonicité est ici quelque chose de relatif, qui gomme la perception de la hauteur. Par ailleurs, un spectre harmonique possède une organisation intervallique spécifique qui découle des propriétés vibratoires des cordes et des colonnes d'air²⁰ (Smalley 1997, p. 120). Cette définition est à ne pas confondre avec celle de l'acoustique (où les fréquences des partiels d'un spectre inharmonique dévient plus ou moins légèrement des multiples entiers de la fréquence fondamentale) : ici, l'inharmonicité est plutôt celle que l'on perçoit comme une forme d'ambiguïté dans le processus de reconnaissance des hauteurs.

Dans ce contexte, la plupart des sons de flûte peuvent être qualifiés d'harmoniques, que ce le soit par une harmonicité acoustique ou perçue. Cela dit, certaines techniques peuvent contribuer à augmenter l'inharmonicité (selon la définition spectromorphologique) du son : l'usage de la voix, ou encore de certains types de vibrato, par exemple.

¹⁹Ma traduction des mots «*filled, packed/compressed, opaque, translucent, transparent, empty.*»

²⁰Citation originale : «*Harmonic spectra have a specific intervallic organisation based on the vibrational properties of strings and columns of air.*»

4.5.3 Occupation de l'espace spectral

D'une certaine façon, nous avons abordé ce sujet dans la section précédente de ce chapitre, en décrivant les classes de masse définies par Pierre Schaeffer (1966) dans son approche morphologique. Par contre, dans l'approche spectromorphologique, l'occupation du champ spectral est décrite de manière beaucoup plus fine, quoique toujours qualitative. En effet, il s'agit d'un jugement posé sur la perception de phénomènes sonores, qui pourront ensuite guider l'écoute d'un autre auditeur.

D'abord, Smalley décrit trois niveaux d'occupation du champ des hauteurs :

1. La **canopée**, qui fait référence à la notion de voûte, ou, comme son nom l'indique, à l'étage supérieur de la forêt tropicale. La présence d'un son à ce niveau entraîne souvent une impression de flottement ou de suspension.
2. Le **centre**, dont la position peut facilement être estimée par tous (mais qui reste tout de même difficile à définir de manière précise).
3. La **racine**, qui marque une relation à la basse, au sol.

Bien sûr, ici, on dépasse la simple notion de timbre pour entrer dans le champ des hauteurs. Toutefois, la texture du timbre peut influencer l'impression que le son laisse quant à son occupation de l'espace spectral. À cet effet, Smalley fournit quatre pôles qualitatifs permettant de mieux définir la manière d'occuper l'espace (Smalley 1997, p. 121) :

1. Le pôle **vide-plénitude** : il permet de déterminer si l'espace spectral est complètement occupé, ou si les sons n'occupent que des régions limitées de celui-ci (ce qui accentue l'impression de vide). Ici, un son de flûte grave contenant beaucoup d'harmoniques ou un son joué avec usage de la voix risque de remplir l'espace, contrairement à un son plus mince joué dans le registre aigu. Toutefois, l'usage d'un vibrato ample pourrait augmenter l'espace occupé par ce son.
2. Le pôle **diffus-concentré** : ici, on fait référence à la largeur de bande occupée (en fait, à la bande du spectre que l'on perçoit comme étant occupée). Un son éolien sera naturellement plus diffus qu'un *whistle tone*, sans pour autant que le son éolien donne l'impression de remplir l'espace plus que le *whistle tone*.
3. Le pôle **trames-interstices** : on se demandera ici s'il y a présence de couches – fines ou

épaisses – dans l'espace spectral. L'exemple qui vient immédiatement en tête est l'usage de multiphoniques.

4. Le pôle **superposition-croisement** : il s'agit ici d'observer si différentes entités spectro-morphologiques interagissent dans l'espace spectral, et d'en décrire le comportement. À moins d'avoir plusieurs sons de flûte, il est plus difficile de trouver un exemple concret dans ce cas-ci.

4.6 Types de mouvements

Jusqu'à maintenant, les éléments descriptifs fournis considéraient le son dans leur dimension verticale, c'est-à-dire spectrale. Mais qu'en est-il de la morphologie des sons, ou plutôt, de leur déroulement temporel ? Sauf dans le cas de la description des archétypes sonores et des phases du son par Smalley, le fait de parler de mouvements sonores dépasse un peu le sujet du timbre instrumental. Pourtant, tout instrumentiste sait qu'il ou elle doit se doter d'une intention, d'un fil conducteur, d'une ligne de conduite afin de pouvoir modeler les sons instrumentaux de manière à ce qu'ils aient un certain intérêt, ainsi qu'une cohérence dans le cadre du discours musical.

Autrement dit, on pourrait affirmer que c'est ce qui se passe au niveau de la morphologie, c'est-à-dire de la dimension relative au déroulement temporel, qui rend les sons expressifs. De plus, le fait de donner une inflexion plutôt qu'une autre à un son instrumental aura certainement un impact sur ses qualités timbrales et sur son évolution. Comme il s'agit de caractériser le timbre de la flûte, les types de mouvements proposés ici seront fournis sur une base d'abord métaphorique. Un.e instrumentiste pourra donc les explorer afin d'élargir sa palette sonore et expressive, par l'usage de différentes techniques de jeu.

Smalley propose différentes typologies de mouvements sonores²¹ :

- **Unidirectionnel** : Celui-ci peut généralement se rapporter à un geste. Il peut être ascendant, plat ou descendant.
- **Réciproque** : Avec ce type de mouvement, on peut s'attendre à ce qui ressemble à un retour de balancier, comme lors d'une parabole, d'une oscillation ou d'une ondulation.

²¹Des extraits sonores illustrant ces trois types de mouvements sont disponibles dans l'archive accompagnant cette thèse. Merci à Thierry Gauthier et à Mirka Sévigny.

- **Cyclique** : Les mouvements de ce type ont en commun de posséder un point central et d'impliquer un certain type de rotation. Ils peuvent laisser une impression statique ou directionnelle.

Les mouvements peuvent aussi être bidirectionnels. On parlera alors d'agglomération ou de dissipation, de dilatation ou de contraction, de divergence ou de convergence, ou encore de mouvement endogène ou exogène (Smalley 1997, p. 116).

4.7 Pour terminer

L'approche spectromorphologique de Denis Smalley se distingue par deux choses. En premier lieu, sur le fait d'être basé sur l'écoute de sons fixés sur support. Ainsi, idéalement, un son instrumental devrait pouvoir être enregistré avant d'être analysé, de manière à ce que la source (la personne qui joue) ne soit pas visible, mais surtout pour pouvoir répéter l'écoute de l'objet d'analyse autant de fois que désiré. Et en deuxième lieu, l'approche se fonde sur le lien entre le phénomène sonore et un geste, qu'il soit réel, figuré ou substitué. Ce lien entre son et geste constitue une des grandes forces de l'approche de Smalley, en ce qui permet de penser le son (en l'occurrence instrumental) en termes d'énergie plutôt que comme un ensemble d'objets stéréotypés.

Les outils de description relatifs à l'occupation de l'espace spectral et aux comportements morphologiques des sons permettent d'arriver à des distinctions très fines. Pour bien profiter des avantages de l'approche spectromorphologique, il conviendra toutefois de ne pas analyser de sons génériques, mais des sons considérés dans un contexte écologique, c'est-à-dire pouvant s'inscrire dans un certain discours musical. C'est, par exemple, pour la description détaillée d'un son à obtenir dans une pièce, que l'approche dévoilera tout son potentiel dans le cadre instrumental individuel.

5 Conclusion

En terminant ce chapitre, on constate que ce sont les critères morphologiques plutôt que la typologie – autrement dit la description plus que la classification – qui sont utiles à notre démarche de caractérisation du timbre. Les deux approches présentées ici ont établi une relation

différente avec le geste producteur de son : Schaeffer tente d'en faire abstraction complète, alors que Smalley l'intègre dans ses outils de description.

Il faut garder à l'esprit que les approches typo-morphologique et spectromorphologiques ont été conçues dans un but précis (qui n'est pas nécessairement celui qui est poursuivi dans cette thèse), et qu'elles impliquent de changer la façon que l'on a d'écouter et de considérer le son. En ce sens, il faut un peu en assouplir les principes afin de pouvoir les utiliser pour appréhender le son instrumental. De même, celui-ci se doit d'être considéré dans une perspective élargie. Mais on y gagnera plus de diversité dans l'expression instrumentale, et aussi plus de flexibilité dans les nuances de jeu.

Pris comme outils compositionnels, les systèmes d'analyse développés par Schaeffer et Smalley mènent à une approche originale et créative du son instrumental et peuvent servir de pistes d'exploration. Par contre, le type de descriptions auxquelles on s'exercera impliquera de se fier à la sensibilité et à l'expertise des instrumentistes, et à leur laisser une certaine part de liberté dans le processus créatif, de manière à ce qu'ils puissent explorer les possibilités de leur instrument de façon satisfaisante et enrichissante.

Évidemment, dans le cas des deux systèmes et en ce qui nous concerne, il n'est concrètement pas possible de faire abstraction de la source sonore : on va toujours reconnaître le tuyau de la flûte et ses résonances dans le son résiduel. Il semble donc que des habiletés de reconnaissance de la technique de jeu (ou de la source sonore) combinées à une utilisation optimale des objets de description du timbre fournis par ces deux approches de l'analyse musicale perceptive que sont la typo-morphologie de Pierre Schaeffer et la spectromorphologie de Denis Smalley constituent une stratégie gagnante pour la caractérisation du timbre de la flûte traversière.

Pistes de réflexion et apports du chapitre

Instrumentistes :

- Stratégies d'écoute musicale
- Vocabulaire et outils pour décrire les sons et timbres
- Possibilité de concevoir de nouveaux exercices pour la technique et l'expression à partir des différents paramètres sonores énumérés
- Outils créatifs pour l'improvisation et l'exploration timbrale

Compositeurs.trices et musicologues :

- Stratégies d'écoute musicale
- Outils pour le développement de techniques de composition instrumentale basées sur le timbre
- Outils d'analyse musicale basés sur la perception
- Outils de description des timbres musicaux pour une meilleure transmission des œuvres mixtes et instrumentales basées sur d'autres paramètres que les hauteurs de et la durée

Chapitre 5

Les descripteurs acoustiques du timbre et leurs corrélats perceptifs

Sommaire

1	Introduction	137
2	Timbre instrumental et perception sonore	138
3	Descripteurs acoustiques du timbre musical	148
4	Conclusion	166

1 Introduction

Nous voici arrivés au cinquième chapitre, le chapitre médian de cette thèse. Il a été conçu pour servir de pont entre les trois premiers et les trois derniers chapitres de cette réflexion interdisciplinaire sur le timbre instrumental, et sur celui de la flûte traversière en particulier.

Jusqu'à présent, nous nous sommes plongés au cœur de l'expertise instrumentale, avec un tour d'horizon de la pédagogie et de l'esthétique de la flûte traversière, ainsi que des modes de jeu développés afin d'enrichir les possibilités expressives de l'instrument. Quelques pistes ont été proposées afin d'arriver à une classification des techniques étendues de la flûte, puis il a été démontré que les outils d'analyse musicale perceptive pouvaient être utilisés avec succès lorsqu'il s'agissait de décrire le timbre instrumental et de comprendre comment une grande diversité de

sons instrumentaux pouvait être intégrée de manière cohérente dans un langage compositionnel. Ces explorations ont permis d'acquérir un vocabulaire riche et précis pour la description verbale du timbre de la flûte traversière.

À partir de ce chapitre, cependant, on fera appel à d'autres disciplines de recherche, comme l'acoustique, la psychoacoustique, les sciences de la *Music Information Retrieval* et l'informatique musicale. Le timbre sera abordé de manière plus systématique ; en quelque sorte, on essaiera de savoir ce qui s'y cache et ce qui le rend si particulier. En d'autres mots, on tentera de savoir ce qui le caractérise sur les plans physique et perceptif.

Dans les prochaines pages, la notion même de timbre sera définie d'un point de vue scientifique. On verra que le processus à la base de sa perception sert non seulement à identifier l'objet physique et le geste qui en sont à l'origine, mais aussi à le qualifier. Après quelques définitions, on fera ensuite la revue des expériences en psychoacoustique sur la perception du timbre instrumental. Enfin, il sera question des descripteurs acoustiques du timbre, des méthodes computationnelles pour les calculer, puis des outils informatiques qui seront utilisés dans les prochains chapitres afin de procéder à nos analyses.

Champs d'expertise

- Psychoacoustique musicale
- Traitement du signal et audionumérique
- *Music information retrieval*

2 Timbre instrumental et perception sonore

2.1 Définitions

2.1.1 Qu'est-ce que le timbre ?

Même après des décennies de recherche sur le sujet, le timbre semble être un concept difficile à définir sans équivoque. On sait que c'est un attribut du son et on l'associe à la notion de couleur, notamment en anglais et en allemand, langues dans lesquelles les expressions *sound color* en anglais et *Klangfarbe* en allemand servent à le désigner.

La première définition habituellement proposée – en fait la seule qui fasse l'unanimité – est celle du American Standard National Institute (ANSI 1960) :

Le timbre est l'attribut de la sensation auditive qui se définit par les termes qui permettent à un.e auditeur.trice d'émettre un jugement quant à la dissimilarité de deux sons ayant la même hauteur et la même intensité, et lorsqu'ils sont présentés de manière similaire. [...] Le timbre dépend principalement du spectre du stimulus, mais il dépend aussi de la forme d'onde, de la pression acoustique, de la région fréquentielle du spectre, et des caractéristiques temporelles du stimulus¹.

Ainsi, on a déterminé que le timbre était autre chose que la durée d'un son, ou encore que la sensation de hauteur et la sensation d'intensité associées à ce son. De plus, on sait qu'il s'agit d'un paramètre multidimensionnel qui dépend de plusieurs facteurs. À ceci, Grey (1975) ajoute que le timbre sert à désigner les qualités particulières qui caractérisent un son musical donné. Le terme peut renvoyer aux propriétés du son qui servent à identifier un type de source sonore comme un instrument ou une famille d'instruments, mais aussi désigner les propriétés d'une source instrumentale particulière, comme ce son de hautbois qui est soit foncé, plat, brillant, ou encore strident (Grey 1975, p. 1).

En se basant sur ces prémisses, la triple définition du timbre proposée par Marozeau (2004) est d'une grande utilité. Marozeau distingue :

1. Le **timbre-identité**, qui « *peut servir à désigner les propriétés permettant la reconnaissance d'une catégorie de source sonore. [...] Le timbre caractérise ici une impression sonore générale : toutes les guitares ont le même timbre, quelles que soient les caractéristiques de l'instrument, du musicien, de la nuance ou de la note jouée.* »
2. Le **timbre-individualité**, qui « *peut être utilisé afin de caractériser une source particulière. [...] Le timbre caractérise encore une impression globale mais limitée à une source unique ou à une association : source plus musicien.* »
3. Le **timbre-qualité**, un terme qui sert à caractériser *la perception d'un son par d'autres qualités que la hauteur, la durée, la sonorité ou la localisation.* » Ici, la définition du mot timbre « *correspond à l'esprit de la définition de l'ANSI* ».

¹Citation originale : « *Timbre is that attribute of auditory sensation in terms of which a listener can judge that two sounds similarly presented and having the same loudness and pitch are dissimilar. [...] Timbre depends primarily upon the spectrum of the stimulus, but it also depends upon the waveform, the sound pressure, the frequency location of the spectrum, and the temporal characteristics of the stimulus.* » Cette définition est citée dans de nombreux écrits sur le timbre, dont ceux de Grey 1975, p.1 et de Marozeau 2004, p. 159.

Le timbre est donc associé à une sensation, mais plus encore, à un type de perception. À ce sujet, Hajda et al. (2004) citent Carterette et Friedman (1974) et leur définition de la perception, en tant que « *moyen par lequel l'organisme transforme, organise, et structure l'information provenant de l'environnement sous forme de données sensorielles ou mnémoniques*² ». Ils ajoutent que le timbre, tout comme la hauteur, est un artefact de la perception (Hajda et al. 2004, p. 254).

2.2 Identification de la source sonore

Le timbre musical est ce qui permet à la musique de se concrétiser. On ne l'inclut pas toujours dans les analyses musicales, mais en faire abstraction est presque impossible. En fait, comme le soulignent McAdams et Giordano (2010), le timbre « *est un des véhicules perceptifs principaux pour la reconnaissance, l'identification et le suivi au cours du temps d'une source sonore.* » On peut donc le considérer comme un « *ensemble de dimensions porteuses de forme en musique* » (McAdams et Giordano 2010, p. 1). En d'autres mots, c'est en partie grâce au timbre qu'on arrive à percevoir certaines structures musicales et à effectuer une ségrégation du flux auditif lors de l'écoute d'une pièce.

Mais encore, l'oreille étant habituée à identifier les causes d'un stimulus sonore – un mécanisme de survie bien utile dans certaines situations – la perception du timbre renvoie directement à son origine. Ainsi, comme le dit Jean-Claude Risset, « *[l]e timbre d'un instrument est lié à sa structure en tant que système vibrant : cette structure est voyante et stable pour un dispositif mécanique, d'où l'identité robuste des instruments acoustiques* » (Risset 2004, p. 144). De plus, certaines propriétés du timbre sont associées à des aspects physiques particuliers des instruments de musique. Les propriétés spectrales servent par exemple à la perception de la structure géométrique de l'instrument ; les propriétés spectro-temporelles donnent des indices sur la perception du matériel des instruments idiophones. En outre, les propriétés spectrales et temporelles peuvent aussi jouer un rôle dans la perception de types de gestes musicaux servant à mettre l'instrument en vibration (McAdams 2013, p. 47).

Selon Castellengo et Dubois, la perception du timbre renvoie à toute une série d'habitudes d'écoute, découlant de la culture musicale de l'individu. Le timbre musical est donc « *plus que*

²Ma traduction de « *[Perception is a] way in which the organism transforms, organises, and structures information arising from the world in a sense data or memory* ». Provient de CARTERETTE, E.C. et M.P. FRIEDMAN (éd.) (1974), Préface au *Handbook on perception : Vol. I : Historical and philosophical roots of perception*. New York : Academic Press, xiii ; cité par Hajda et al. 2004, p. 254.

du signal », il caractérise un objet culturel, et sa perception coïncide avec une certaine orientation cognitive. Les deux auteures définissent d'ailleurs deux processus en cours lors de l'évaluation du timbre musical : l'identification de la source, et la qualification (Castellengo et Dubois 2007, p. 27-29). Toutefois, le fait de qualifier un timbre perçu demande un effort supplémentaire, en ce sens qu'on doit dépasser l'étape d'identification de la source, comme l'expliquent McAdams et Giordano :

Notre prédisposition à identifier la source sonore et [à] la suivre au cours du temps empêcherait une perception plus relative pour laquelle les différences de timbre seraient perçues comme un mouvement à travers [les dimensions timbrales] plutôt que comme un simple changement de source sonore (McAdams et Giordano 2010, p. 3).

2.2.1 Rôle des transitoires dans l'identification de la source

Les transitoires correspondent aux moments qui se trouvent de part et d'autre de la partie soutenue d'un son musical : respectivement l'attaque et l'extinction. En faisant référence, entre autres, aux expériences de Pierre Schaeffer avec l'enregistrement d'un son de piano dont l'attaque aurait été coupée, Risset (2004) souligne que le rôle des transitoires est important dans la reconnaissance de la source : « *la suppression de l'attaque de certains sons instrumentaux enregistrés sur bande magnétique rend leur identification pratiquement impossible* » (Risset 2004, p. 139). On verra que cette intuition musicale – celle de l'importance de l'attaque dans la reconnaissance de la source sonore – a été confirmée par de nombreuses études sur la perception du timbre instrumental en psychoacoustique.

En fait, il semble que ce soit la suppression de la transition entre l'attaque et la partie soutenue du son, plutôt que la suppression de l'attaque elle-même qui nuise à la détection de la source (Hajda et al. 2004, p. 276). Toutefois, même si une bonne part de l'information fournie sur la source sonore se retrouve dans la portion du son correspondant aux transitoires d'attaque, une reconnaissance est aussi possible à partir de la partie soutenue du son à elle seule et ce, spécialement lorsqu'il y a présence de vibrato dans le son (McAdams et Giordano 2013, p. 74).

2.2.2 Détection de spécificités timbrales

Selon Risset, si l'oreille ignore généralement les relations de phase, elle est toutefois très sensible aux variations fréquentielles, « *ce paramètre physique restant généralement très stable*

lors de la propagation du son entre source et auditeur ». Et il ajoute : « *l'oreille est à l'affût d'accidents, d'idiosyncrasies du son qui l'aident à remonter à sa source* » (Risset 2004, p. 143). Le timbre générique (ou timbre-identité) d'un instrument donné est généralement assez facile à reconnaître ; cependant, ces petites irrégularités caractéristiques du jeu instrumental « naturel » permettent de dissiper tout doute quant aux informations perceptives reçues.

Les chercheurs en psychoacoustique nomment ces idiosyncrasies du son des *spécificités*. Elles peuvent apparaître de façon fortuite lors d'un enregistrement, mais peuvent aussi être présentes la plupart du temps. Un exemple souvent donné est celui du bruit de l'étouffoir du clavecin, régulièrement présent dans les enregistrements de sons de cet instrument. Les spécificités peuvent être de deux types : des attributs dont le degré varie (comme la rugosité d'une attaque, l'inharmonicité, le grain, le glissement de hauteur, ou encore le caractère creux de la couleur timbrale), et des attributs d'une nature plus discrète (qui se traduisent généralement par la présence de petits bruits de différentes natures, souvent durant les transitoires d'attaque et d'extinction)³ (McAdams et al. 1995, p. 189).

Ces spécificités, du moins celles qui sont involontaires, sont l'une des raisons majeures pour lesquelles les études sur la perception du timbre font usage de sons de synthèse : ceux-ci permettent, dans une certaine mesure, d'éviter la présence de spécificités. La synthèse permet également de déterminer à l'avance et de manière exacte les propriétés physiques des sons qui seront évalués. Un bon compromis consiste en l'usage de l'analyse-synthèse des sons : on peut ainsi générer des instances de sons instrumentaux « nettoyés » de toutes spécificités, mais dont la sonorité se rapproche de façon assez fidèle de l'original.

Toutefois, le degré de spécificité d'un son se mesure aussi, tout simplement, à la facilité qu'on a à le reconnaître. Ce degré peut être calculé lors de l'analyse de résultats d'expériences sur la perception de timbres faisant usage d'évaluations de dissimilarité (*dissimilarity rating* en anglais, une notion qui sera définie plus tard dans ce chapitre). Ainsi, un son dont le degré de spécificité est très élevé serait susceptible d'avoir des propriétés uniques qui accentuent sa différence d'avec les autres timbres (Krumhansl 1989, p. 48).

³Citation originale : « *the features noted seem to be of two types : attributes that vary in degree (such as raspiness of attack, inharmonicity, graininess, deviation of pitch glide, hollowness of tone color) and attributes of a more discrete nature that vary in perceptual strength (such as a high frequency zzzit! on the offset, a suddenly damped or pinched offset, the presence of a clunk or thud).* ».

2.3 Étude de la perception du timbre instrumental

2.3.1 Caractère multidimensionnel du timbre

Le timbre est indissociable de sa nature complexe ; contrairement à la sensation de hauteur, il est un attribut perceptif multidimensionnel dont les dimensions sont qualitativement différentes. Du point de vue acoustique, on peut définir une multitude de propriétés des sons qui ne sont pas nécessairement liés à la hauteur, à l'intensité ou à la durée. Celles-ci pourraient faire partie d'une définition du timbre ; or, il semble que seules certaines de ces propriétés ont des effets réels sur la perception du son. De plus, on présuppose que tous ces attributs du son sont indépendants les uns des autres. Cela pose quelques problèmes supplémentaires lorsqu'il s'agit de cerner la nature du timbre (Krumhansl 1989, p. 43, 48).

2.3.2 Analyse multidimensionnelle de proximité (MDS)

L'analyse multidimensionnelle de proximité (ou MDS, pour *Multidimensional Scaling* en anglais) est un type d'analyse qui permet de tenir compte, comme son nom l'indique, de ce caractère multidimensionnel du timbre. Le but est de représenter un ensemble d'objets dans un espace multidimensionnel à partir d'évaluations de similarités ou de dissemblances (*similarity* ou *dissimilarity rating* en anglais). Ainsi, l'espace obtenu « *contient n points correspondant aux n objets du corpus* : plus deux objets sont similaires, plus leurs points sont proches dans l'espace. *Cette technique permet de révéler les relations existant entre les objets du corpus* » (Marozeau 2004, p. 149).

Par ailleurs, le but de la MDS est de révéler l'existence de relations à l'intérieur d'un ensemble de stimuli, en les représentant dans un espace à dimensions réduites, généralement euclidien⁴, de manière à ce que les distances entre les stimuli reflètent leurs dissemblances relatives⁵ (McAdams et al. 1995, p. 177). Cette représentation équivaut, en quelque sorte, à un espace mental de représentation des timbres. Mais encore, elle permet d'avoir accès aux corrélats acoustiques des dimensions perceptives et aux particularités de cet espace telles qu'elles sont relevées par

⁴L'espace euclidien est généralement le type d'espace dans lequel on représente des données de manière graphique. Il s'agit d'un espace à 2, 3 dimensions (ou plus) dans lequel, par exemple, il n'y a qu'une seule droite qui puisse relier deux points donnés, et dans lequel pour une droite et un point, il n'existe qu'une seule droite pouvant passer par ce point qui soit parallèle à la première droite. Dans le cas présent, la représentation se fait dans un espace euclidien à 2 ou 3 dimensions dont les axes sont orthogonaux.

⁵Citation originale : « *The object of the MDS is to reveal relationships among a set of stimuli by representing them in a low-dimensional (usually Euclidean) space so that the distances among the stimuli reflect their relative dissimilarities.* »

l’analyse. Par la suite, il devient possible de développer des modèles prédictifs à partir des informations fournies par cette représentation pour le contrôle de la synthèse sonore, ou encore pour développer des algorithmes de recherche plus efficaces dans les bases de données sonores⁶ (McAdams 1999, p. 86). En bref, les études basées sur la MDS sont réputées pour être les plus adéquates quand il s’agit de mettre en lumière les paramètres physiques du timbre les plus pertinents du point de vue de la perception, et qui sont susceptibles d’avoir une importance dans bon nombre de situations, comme la reconnaissance vocale ou l’écoute musicale⁷ (Caclin et al. 2005, p. 472).

McAdams et Giordano soulignent toutefois que « *[de] telles représentations ne sont utiles que dans la mesure où elles sont : 1) généralisables au-delà de l’ensemble des sons étudiés, 2) robustes par rapport aux changements dans le contexte musical et 3) généralisables à d’autres tâches d’écoute que celles utilisées pour construire le modèle* (McAdams et Giordano 2010, p. 2) ».

2.3.3 Algoritmes d’analyse multidimensionnelle de proximité

Plusieurs algorithmes ont été développés pour effectuer des analyses multidimensionnelles de proximité. Ils permettent de mettre l’accent sur différents aspects de l’analyse.

- **MDSCAL** (Torgerson 1952⁸) : L’algorithme fournit la distance entre les points, et l’espace obtenu peut être représenté sous toutes les orientations possibles (Marozeau 2004, p. 152). Les dimensions sont fixées de manière arbitraire et restent invariables au cours d’une même analyse (McAdams et al. 1995, p. 178).
- **INDSCAL** (Carroll et Chang 1970⁹) : Cet algorithme se fonde sur l’hypothèse que tous les sujets se basent sur les mêmes dimensions perceptives, mais que tous ne les pondèrent pas de la même façon. L’espace est fixé dans une orientation bien précise (Marozeau 2004, p. 152). L’algorithme génère la mesure des distances euclidiennes pondérées entre les différents sons analysés. Le modèle euclidien pondéré n’est généralement pas celui qui est retenu à cause de l’exactitude accrue des mesures, mais plutôt parce que les dimensions y acquièrent une pertinence sur le plan psychologique (McAdams et al. 1995, p. 178-179).

⁶Citation originale : « *There are several aims in performing multidimensional scaling (MDS) to derive a timbre space. The main aim is to determine the components of the mental representation of musical timbre. A second one is to quantify the acoustical correlates of the dimensions and features of this representation. And a third one is to develop predictive models on the basis of the first two results for sound-synthesis control and intelligent search in sound databases.* »

⁷Citation originale : « *MDS studies are thus presumed to highlight the most perceptually salient timbre parameters that are likely to be of importance in a variety of situations (voice recognition, music listening).* »

⁸TORGERSON, W.S. (1958). *Theory and methods of scaling*. New York : Wiley. Cité dans McAdams et al. 1995, p.178.

⁹CARROLL, J.D. et J.J. CHANG, Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an n-way generalization of Eckart-Young decomposition. *Psychometrika*, 35, p. 283-319. Cités, entre autres, dans McAdams et al. 1995, p. 178-179.

- **EXSCAL** (Winsberg et Carroll 1989¹⁰) : L'algorithme permet à chaque stimulus de se situer sur une dimension qui lui est propre. « *Ainsi, si un stimulus possède une caractéristique particulière, cette spécificité n'engendrera pas de dimensions supplémentaires ne contenant qu'elle* » (Marozeau 2004, p. 153). En résumé, il s'agit d'une extension du type de modèle euclidien utilisé auparavant, qui permet de tenir compte des spécificités de chaque stimulus (McAdams 1999, p. 88).
- **CLASCAL** (Winsberg et De Soete 1993¹¹) : Cet algorithme est basé sur l'implémentation du INDSCAL, à l'exception que les poids ne sont pas attribués à chaque individu, mais à des classes latentes d'individus ayant des patterns de réponse corrélés (Marozeau 2004, p. 153). Les classes sont dites latentes parce qu'on ne sait pas à l'avance à quelle classe un participant donné est susceptible d'appartenir. Le nombre de classes latentes est inférieur ou égal au nombre de participants dont les résultats sont analysés (McAdams et al. 1995, p. 179).
- **CONSCAL** (Winsberg et De Soete 1997¹²) : Cet algorithme a été pensé pour être utile dans des situations où un nombre restreint de paramètres physiques peuvent être utilisés pour décrire les stimuli, et où il est probable que les individus utilisent ces attributs pour effectuer leur évaluation de dissimilarité. Il tient compte, comme le CLASCAL, des classes latentes de participants (Caclin et al. 2005, p. 472).

2.4 Expériences sur la perception du timbre instrumental

Une des premières applications de l'analyse multidimensionnelle de proximité s'est avérée avoir lieu dans le domaine de la phonétique. Pols et al (1969¹³) ont demandé à leurs participants d'évaluer 11 voyelles synthétiques grâce à des comparaisons en triades, et ont ainsi généré un espace tridimensionnel permettant d'en visualiser la proximité relative. Ils ont ensuite vérifié la corrélation entre les dimensions perceptives dégagées lors de cette expérience et les attributs physiques des sons analysés, et ont démontré qu'il est possible de prédire la nature du jugement perceptif du timbre de sons complexes (Marozeau 2004, p. 25).

Peu après, Plomp (1970¹⁴) a mené une expérience dont les stimuli étaient une série de 9 sons de synthèse basés sur trois fréquences fondamentales (200, 250 et 320 Hz), et comprenant

¹⁰ WINSBERG, S. et J.D. CARROLL, (1989). A quasi-nonmetric method for multidimensional scaling via an extended Euclidean model. *Psychometrika*, 54(2), p. 217-229. Cités, entre autres, dans Krumhansl 1989, p. 43.

¹¹ WINSBERG, S. et G. DE SOETE, (1993). A latent-class approach to fitting the weighted Euclidean model, CLASCAL. *Psychometrika*, 58, p. 315-330. Cités, entre autres, dans Caclin et al. 2005, p. 471.

¹² WINSBERG, S. et G. DE SOETE, (1997). Multidimensional scaling with constrained dimensions : CONSCAL, *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 50, p. 55-72. Cités, entre autres, dans Caclin et al. 2005, p. 471.

¹³ POLS, J.C.W., VAN DER KAMP, L.J. et PLOMP, R. (1969). Perceptual and physical space of vowel sounds. *Journal of the Acoustical Society of America*, 46, p. 458-467. Cités dans Marozeau 2004, p. 25.

¹⁴ PLOMP, R., (1970). « Timbre as a multidimensional attribute of complex tones. » Dans PLOMP, R. et SMOORENBURG, G.F., (éd.), *Frequency analysis of periodicity detection in hearing*. Sijhoff : Leiden. Cités dans Hajda et al. 2004, p. 281.

un unique formant pouvant se situer à trois fréquences différentes (2000, 2500 et 3200 Hz). La solution obtenue est un espace à deux dimensions, corrélées respectivement avec la fréquence du formant et avec la fréquence fondamentale. L'expérience a montré qu'une enveloppe spectrale similaire accentuait l'impression de similitude entre deux stimuli (Marozeau 2004, p. 31).

Wessel (1973¹⁵) a repris un ensemble d'échantillons utilisé par Plomp (1970), constitué de sons de synthèse obtenus à partir de la partie soutenue de sons instrumentaux (3 cuivres, 3 bois et 3 instruments à cordes frottées). Les deux dimensions de l'espace qu'il a obtenu sont corrélées respectivement aux comportements relatifs des basses et des hautes fréquences durant le segment d'attaque, et au centroïde spectral. Pour ce dernier, Wessel utilise le terme « brillance ». Quant à la dimension relative à l'attaque, elle a permis de distinguer les trois familles instrumentales (Hajda et al. 2004, p. 284).

Le travail de Grey, amorcé dans sa thèse de doctorat (1975) et dont il fait part dans son article de 1977 est probablement l'un des plus cités dans les publications ayant pour sujet la perception du timbre instrumental. Dans son expérience, qui a servi de base pour beaucoup d'autres par la suite, les participants ont dû évaluer la dissimilarité entre des paires de sons de synthèse obtenus à partir de sons instrumentaux enregistrés et analysés, avant d'être resynthétisés, par une technique de filtres hétérodynes. L'algorithme de MDS INDSCAL a permis d'isoler trois dimensions. Le premier axe correspond à la distribution de l'énergie spectrale (largeur de bande ou étalement spectral, et centre de gravité spectral ou centroïde) ; le deuxième correspond au degré de synchronicité des harmoniques lors de l'attaque et au degré de variation du spectre au cours du temps (flux spectral) ; quant au troisième, il correspond à la présence (ou à l'absence) d'énergie à faible amplitude dans les hautes fréquences durant le segment d'attaque.

Krumhansl (1989), avec l'algorithme EXSCAL de Winsberg et Carroll (1989¹⁶) est arrivée à des conclusions semblables. Son expérience, basée sur l'évaluation de 21 sons de synthèse par modulation de fréquence (FM), a permis d'isoler des dimensions relatives à l'enveloppe temporelle (rapidité de l'attaque), à l'enveloppe spectrale (brillance) et au flux spectral (aspect de l'évolution temporelle des composantes spectrales). Krimphoff et al. (1991) ont ensuite

¹⁵WESSEL, D.L., (1973). Psychoacoustics and music : A report from Michigan State University. *PACE : Bulletin of the Computer Arts Society*, 30, p.1-2. Cité dans Hajda et al. 2004, p. 284.

¹⁶WINSBERG, S. et J.D. CARROLL, (1989). A quasi-nonmetric method for multidimensional scaling via an extended Euclidean model. *Psychometrika*, 54(2), p. 217-229. Cités dans Krumhansl 1989, p. 43.

refait l'expérience dans le but de la valider. Les deux premières dimensions de leur espace-solution sont sensiblement les mêmes que dans l'expérience originale : logarithme du temps d'attaque (*log-rise time* en anglais – plutôt que le temps d'attaque lui-même), et centroïde spectral. Toutefois, la présence d'une dimension relative au flux spectral n'a pas pu être vérifiée ; c'est plutôt l'irrégularité de l'enveloppe spectrale (la mesure de déviation à partir de trois composantes successives d'un spectre statique – dont la moyenne a été calculée sur la durée totale du son analysé) qui a été mise de l'avant (Hajda et al. 2004, p. 288-289).

Quant à McAdams et al. (1995), ils ont pu confirmer les deux premières dimensions obtenues par Krumhansl (1989) – relatives aux enveloppes temporelles (logarithme du temps d'attaque) et spectrales (centroïde spectral). La dimension relative au flux spectral a aussi été identifiée, mais n'était pas corrélée de manière significative avec les résultats obtenus lors de cette expérience. L'hypothèse posée par les auteurs est que l'importance de cette dimension perceptive n'est pas la même pour tous les participants¹⁷ (et par extension, pour la population en général). Les résultats ont été obtenus grâce à l'algorithme CLASCAL. Bien que certains facteurs biographiques aient influencé les résultats à travers les classes latentes de participants, on n'a remarqué aucune différence claire entre musiciens professionnels, amateurs et non-musiciens (McAdams et al. 1995, p. 189-190).

Finalement, les expériences de Caclin et al. (2005) ont été réalisées à partir de sons de synthèse conçus exprès pour mesurer l'influence de facteurs physiques précis, comme les propriétés de l'attaque, le centroïde, le flux spectral ainsi que l'irrégularité spectrale. Encore une fois, les deux premières dimensions étaient corrélées au centroïde et au temps d'attaque. Dans le cas de cette deuxième dimension, les résultats étaient une fois de plus mieux corrélés avec le logarithme du temps d'attaque qu'avec le temps d'attaque comme tel. Les résultats en ce qui a trait au flux spectral étaient mitigés ; les auteurs indiquent que l'importance du flux spectral en tant que descripteur participant à la différenciation des timbres pourrait être sensible à des effets contextuels, et particulièrement à la variation des autres dimensions perceptives.

En effet, l'effet perceptif d'un flux spectral élevé semble plus grand lorsque le centroïde de la partie soutenue du son est lui aussi élevé. Inversement, on peut affirmer que l'effet perceptif

¹⁷Citation originale : « *The acoustic correlates of the three common dimensions in our spatial model were log-rise time, spectral centroid, and spectral flux. [...] The third dimension seems to be less stable across subject populations.* »

d'un centroïde élevé est plus grand lorsque la valeur du flux spectral est élevée. De plus, la dissimilarité moyenne entre deux sons est plus élevée quand les valeurs relatives au flux spectral sont élevées elles aussi. Conséquemment, la perception du flux spectral semble plus inhibée lorsque l'influence du temps d'attaque est plus grande que lorsque les sons se distinguent par leur centroïde spectral. Enfin, la présence du paramètre relatif à l'irrégularité spectrale parmi les dimensions perceptives a été reconnue, mais son importance est, elle aussi, relative au contexte et au type de source sonore évaluée (Caclin et al. 2005, p. 476-477, 479-481).

En résumé, la plupart des études sur la perception du timbre avec usage de la MDS ont montré l'importance du centre de gravité spectral (centroïde) et du temps d'attaque dans l'évaluation du timbre. D'autres facteurs comme le flux spectral (McAdams et al. 1995), l'étalement spectral (Marozeau et al. 2003¹⁸), l'irrégularité spectrale (Krimphoff et al. 1994) et la synchronicité des harmoniques durant l'attaque (Grey 1977) ont aussi été mentionnés (Caclin et al. 2005).

Par ailleurs, il semble que le mode de production sonore influence directement le jugement de dissimilarité chez les participants aux expériences. McAdams et Giordano (2010, p. 3) indiquent que « *La vaste majorité des espaces de timbres publiés [...] révèlent que les sons produits avec des structures de résonance semblables (instruments à cordes comparés aux instruments à vent) ou avec des mécanismes d'excitation semblables (excitation impulsive, comme le piano, comparée à une excitation entretenue, comme la flûte), occupaient la même région de l'espace.* ». On peut donc affirmer, pour conclure, que le timbre renvoie effectivement aux caractéristiques de la source sonore qui le produit.

3 Descripteurs acoustiques du timbre musical

3.1 Définitions

3.1.1 Psychoacoustique et *Music Information Retrieval* (MIR)

Au cours de la section précédente, le caractère multidimensionnel du timbre ainsi que sa complexité sur le plan perceptif ont été mis de l'avant. En effet, tel que le souligne Mathieu Barthet dans sa thèse de doctorat, le timbre « *ne pourra se définir qu'en tant qu'attribut perceptuel*

¹⁸MAROZEAU, J., DE CHEVEIGNÉ, A., MCADAMS, S. et WINSBERG, S., (2003). The dependency of timbre on fundamental frequency, *Journal of the Acoustical Society of America*, 114, p. 2946-2957. Cités dans Caclin et al. 2005, p. 472.

référant à plusieurs paramètres physiques. [...] Il semble que l'identité instrumentale est régie par l'existence de relations entre paramètres dont l'évolution est corrélée » (Barthet 2008, p. 39). Cependant, le timbre instrumental est appréhendé de deux façons fondamentalement différentes par la psychoacoustique et par les sciences de la *Music Information Retrieval* (MIR).

Cette différence d'approche s'explique facilement quand on considère les buts poursuivis par les adeptes des deux disciplines. Comme l'indiquent Siedenburg, Fujinaga et McAdams,

en MIR, la recherche sur le timbre tourne principalement autour de la classification instrumentale, où des systèmes computationnels représentent le signal audio par un ensemble de descripteurs et utilisent cette représentation pour assigner aux sons instrumentaux une appartenance à des classes (catégories instrumentales). En psychologie de la musique, on a le plus souvent étudié la perception du timbre à partir d'évaluations de dissimilarité [*dissimilarity ratings* en anglais] qui sont corrélées aux descripteurs, de manière à révéler quels sont les paramètres les plus saillants du point de vue de la perception subjective du timbre¹⁹ (Siedenburg et al. 2016, p. 2).

3.1.2 Propriété, dimension et descripteur du signal

Dépendamment de la discipline de recherche à laquelle on se réfère, différents termes sont utilisés afin de désigner les spécificités du signal audio. En MIR et en recherche computationnelle, on parle de **propriétés** (*features*) du signal. Elles sont de nature discrète, étant directement calculées à partir du signal audio numérisé. Quant aux **dimensions**, elles ont, contrairement aux premières, un caractère continu et se rapportent davantage à la psychologie de la perception. Finalement, le terme **descripteur** est souvent utilisé de manière assez générale, et peut désigner indifféremment des informations de nature discrète ou continue (Moffat et al. 2015, p. 1).

Plus précisément, comme l'indique Grégoire Carpentier,

Un descripteur (ou descripteur audio) peut être défini comme une fonction permettant de calculer, directement à partir du signal, certaines caractéristiques acoustiques ou perceptives du son. C'est donc avant tout une méthode de calcul, même si l'usage commun fait qu'on parle fréquemment de descripteur pour désigner la valeur qui en résulte.

Nous avons jusqu'à maintenant surtout mentionné l'utilité des descripteurs acoustiques dans des disciplines comme la psychoacoustique et la MIR, mais ils sont également d'un grand intérêt en

¹⁹Ma traduction de la citation suivante : « *For MIR, research on timbre mostly revolves around instrument classification where computational systems represent audio signals via an ensemble of descriptors and use this representation to assign class (instrument category) memberships to instrument sounds. Music psychology has most often studied timbre perception by relying on dissimilarity ratings, which are correlated with descriptors in order to reveal the most salient physical parameters underlying subjective timbre perception.* »

création musicale assistée par ordinateur et en musique mixte. À ce propos, Carpentier ajoute : « *[Les descripteurs du signal] délivrent une information condensée, de haut niveau d'abstraction par rapport à la représentation du signal comme suite d'échantillons. Pourvus d'une signification perceptive, ils constituent à n'en pas douter une piste sérieuse pour la formalisation du timbre* » (Carpentier 2008, p. 35).

Généralement, les propriétés du signal sont extraites en grand nombre afin d'obtenir le plus haut taux de succès possible dans les tâches de classification automatique propres à la MIR, alors que quelques dimensions perceptives seulement s'avèrent être significatives lors de tâches de différentiation de stimuli sonores par des participants humains. De plus, les propriétés acoustiques (*features*) du signal n'ont pas toujours un lien direct avec les dimensions perceptives du timbre, étant donné que la classification automatique des sons est une tâche qui s'effectue de manière assez indépendante du jugement humain (Siedenburg et al. 2016, p. 2, 8).

3.1.3 Descripteurs de bas et de haut niveau

Par ailleurs, Moffat, Ronan et Reiss distinguent également les descripteurs de bas et de haut niveau. Les premiers sont calculés directement à partir du signal audio, souvent d'une fenêtre de calcul à l'autre²⁰. Parmi les descripteurs de bas niveau, on retrouve notamment le taux de passage à zéro (*zero-crossing rate*), le centroïde spectral et l'énergie contenue dans le signal. Quant aux descripteurs de haut niveau, ils sont plus susceptibles d'être directement en lien avec des dimensions perceptives ou musicales et sont sémantiquement plus significatifs (Moffat et al. 2015, p. 1). La brillance, la rugosité ou encore la détection d'accords et de tonalités en sont de bons exemples.

3.1.4 Descripteurs globaux et descripteurs instantanés

Enfin, les descripteurs du timbre peuvent être globaux ou instantanés, tel que l'explique Geoffroy Peeters (2004, p. 1). Les descripteurs globaux sont calculés sur l'ensemble du signal, comme le temps d'attaque, et souvent grâce à des méthodes statistiques, comme dans le cas de plusieurs descripteurs spectraux. Les descripteurs instantanés, eux, sont calculés pour chaque fenêtre temporelle (ce qui correspond à un court segment d'environ 60 millisecondes dans le

²⁰En anglais dans l'article : « *in a frame-by-frame basis* »

cas de la Timbre Toolbox²¹), puis sont traités grâce à un module de modélisation temporelle de manière à obtenir une valeur finale pour chacun d'entre eux.

3.2 Méthodes computationnelles pour l'analyse acoustique du timbre

Durant la première décennie des années 2000, le standard MPEG-7 et le projet Cuidado, ainsi que plusieurs librairies d'extraction de propriétés du signal (ou plus simplement, de descripteurs acoustiques) ont été développés à partir d'outils auparavant dédiés à la reconnaissance vocale, ouvrant la voie non seulement à la conception d'algorithmes de reconnaissance des sons, mais également à la recherche en acoustique musicale et en traitement de signal faisant usage des descripteurs du timbre. Les outils computationnels qui ont été utilisés dans le cadre de cette thèse et qui seront présentés plus bas en découlent directement.

3.2.1 Standard MPEG-7

Le standard MPEG-7 (pour *Multimedia Content Description Interface*) a été établi pour permettre la description complète de contenus multimédia, de manière à en faciliter la recherche par les utilisateurs grâce à l'encodage de métadonnées en format XML. La partie audio du standard MPEG-7 a été certifiée ISO/IEC 15938-4 en 2002, puis ajustée en 2006 (Wikipédia, 2018 [site web](e)). Sur la page Web dédiée à la section audio de la norme MPEG-7 ((s.d.) [site web]), on dénombre 63 descripteurs regroupés en cinq catégories : les descripteurs temporels, les descripteurs spectraux, les descripteurs cepstraux²², les descripteurs perceptifs et les descripteurs audio spécifiques (en lien avec la périodicité du signal).

3.2.2 Projet Cuidado

Le projet Cuidado (2003 [site web]) (pour *Content-based Unified Interfaces and Descriptors for Audio/music Databases Available Online*) a été coordonné par l'Ircam entre 2001 et 2003 et réalisé en parallèle avec la mise en place du standard MPEG-7, à laquelle plusieurs chercheurs du projet Cuidado ont d'ailleurs contribué. Dans le même esprit, une série de 57 descripteurs ont été

²¹Voir Peeters et al. 2011.

²²Le cepstre est obtenu à partir d'une transformation inverse du spectre, c'est-à-dire à partir du domaine fréquentiel. Autrement dit, en appliquant la transformée de Fourier inverse au logarithme de la transformée de Fourier du signal (voir Wikipédia, 2017 [site web](a)), on pourra obtenir une représentation de la forme du spectre qui donne accès à d'autres descripteurs, comme les *Mel-Frequency Cepstral Coefficients* (MFCC), qui se sont avérés à plusieurs reprises être très efficaces lorsque utilisés dans des algorithmes de classification automatique de sons instrumentaux (Siedenburg et al. 2016, p. 4).

définis et dotés d'un tag XML pour pouvoir être implémentés dans des librairies d'extraction, le but étant de créer un standard pour faciliter la recherche de fichiers audio dans des bases de données de grande envergure. L'article de Geoffroy Peeters (2004), qui décrit de façon détaillée les descripteurs définis dans le cadre du projet, propose une classification de ces descripteurs audio qui sera reprise lors de la conception de la Timbre Toolbox, quelques années plus tard. Cette classification sera présentée en détail plus bas.

Par la suite, au début des années 2000, plusieurs librairies d'extraction de propriétés (*features* en anglais) du signal ont été développées. La liste des outils présentés ici n'est pas exhaustive, mais permettra de démontrer qu'il existe plusieurs approches possibles, tout dépendant du but poursuivi et des besoins en recherche que l'outil doit combler.

3.2.3 Librairie jAudio

Créée en 2005 dans un souci de rassembler en une même ressource plusieurs techniques d'extraction des propriétés du signal, la librairie **jAudio** a été développée par des chercheurs de l'Université McGill (Daniel McEnnis, Cory McCay, Ichiro Fujinaga et Philippe Depalle) dans le but de rassembler la plupart des algorithmes d'extraction des propriétés du signal déjà mis au point à l'époque en un seul et même outil d'analyse. En plus d'éviter les problèmes de compatibilité et les variantes ou les erreurs dans l'implémentation des algorithmes, avoir accès à un grand nombre de descripteurs en une seule ressource permet d'augmenter l'efficacité des démarches d'extraction de l'information musicale en MIR. La librairie, qui effectue l'analyse directement à partir des fichiers audio, est implementée en langage Java et retourne des fichiers en format XML ou ARFF, selon la préférence de l'utilisateur.trice. Elle a aussi l'avantage d'être dotée d'une interface utilisateur (GUI) (McEnnis et al. 2005, p. 601–602) et de permettre l'analyse d'une grande quantité de fichiers lors d'un même processus (Moffat et al. 2015, p. 2).

3.2.4 Librairie libXtract

Grandement inspirée du projet jAudio, la librairie *libXtract* a été développée par Jamie Bullock, du département de technologies musicales du UCE Birmingham Conservatoire. Dans l'article accompagnant sa présentation à la 2007 International Computer Music Conference, Bullock indique que son travail vise à répondre aux besoins exprimés en faveur d'un outil

permettant l'extraction en temps réel de descripteurs audio, ce pourquoi la librairie jAudio n'est pas conçue. De plus, libXtract a été implémentée en langage C, ce qui facilite son intégration dans une variété de programmes et de langages. À l'époque, elle a d'ailleurs été intégrée à un *plug-in* Vamp ainsi qu'à des objets externes (*externals*) PureData et Max/MSP (Bullock 2007, p. 1-2).

3.2.5 MIRToolbox

Quant à la boîte à outils **MIRToolbox**, présentée en 2007 par Olivier Lartillot et Petri Toivainen de l'Université de Jyväskylä, elle présente

une série de fonction intégrées, écrites en Matlab et dédiées à l'extraction de propriétés musicales à partir de fichiers audio. [...] [La MIRToolbox] a été développée dans le but particulier de permettre le traitement par ordinateur d'un large éventail de descripteurs à partir de bases de données de fichiers audio, qui pourront être utilisés lors d'analyses statistiques²³ (Lartillot et Toivainen 2007, p. 1).

Les propriétés musicales mentionnées comprennent des descripteurs liés au timbre, à la tonalité, au rythme et à la structure formelle, qui sont calculés à partir de différentes représentations du signal audio (niveau RMS, enveloppe d'amplitude, enveloppe spectrale, série de filtres). La modularité du système (grâce à une approche orientée-objet) et son implémentation dans l'environnement Matlab assurent une grande flexibilité lors du traitement des données et permettent d'utiliser celles-ci dans une grande variété de projets d'analyse musicale (Lartillot et Toivainen 2007).

3.2.6 Timbre Toolbox

La Timbre Toolbox a été développée en collaboration avec l'Ircam et le CIRMMT, de manière à répondre à la fois aux besoins des chercheurs en *Music Information Retrieval* et en psychologie de la musique. Implémentée dans l'environnement Matlab, la Timbre Toolbox est conçue pour l'extraction de descripteurs de bas et de haut niveau et propose une sélection de descripteurs différente de celle de la MIRToolbox, avec pour objectif de respecter le standard Cuidado dont elle s'inspire directement (Moffat et al. 2015, p. 2). On propose aussi différents types de représentation du signal à partir desquels le calcul des descripteurs peut s'effectuer, ainsi que

²³Ma traduction de la citation suivante : « *an integrated set of functions written in Matlab, dedicated to the extraction of musical features from audio files. [...] [The MIRToolbox] has been designed in particular with the objective of enabling the computation of a large range of features from databases of audio files, that can be applied to statistical analyses.* »

différentes méthodes statistiques permettant d'obtenir une valeur résumant l'ensemble du signal pour les descripteurs dont le calcul varie au cours du temps (Peeters et al. 2011, p. 2903).

3.3 Analyse du timbre avec la Timbre Toolbox

La Timbre Toolbox est l'environnement que nous avons privilégié dans le cadre de cette thèse afin de mener la première des deux séries d'expériences sur le timbre de la flûte. Ce choix découle des résultats d'une comparaison entre la MIRToolbox et la Timbre Toolbox, présentés dans un article par Kazazis, Esterer, Depalle et McAdams (2017). On y indique notamment que « *dans le cas des descripteurs spectraux, la Timbre Toolbox fournit des résultats plus exacts et [que] pour certains groupes de sons, elle performe nettement mieux que la MIRToolbox²⁴* » (Kazazis et al. 2017, p. 147). Même si, selon l'article, les résultats sont obtenus avec la Timbre Toolbox ne sont pas toujours complètement fiables (par exemple dans le cas des descripteurs basés sur une estimation de l'enveloppe d'énergie temporelle ou ceux basés sur une représentation du signal harmonique), cet environnement d'analyse nous semblait être celui qui répondait le mieux à nos besoins.

3.3.1 Propriétés d'un descripteur

Dans l'article de 2011 présentant la Timbre Toolbox, on dénombre trois propriétés d'un descripteur :

1. La **fenêtre temporelle** sur laquelle le descripteur est calculé. Cela peut se faire sur l'ensemble d'un fichier audio ou sur certaines portions spécifiques, comme l'attaque ou la partie soutenue. Cette propriété correspond à la notion de descripteur global ou instantané définie plus haut (Cf. point 3.1.3).
2. La **représentation du signal** utilisée pour le calcul du descripteur (par exemple, la forme d'onde, l'enveloppe d'énergie temporelle ou la transformée de Fourier à court terme).
3. La **définition du descripteur** comme telle (Peeters et al. 2011, p. 2903).

La combinatoire de ces trois propriétés donne la possibilité d'extraire une très grande quantité de descripteurs du signal audio. Il est naturellement possible de le faire, mais afin d'éviter une

²⁴Ma traduction de la citation suivante : « *for spectral descriptors, the Timbre Toolbox performs more accurately and on some sound sets outperforms the MIRToolbox* » (Kazazis et al. 2017, p. 147).

redondance ainsi qu'une surabondance de données, il s'avère approprié de choisir le type de représentation du signal la plus pertinente d'après les buts de l'expérience à mener.

3.3.2 Pré-analyse et représentation du signal

Aussi décrit de manière quasi identique dans l'article présentant le standard Cuidado (Peeters 2004, p. 3), ce processus d'analyse préalable à l'extraction des descripteurs consiste à préparer différentes représentations du signal audio, qui seront ensuite traitées par les algorithmes d'extraction. En plus de la possibilité de calculer certains descripteurs directement à partir de la forme d'onde (ou du signal audio - AS, comme le nombre de passage à zéro et les coefficients d'autocorrélation), on compte quatre types de représentation du signal :

1. **L'enveloppe d'énergie temporelle (TEE)** : Elle est obtenue à partir d'une transformée de Hilbert du signal audio, lissée grâce à un filtre passe-bas. On l'utilise pour le calcul de descripteurs de nature temporelle comme la durée respective des phases d'attaque et de décroissance, le logarithme du temps d'attaque, la durée perçue et les paramètres de modulation du signal.
2. **La transformée de Fourier à court terme (STFT)** : Elle est utilisée pour la plupart des descripteurs spectraux. On peut choisir entre deux types de représentation du spectre d'amplitude dans le domaine fréquentiel : selon une échelle d'amplitude linéaire (STFTmag) ou selon une échelle d'amplitude au carré (STFTpow).
3. **La représentation selon un modèle auditif (ERB)** : Cette représentation est obtenue grâce à l'utilisation d'une banque de filtres passe-bande reproduisant le phénomène de bandes critiques, que l'on retrouve dans le système auditif humain. Elle suit le concept de la bande rectangulaire équivalente (ou Equivalent Rectangular Bandwidth), tel que proposé par Moore et Glasberg (1983²⁵). Dans le cas présent, le nombre de filtres rectangulaires adjacents dépend de la fréquence d'échantillonnage.
4. **La représentation sinusoïdale de partiels harmoniques (Harmonic)** suit le principe voulant que tout signal puisse être représenté comme une somme de composantes sinusoïdales, dont l'amplitude et la fréquence oscillent lentement. Ici, une transformée est

²⁵MOORE, B.C.J et B. R. GLASBERG, « Suggested formulae for calculating auditory-filter bandwidths and excitation patterns. », *Journal of the Acoustical Society of America*, 74, p. 750-753. Cité dans Peeters et al. 2011, p. 2904.

opérée sur le signal avec une fenêtre Blackman dont la durée est supérieure à celle de la fenêtre utilisée lors de la transformée de Fourier à court terme (STFT), de manière à obtenir une meilleure résolution fréquentielle. Par défaut, le nombre de partiels calculés est limité à 20. Conséquemment, le registre fréquentiel couvert dépend ensuite de la fréquence fondamentale du son analysé. Cette représentation est utilisée pour le calcul de descripteurs spécifiques comme le tristimulus ou le rapport entre les harmoniques impairs et pairs (Peeters et al. 2011, p. 2904-2906).

Certains descripteurs peuvent être extraits à partir de plus d'un type de représentation, mais donneront des résultats différents selon la représentation choisie.

3.4 Descripteurs acoustiques du timbre musical (Timbre Toolbox)

Toutes les définitions de descripteurs ci-dessous correspondent à leur implémentation dans la Timbre Toolbox, telle que décrite dans l'article de Peeters et al. (2011, p. 2906-2909).

3.4.1 Descripteurs calculés à partir du signal audio

Coefficients d'autocorrélation (AS_AutoCorr)

Ils représentent la distribution spectrale du signal dans le domaine temporel. L'autocorrélation permet de détecter la présence d'éléments répétitifs dans un signal donné. Dans la Timbre Toolbox, ils sont par défaut au nombre de 12 (un paramètre qu'il est possible de modifier au besoin), tel qu'exprimé dans l'équation suivante :

$$xcorr(c) = \frac{1}{xcorr(0)} \sum_{n=0}^{L_n-c-1} (s(n) \cdot s(n+c)) \quad (5.1)$$

où L_n est la longueur de la fenêtre (en nombre d'échantillons) et c le décalage temporel de l'auto-corrélation (en nombre d'échantillons).

La distance entre deux valeurs n successives équivaut à l'inverse de la fréquence d'échantillonnage. Pour cette raison, le résultat obtenu lors du calcul des coefficients d'autocorrélation dépend donc de la fréquence d'échantillonnage. Il s'agit du seul descripteur de la Timbre Toolbox pour lequel ce soit le cas.

Taux de passages à zéro (AS_ZcrRate – Zero-crossing rate)

Il s'agit d'une mesure du nombre de fois que le signal croise l'axe des abscisses durant un intervalle de temps donné. Les sons périodiques tendent à obtenir un taux de passage à zéro plus petit que les sons bruités. Ce descripteur est calculé pour chaque fenêtre temporelle, et le taux de passages à zéro est ensuite normalisé en fonction de la durée de la fenêtre, en secondes (Peeters et al. 2011, p. 2906).

3.4.2 Descripteurs temporels

On divise habituellement le déroulement d'un son musical en quatre étapes : l'**attaque** (partie souvent instable durant laquelle l'énergie présente dans le signal monte jusqu'à la stabilisation de la vibration), le **déclin** (ou *decay* en anglais – la faible baisse d'énergie précédant la stabilisation de la vibration), la **partie soutenue** du son (ou *sustain* – où le régime vibratoire est stable), et finalement la **décroissance** (ou *release*), qui marque l'arrêt de l'apport énergétique au système vibratoire et donc la fin de la partie soutenue du son. Ce type d'enveloppe d'amplitude est communément nommée ADSR (pour *attack-decay-sustain-release*).

Comme trois de ces quatre étapes sont susceptibles de ne pas être décelées lors de l'analyse, ou tout simplement de ne pas être présentes dans le signal (décroissance presque absente, partie soutenue réduite dans les sons courts, extinction absente dans le cas de sons tronqués), la définition de plusieurs descripteurs temporels donnée par Peeters s'appuie sur une modélisation simplifiée de l'enveloppe d'amplitude. Dans celle-ci, l'étape de déclin suivant l'attaque (*decay*) n'est pas estimée, et la partie soutenue et l'extinction sont fusionnées. On nomme cette enveloppe AR (pour *attack-rest*) (Peeters 2004, p. 7)

Temps d'attaque (TEE_Att - Attack Time)

Comme l'indique Mathieu Barthet dans sa définition des descripteurs temporels, « *l'attaque* réfère à la portion instable d'un signal comprise entre son amorce (*onset* en anglais) et le moment où le système mécanique vibratoire parvient à un état stable lorsqu'une onde stationnaire est établie» (Barthet 2008, p. 68). Dans le cas de la Timbre Toolbox, le début et la fin de la période d'attaque sont déterminés grâce à la méthode du plus faible effort (*weakest effort method*), qui

consiste à calculer une série de seuils à partir du taux de variation de la pente de l'enveloppe d'amplitude, et à prendre comme début et fin de l'attaque les moments où ces seuils sont atteints respectivement avec l'effort le plus faible et le plus fort (Peeters 2004, p. 8, Peeters et al. 2011, p. 2906-2907).

Logarithme du temps d'attaque (TEE_LAT - *Log-Attack Time*)

Il s'agit ici du logarithme en base 10 de la valeur correspondant au temps d'attaque.

Temps de déclin (TEE_Dec - *Decay Time*)

Ce temps correspond au début de la décroissance de l'enveloppe temporelle du signal. Ce moment est estimé d'après la moyenne entre le temps de fin de l'attaque et la position temporelle du maximum de l'enveloppe du signal²⁶.

Pente de l'attaque (TEE_AttSlope - *Attack Slope*)

La pente de l'attaque est le deuxième paramètre, avec sa durée, qui permet de la définir. Il s'agit en fait de la moyenne pondérée des pentes des segments de la courbe d'amplitude compris entre les seuils calculés pour déterminer le temps d'attaque, soit entre le début et la fin de l'attaque. Dans le calcul de la moyenne, les pentes correspondant aux segments se situant au milieu de la période d'attaque ont un poids plus élevé que celles se situant aux extrêmes, selon une fonction gaussienne (Peeters et al. 2011, p. 2907).

Pente de décroissance (TEE_DecSlope - *Decay Slope*)

Le calcul de la pente de décroissance se base sur un modèle exponentiel décroissant de l'énergie de l'enveloppe d'amplitude, à partir du maximum d'amplitude (Peeters et al. 2011, p. 2907). Elle correspond au coefficient α , estimé à partir d'une régression linéaire sur le logarithme de l'enveloppe d'énergie du signal (Peeters 2004, p. 2004, paragraphe 3.1.3.1).

²⁶D'après une correspondance par courriel entre l'auteure de cette thèse et Geoffroy Peeters, faisant référence aux méthodes de calcul utilisées dans le cadre du projet CUIDADO (Peeters 2004) et dans la Timbre Toolbox (Peeters et al. 2011).

Temps d'extinction (TEE_Rel - *Release Time*)

À ne pas confondre avec la durée de la phase *release* de l'enveloppe ADSR, l'extinction correspond à la fin de la région temporelle utilisée pour estimer le paramètre α , dont il était question dans le paragraphe précédent sur la pente de décroissance. La section correspondant au temps d'extinction débute à l'atteinte du point où l'énergie du signal commence à être inférieure à 40% de sa valeur maximale, et se termine à l'extinction complète du son²⁷.

Centre de gravité temporel (TEE_TempCent - *Temporal Centroid*)

Il s'agit du centre de gravité temporel par rapport à la quantité d'énergie présente dans l'enveloppe d'amplitude. Ce descripteur permet, comme plusieurs autres, de distinguer les sons percussifs (excitation instantanée) des sons soutenus (excitation continue).

Durée effective ou perçue du signal (TEE_EffDur - *Effective Duration*)

Cette mesure vise à donner une estimation de la durée perçue d'un son donné. On mesure la période durant laquelle l'amplitude du son analysé se trouve au-dessus d'un certain seuil. Après avoir effectué une série de tests empiriques, Peeters et al. (2011, p. 2907) ont fixé ce seuil à 40% de l'amplitude maximale.

Modulation d'énergie

Cette catégorie comprend deux descripteurs relatifs à une modulation d'énergie dans le signal : la fréquence (TEE_FreqMod - *Frequency of Energy Modulation*) et l'amplitude (TEE_AmpMod - *Amplitude of Energy Modulation*). Ils sont mesurés sur la partie soutenue du signal, afin de rendre compte de la présence éventuelle d'un trémolo ou d'un vibrato dans le son évalué. Après la détection de la partie soutenue du son et le calcul d'une transformée de Fourier discrète (DFT) sur celle-ci, un algorithme tente de détecter la présence d'un sommet d'amplitude se situant dans

²⁷Les détails concernant la pente de décroissance et le temps d'extinction ont été obtenus à partir de la même correspondance par courriel que précédemment.

l'intervalle 1-10 Hz, à partir duquel la modulation du signal sera mesurée (Peeters 2004, p. 9, Peeters et al. 2011, p. 2907).

Valeur efficace (RMS) (TEE_RMSEnv - *RMS-Energy Envelope*)

C'est avec la racine carrée de la moyenne quadratique de l'amplitude du signal que l'on obtient la valeur efficace, ou valeur RMS pour *root mean square* en anglais. Ici, la valeur est calculée à partir de la représentation de l'enveloppe d'amplitude en fonction du temps, sur la durée totale du signal évalué.

3.4.3 Descripteurs spectraux

Dans la Timbre Toolbox, les descripteurs appartenant à cette catégorie peuvent être obtenus à partir de plusieurs représentations, dont les transformées de Fourier à court terme (STFTmag et STFTpow), les modèles auditifs (ERBfft et ERBgam) et le modèle de représentation harmonique (Harmonic). Pour obtenir l'abréviation qui apparaît dans la liste de résultats de l'extraction, il suffit d'ajouter le préfixe correspondant au type de représentation choisi (par exemple, "STFT-mag_SpecCent" pour le centroïde spectral obtenu à partir de la transformée de Fourier à court terme en représentation linéaire).

Le centroïde, l'étalement, l'asymétrie et l'aplatissement spectraux sont obtenus à partir de calculs statistiques sur l'ensemble du signal. La pente spectrale globale, la décroissance spectrale et le roulement spectral sont quant à eux des évaluations d'aspects de la courbe du spectre de fréquences. L'aspect plat de la courbe (ou mesure d'aplatissement de la courbe) spectrale et la mesure de crête spectrale donnent quand à elles des indications sur le caractère bruité ou périodique du signal. Enfin, le flux spectral est un descripteur spectro-temporel.

Centroïde spectral (SpecCent - *Spectral Centroid*)

Le centroïde est une mesure du centre de gravité spectral du spectre sonore. Il indique la fréquence à laquelle l'énergie du spectre se concentre ; la quantité d'énergie présente dans le signal est

égale de part et d'autre de cette fréquence. Comme l'ont indiqué Zwicker et Scharf (1965²⁸), la brillance du son est un attribut perceptif hautement corrélé au centroïde. Celui-ci est calculé pour chaque fenêtre d'analyse, puis la moyenne de toutes ces valeurs est calculée afin de générer la valeur finale du centroïde.

Étalement spectral (SpecSpread - *Spectral Spread*)

L'étalement spectral se traduit par la mesure de l'écart type (*standard deviation* en anglais) qui caractérise la distribution de l'énergie spectrale autour de la valeur du centroïde.

Asymétrie spectrale (SpecSkew - *Spectral Skewness*)

Il s'agit de la mesure d'asymétrie d'une distribution, ici celle de l'énergie spectrale autour du centroïde. Une valeur nulle indique une distribution symétrique ; une valeur négative se traduit par une plus grande quantité d'énergie dans la région fréquentielle supérieure au centroïde, tandis qu'une valeur positive se traduit par une plus grande énergie dans les basses fréquences.

Aplatissement spectral (SpecKurt - *Spectral Kurtosis*)

Cette dernière mesure de la distribution de l'énergie spectrale nous renseigne sur l'aplatissement de cette distribution autour de la fréquence du centroïde. Une distribution normale (ou gaussienne) se traduit par une valeur égale à 3 ; une valeur inférieure à 3 indique une courbe plus aplatie, tandis que la distribution sera plus pointue si la valeur est supérieure à 3 (Peeters et al. 2011, p. 2907-2908).

Pente spectrale globale (SpecSlope - *Spectral Slope*)

La valeur de ce descripteur est calculée d'après une régression linéaire sur l'ensemble des valeurs d'amplitude du spectre. Peeters et al. (2011, p. 2908) indiquent que cette mesure est linéairement indépendante du centroïde spectral.

²⁸ZWICKER, E. et SCHARF, B., (1965). A model of loudness summation. *Psychological Review*, 72, p. 3-26. Cités dans McAdams et Cunibile 1992, p. 2.

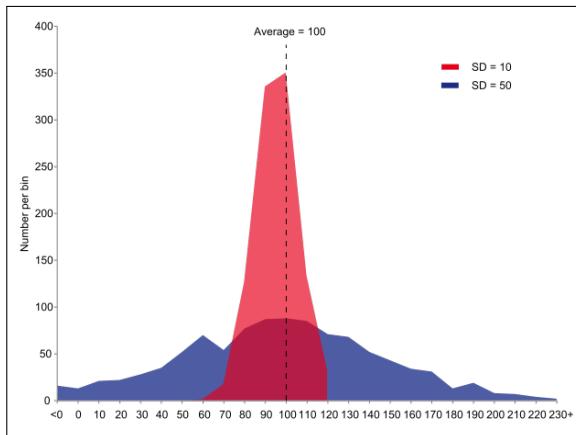


FIGURE 5.1 – Étalement (*spread*) autour d'une valeur moyenne.
Crédit : JRBrown [domaine public], de Wikimedia Commons.

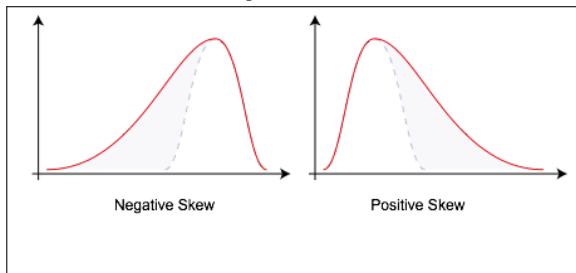


FIGURE 5.2 – Mesure d'asymétrie (*skewness*). Crédit : Rodolfo Hermans (Godot), de Wikimedia Commons

Décroissance spectrale (SpecDecr - *Spectral Decrease*)

La décroissance spectrale est une mesure proposée par Krimphoff (1993²⁹), qui se traduit par une moyenne des pentes se situant entre les fréquences f_k et f_1 . L'accent est ainsi mis sur les pentes des fréquences plus graves.

Roulement spectral (SpecRollOff - *Spectral Roll-Off*)

Il s'agit de la fréquence sous laquelle se trouve 95% de l'énergie du spectre. Dans le cas du roulement spectral mesuré sur une représentation du spectre harmonique du signal, la fréquence du roulement spectral correspond plus ou moins à la limite entre le contenu harmonique et le bruit contenu dans les hautes fréquences (Peeters et al. 2011, p. 2908).

²⁹KRIMPHOFF, J., (1993), *Analyse acoustique et perception du timbre*, mémoire de master, Université du Maine, Le Mans, France. Cité dans Peeters et al. 2011, p. 2908.

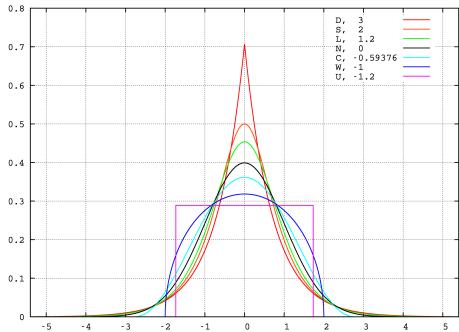


FIGURE 5.3 – Mesure d’aplatissement (*kurtosis*). Crédit : MarkSweep, de Wikimedia Commons.

Mesure de l’aspect plat du spectre (SpecFlat - *Spectral Flatness*)

Il s’agit du rapport entre les moyennes géométrique et arithmétique du signal, qui donne une bonne idée de l’aspect plus ou moins plat de la courbe du spectre. Contrairement à ce qui se passe avec les algorithmes de traitement de la voix, le calcul est effectué ici sur l’ensemble des fréquences du signal, au lieu d’être effectué sur plusieurs bandes de fréquences. Un spectre parfaitement harmonique obtient habituellement une valeur proche de zéro, alors qu’un signal non périodique (un bruit blanc, par exemple) obtient une valeur proche de 1 (Peeters et al. 2011, p. 2908).

Mesure de crête spectrale (SpecCrest - *Spectral Crest*)

La valeur de crête spectrale correspond au rapport entre la valeur d’amplitude maximale et la moyenne arithmétique des amplitudes du signal. Comme la mesure de l’aspect plat du spectre (*flatness*), elle a d’abord été proposée dans le contexte du traitement de signaux vocaux (Johnston 1988³⁰).

Flux spectral (SpecVar - *Spectral Variation or Flux*)

D’abord nommé *variation spectrale* par les auteurs de la Timbre Toolbox, le flux spectral est un descripteur spectro-temporel pouvant être calculé sur différentes représentations du signal. Cette valeur représente le taux de variation du signal au cours de sa durée. La méthode de calcul

³⁰JOHNSTON, J., (1988). Transform coding of audio signals using perceptual noise criteria. *IEEE Journal on Selected Areas in Communication*, 6(2), p. 314-323. Cité dans Peeters et al. 2011, p. 2908.

proposée par Krimphoff et al. (1991) équivaut à 1 moins la corrélation normalisée entre les amplitudes successives du signal.

Mesure d'énergie spectrale (FrameErg - *Spectral Frame Energy*)

Il s'agit de la somme des amplitudes au carré du signal, provenant soit d'une représentation obtenue à partir d'une transformée de Fourier à court terme (STFT) ou à partir du spectre harmonique. Dans ce cas, l'amplitude de la fenêtre d'analyse est normalisée, de manière à ce que sa longueur ou sa forme n'influencent pas le calcul de cette valeur (Peeters et al. 2011, p. 2907).

3.4.4 Descripteurs spécifiques à la représentation harmonique du signal

Les descripteurs suivants nécessitent une représentation du signal sous forme de partiels harmoniques. Autrement dit, le calcul s'effectue d'après les amplitudes et les fréquences obtenues lors de la décomposition du signal en partiels harmoniques. Ils varient au cours du temps ; la valeur finale résultant du calcul est donc une moyenne de l'ensemble des valeurs calculées sur la durée du signal.

Mesure d'énergie harmonique (Harmonic_HarmErg - *Harmonic Energy*)

Elle équivaut à la somme de l'énergie contenue dans l'ensemble des partiels harmoniques du signal. Autrement dit, il s'agit de la portion périodique de l'énergie du signal.

Mesure d'énergie bruitée (Harmonic_NoiseErg - *Noise Energy*)

L'énergie bruitée, quant à elle, rassemble toute énergie qui n'est pas contenue dans les partiels harmoniques. On en obtient la valeur en soustrayant l'énergie harmonique de l'énergie totale.

Caractère bruité du signal (Harmonic_Noisiness - *Noisiness*)

Cette mesure correspond au rapport entre l'énergie bruitée et l'énergie totale du signal.

Fréquence fondamentale (Harmonic_F0 - Fundamental Frequency)

Dans la Timbre Toolbox, la fréquence fondamentale est estimée grâce à l'algorithme de Camacho et Harris (2008³¹).

Inharmonicité (Harmonic_InHarm - Inharmonicity)

Pour l'inarmonicité, on mesure la déviation fréquentielle entre les partiels du signal et ceux d'un spectre parfaitement harmonique généré à partir du calcul de la fréquence fondamentale. Concrètement, il s'agit de la somme pondérée des déviations de chaque partiel du signal d'après ceux du spectre harmonique (Peeters et al. 2011, p. 2909).

Irrégularité spectrale harmonique (Harmonic_HarmDev - Harmonic Spectral Deviation)

L'irrégularité spectrale harmonique consiste également en une mesure de déviation, mais effectuée sur les amplitudes des partiels du signal. On compare ceux-ci à ceux d'une enveloppe spectrale lisse. La mesure est effectuée d'après le calcul proposé par Krimphoff et al. (1991).

Tristimulus (Harmonic_TriStim 1-2-3)

Souvent comparé aux coefficients RGB pour les couleurs dans le domaine visuel, les trois coefficients du tristimulus donnent une bonne idée de la répartition de l'énergie à travers les partiels harmoniques. Le calcul est basé sur la proposition de Pollard et Jansson (1982³²) et s'effectue par défaut (dans la Timbre Toolbox) sur les 20 premiers partiels harmoniques du signal. Le premier coefficient correspond au rapport entre le premier partiel et l'énergie totale des 20 premiers partiels. Le deuxième coefficient correspond au rapport entre la somme des partiels 2, 3 et 4, et l'énergie totale des 20 premiers partiels. Quant au troisième coefficient, il correspond au rapport entre la somme des partiels 5 à 20, et l'énergie totale des 20 premiers partiels.

³¹CAMACHO, A. et HARRIS, J., (2008). A sawtooth waveform inspired pitch estimator for speech and music. *Journal of the Acoustical Society of America*, 124, p. 1638-1652. Cités dans Peeters et al. 2011, p. 2909.

³²POLLARD, H. et JANSSON, E., (1982). A tristimulus method for the specification of musical timbre. *Acustica*, 51, p. 162-171. Cités dans Peeters et al. 2011, p. 2909.

Rapport d'énergie harmonique impair-pair (**Harmonic_OddEvenRatio - Odd to Even Ratio**)

Pour ce dernier descripteur, on effectue le rapport entre la somme des énergies contenues dans les partiels d'ordre impair, et la somme des énergies contenues dans les partiels d'ordre pair. Afin de donner une idée des distinctions rendues possibles par ce descripteur, Peeters et al. (2011, p. 2909) donnent comme exemple la comparaison avec le son de clarinette (rapport élevé) et le son de trompette (rapport plus près de 1).

4 Conclusion

Dans ce chapitre, une notion générale de timbre a été définie, pouvant être utilisée dans le cadre de plusieurs disciplines. On a vu que le timbre avait une double fonction du point de vue perceptif : la première étant de permettre l'identification de sa source et la seconde, d'être perçue en tant que qualité sonore pouvant être intégrée dans un discours. Ensuite, une revue des méthodes utilisées en psychoacoustique pour l'étude de la perception du timbre instrumental a été présentée.

Puis le timbre a été abordé du point de vue de ses descripteurs acoustiques, soit d'une perspective plus technique, nécessitant l'usage d'outils informatiques. On a vu que ces outils étaient conçus de différentes manières selon l'objectif poursuivi. Cela dit, si plusieurs de ces outils informatiques avaient pour but au départ de permettre une classification efficace des sons dans le cadre de l'analyse de bases de données de grande envergure, ils peuvent aussi être utilisés afin de déterminer les propriétés physiques de plusieurs types ou nuances de timbres instrumentaux.

Les descripteurs acoustiques implémentés dans la Timbre Toolbox seront utilisés dans les deux chapitres suivants afin de mieux cerner la nature acoustique des différents modes de jeu de la flûte traversière.

Pistes de réflexion et apports du chapitre

- Mieux comprendre la définition et la nature du timbre sonore ainsi que ses fonctions.
- Construire des ponts entre les différentes disciplines scientifiques (et artistiques) qui ont le timbre comme objet d'étude (et de création).
- Mieux comprendre les aspects perceptifs et computationnels du timbre.

Chapitre 6

Espaces de timbres acoustiques de la flûte traversière

Sommaire

1	Introduction	167
2	Méthodologie	169
3	Résultats	176
4	Discussion	201
5	Conclusion	205

1 Introduction

Les expériences sur la perception du timbre instrumental rapportées au chapitre précédent ont permis de dégager les caractéristiques du timbre musical qui permettent la différenciation des sons chez la plupart des auditeurs, comme le temps d'attaque, le centroïde, le flux spectral et l'irrégularité spectrale. On a aussi présenté un ensemble de descripteurs acoustiques du timbre implémentés dans la Timbre Toolbox.

Plutôt que d'être consacré aux questions de la perception sonore, ce chapitre aura pour but d'effectuer une analyse des aspects acoustiques du timbre de la flûte traversière avec des méthodes computationnelles. On y explorera la notion d'espace de timbre, c'est-à-dire le fait de situer un

ensemble de timbres instrumentaux dans un espace à deux ou trois dimensions constituées à partir de caractéristiques acoustiques susceptibles de les différencier entre eux.

En d'autres mots, l'objectif principal de ce chapitre est d'observer les différences entre plusieurs groupes de timbres propres à la flûte traversière à partir de leurs propriétés acoustiques. À partir de l'extraction de descripteurs acoustiques du timbre grâce à la Timbre Toolbox et d'un tri efficace de ces données, on sera en mesure de déterminer lesquels de ces descripteurs caractérisent le mieux les différences en termes de timbre-qualité pour la flûte. De plus, à partir de la position des différents groupes de sons dans des espaces de timbres multidimensionnels, on pourra déterminer dans quelle mesure les différentes catégories de sons se distinguent les unes des autres.

L'expérience dont il est question dans ce chapitre et dont les résultats seront approfondis dans le chapitre suivant a été pensée comme une étude de cas, où c'est le répertoire timbral d'une seule instrumentiste (l'auteure de cette thèse) qui sera examiné. L'idée était de partir d'une conception du timbre qui soit la plus étendue possible, de manière à couvrir l'ensemble de la palette personnelle de l'instrumentiste. Ainsi, un assez grand nombre de timbres, obtenus avec différents modes de production sonores, seront mis en rapport dans cette analyse.

Bien sûr, l'idéal aurait été de choisir des catégories timbrales définissables objectivement – dont les descripteurs acoustiques correspondent à des aspects perceptifs qui font consensus au sein d'un groupe représentatif d'interprètes-flûtistes, ou encore de choisir un ensemble de réalités physiques dont la caractérisation est sans équivoque. Or, ceci demande de se limiter à un nombre restreint d'aspects du timbre (par exemple la brillance du son, ou les types d'attaque), et de passer par plusieurs étapes successives d'expérimentation afin d'en valider la pertinence et la constance, tant sur le plan acoustique que perceptif.

Comme cette étude s'inscrit dans une perspective multidisciplinaire, qui tient compte des aspects créatifs des métiers d'instrumentiste et de compositeur.trice, le but ici était plutôt de défricher un vaste terrain et de donner une idée de ce à quoi ressemble le territoire timbral d'un.e instrumentiste, dans toute son étendue. Ce travail est donc préalable à d'autres en acoustique ou en psychoacoustique, où on pourra chercher à valider un ou plusieurs des aspects du timbre dont on traite ici.

Cette expérience permettra d'examiner plusieurs caractéristiques du son de la flûte et éventuellement, de les mettre en relation. Parmi ces caractéristiques, on considérera la nuance de timbre (rond ou brillant), la dynamique (*piano* et *forte*) et le type d'attaque – en testant plusieurs consonnes, occlusives (D, K, P, T) ou fricative (F). On considérera aussi l'ensemble des timbres à excitation continue (sons longs) d'une part, et à excitation instantanée (sons courts) d'autre part. Finalement, on s'attardera aux techniques polyphoniques ou de modulation comme l'usage du *fluttertongue*, de la voix, d'une combinaison des deux, et de la multiphonique à l'octave.

Champs d'expertise

- Acoustique musicale
- Informatique musicale
- *Music information retrieval*

2 Méthodologie

2.1 Enregistrement et préparation des échantillons sonores

Les enregistrements des échantillons sonores ayant servi à ces analyses ont été enregistrés le 7 et 8 avril 2017 au *Performance Measurement and Recording Laboratory* du CIRMMT, à Montréal, par l'auteure de cette thèse, avec une flûte Powell modèle Conservatory en aurumite 9K. Les sons ont été enregistrés par un microphone DPA 4011-Tl cardioïde, placé à 50 cm de l'embouchure, à un angle de 40°, et par une interface Fireface 800 et le logiciel Reaper¹, sur un ordinateur MacBook Pro sur Mac OS 10.11.6. Puis les fichiers sonores à analyser ont été découpés et édités avec le logiciel Amadeus Pro². La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 44 100 Hz et la résolution, à 32 bits.

2.2 Groupes de sons analysés

Afin d'avoir un portrait d'ensemble représentatif des multiples possibilités offertes par un instrument tel que la flûte, l'extraction de descripteurs a été effectuée sur plusieurs groupes de

¹Version 4.591 ; voir ([s.d.](#)) [[site web](#)].

²Version 2.3.1 ; voir ([s.d.](#)) [[site web](#)]. L'opération consistait en l'introduction d'un *fade in* et d'un *fade out*, respectivement au début et à la fin de chaque fichier.



FIGURE 6.1 – Séance d’enregistrement des échantillons sonores au *Performance Measurement and Recording Laboratory*, CIRMMT (Université McGill). Crédit : Peter Plessas

sons enregistrés au préalable³ :

- **Groupe 1 : Sons à mode de production standard et à excitation continue (longs) sur *Do#*₄ (278,44 Hz⁴)**. Nuances dynamiques *forte* et *piano* et nuances de timbres *brillant* et *rond*.
- **Groupe 2 : Sons à mode de production standard et à excitation instantanée (courts) sur *Do#*₄**. Nuances dynamiques *forte* et *piano*, attaques sur les consonnes D, F, K, P et T.
- **Groupe 3 : Sons à mode de production standard, à excitation continue et instantanée (longs et courts) sur *Do#*₄**. Nuances dynamiques *forte* et *piano*, nuances de timbre *rond* et *brillant* (pour les sons longs seulement).
- **Groupe 4 : Sons à excitation continue (longs), tous modes de jeu.** Sons du groupe 1 (mode de production standard), aérophone à anche lippale (sons de trompette), *jet whistle* sifflé, sons mixtes standard/éoliens, multiphonique à l’octave (tous sur sur *Do#*₄), sons à mode de production sonore standard sur *Fa#*₄ (350,82 Hz) et *Si b*₅ (936,57 Hz), voix à l’unisson (pour *Fa#*₄) ou à l’octave inférieure (pour *Si b*₅), sons éoliens sur *Do#*₄ et sur *Fa#*₄ avec voyelles I, O et avec la mâchoire fermée (en soufflant à travers les dents).
- **Groupe 5 : Tous les sons du groupe 4 à l’exception des sons éoliens.**

³Des exemples enregistrés correspondant à ces sons et tirés des échantillons sonores analysés sont disponibles dans l’archive compressée accompagnant cette thèse.

⁴Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons la convention de nomenclature dans laquelle le *Do* central du piano (262,81 Hz pour un *La* à 442 Hz) marque le début de la 4e octave. Ainsi, les notes du registre grave de la flûte portent le nombre 4, celles du registre médium, le nombre 5, celles du registre aigu le nombre 6 et celles du registre suraigu, enfin, le nombre 7.

- **Groupe 6 : Sons à excitation instantanée (courts), tous modes de jeu.** Sons éoliens courts, sons mixtes standard/éoliens courts, sons du groupe 2 (sons à mode de production standard courts), percussions de clé, *pizzicati* en *slap* et attaque avec la consonne T, *tongue rams* avec inspiration, avec expiration et avec obstruction du trou de l'embouchure. Tous ces sons ont été joués sur le doigté du *Do#4* à l'exception des *tongue rams*. En raison du mode de jeu qui implique la fermeture du tube de l'instrument à une extrémité, la note résultante se situe environ une septième mineure plus bas que la note correspondant au doigté choisi. Les *tongue rams* ont donc été joués sur le doigté du *Si4*, pour un son résultant à la hauteur du *Do#4*.
- **Groupe 7 : Techniques percussives.** Les *pizzicati*, *tongue rams* et percussions de clé du groupe 6 ont été analysés séparément.
- **Groupe 8 : Techniques polyphoniques et de modulation sur *Fa#4*.** Sons à mode de production standard ; multiphonique à l'octave ; sons avec *fluttermouth* ; sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur ; tous les sons avec la voix mentionnés avec ajout de *fluttermouth*.
- **Groupe 9 : Techniques polyphoniques et de modulation sur *Si b5*.** Sons à mode de production standard ; multiphonique à l'octave ; sons avec *fluttermouth* ; sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur ; tous les sons avec la voix mentionnés avec ajout de *fluttermouth*.
- **Groupe 10 : Techniques polyphoniques et de modulation, tous registres.** Sons des groupes 8 et 9, avec addition des sons brillants *forte* et des sons avec multiphonique à l'octave sur *Do#4*.
- **Groupe 11 : Espace de timbres complet de la flûte traversière.** Combinaison de tous les sons précédemment mentionnés.

Au moins trois instances de chaque type de son ont été enregistrées afin de garantir une certaine constance dans les analyses.

2.2.1 Remarques sur les échantillons analysés

- Bien que le *Do#4* ne soit pas la note la plus facile à émettre sur la flûte traversière, elle a été choisie pour une grande partie des échantillons enregistrés, pour plusieurs raisons.

Le doigté du *Do#*₄ fait en sorte que le tuyau comporte peu de trous ouverts, et le spectre d'impédance pour ce doigté permet l'émission aisée d'un assez grand nombre de partiels. Il est vraisemblable de penser que les variations timbrales que l'on peut obtenir avec ce doigté seront plus importantes que celles obtenues avec un doigté comprenant plus de trous ouverts sur le tuyau, comme le *Sol* ou le *La* du registre grave. De plus, l'émission du *Do#*₄ demeure plus facile que celle des notes plus graves (*Do*₄ ou *Si*₃).

- Pour les groupes de sons comprenant plusieurs modes de production sonore, il fallait composer avec des modes pour lesquels les deux extrémités du tuyau étaient ouvertes (sons standard et éoliens, *pizzicati*, percussions de clés) et d'autres pour lesquels une extrémité du tuyau était ouverte et l'autre, fermée (*jet whistle sifflés*, *tongue ram*). Pour un même doigté, la différence de hauteur entre ces deux conditions équivaut à une septième, mineure ou majeure selon les doigtés. Afin d'obtenir à peu près la même fréquence fondamentale pour tous les sons résultants, et comme certaines techniques ne permettent pas l'octaviation (comme les techniques percussives), il fallait donc trouver une hauteur qu'il soit possible d'obtenir avec tous les modes de production sonore utilisés. Les possibilités sont donc assez réduites, et c'est pourquoi le choix s'est, une fois de plus, arrêté sur le *Do#*₄.
- Pour les techniques polyphoniques et de modulation, l'échantillon est composé de sons enregistrés sur deux notes (*Fa#*₄ et *Si b*₅). Le *Fa#*₄ se situe à peu près au milieu du registre grave, et fait partie de l'échelle naturelle de la flûte traversière⁵. Quant au *Si b*, son émission est facile et stable, ce qui est préférable pour tester des conditions de jeu assez difficiles, comme les sons constitués d'une combinaison de *fluttermouth* et de la voix. De plus, il se situe dans la partie supérieure du registre médium ; le choix de cette note permet donc de donner une idée de ce qui se passe à la fois dans le registre médium et le registre aigu.
- Comme le but principal de cette expérience est de cartographier un grand ensemble de timbres instrumentaux, le nombre de notes sur lesquelles les sons ont été enregistrés est assez restreint. Toutefois, il sera intéressant, lors d'expérimentations ultérieures, de

⁵Bien que la structure de la flûte traversière moderne soit un peu différente de celles des flûtes plus anciennes, celles-ci sont naturellement faites pour jouer dans la tonalité de *Ré* majeur. Les notes comme le *Fa* et le *Do* bémol, le *Si* bémol et le *Sol#* peuvent être jouées sans doigtés de fourche seulement depuis que les facteurs ont ajouté des clés (donc des trous supplémentaires) à l'instrument, soit depuis la mise au point de la flûte classique.

comparer les résultats obtenus avec plusieurs doigtés, pour un même mode d'émission sonore.

2.2.2 Remarque sur la caractérisation des timbres

Si la variation de l'intensité dynamique (nuances *forte* et *piano* dans le cas présent) se fait généralement sans équivoque, et si les modes de production sonores peuvent être décrits en termes techniques et sont assez facilement reproduisibles, il n'en va pas de même pour la caractérisation de certains groupes de timbres. Dans le cadre de cette expérience, il convient donc de justifier le choix des étiquettes **brillant** et **rond** pour décrire certains sons.

La distinction entre ces deux nuances de timbres tire son origine dans l'enseignement de Trevor Wye, qui distingue, d'une part, la sonorité « violette » (« *pleine, riche* »), qui doit être obtenue sans couvrir l'embouchure, et d'autre part, le son « jaune » (« *creux, 'ouvert', [...] plus tendre* ») (Wye 1999, p. 24⁶). Ces nuances de timbre et les exercices qui ont été créés par Wye et qui sont destinés à les mettre en pratique ont été adoptés, entre autres, par Robert Langevin⁷. Il s'agit donc d'une pratique instrumentale répandue et bien connue de tous ceux et celles dont l'apprentissage se situe dans cette lignée pédagogique.

Maintenant, les étiquettes **brillant** et **rond** ont été désignées pour remplacer celles, beaucoup plus équivoques, associées aux couleurs violet et jaune. Afin de les choisir, nous nous sommes référés à de précédents travaux sur le timbre instrumental. Dans son étude sur la description verbale du timbre de la guitare classique, Caroline Traube a recensé, parmi 108 adjectifs, les dix étiquettes les plus couramment utilisées pour décrire ces timbres instrumentaux. Les adjectifs « brillant » et « rond » se retrouvent parmi celles-ci, tout comme les adjectifs sec (« *dry* »), nasal, mince (« *thin* »), métallique (« *metallic* »), chaud (« *warm* »), épais (« *thick* »), velouté (« *velvety* ») et foncé (« *dark* ») (Traube 2004, p. 97). Par ailleurs, dans ses travaux sur le timbre du piano, Michel Bernays a évalué la familiarité de dix-sept pianistes avec une série de 98 adjectifs destinés à décrire des sons de piano. C'est l'adjectif « doux » qui se retrouve en tête des résultats, suivi de près par les adjectifs « brillant » et « rond » (Bernays 2013, p. 111).

⁶La citation complète se trouve au chapitre 2, section 3.2.2.

⁷Flûte solo du New York Philharmonic et professeur à la Juilliard School of Music.

Comme les adjectifs « brillant » et « rond » semblent être couramment utilisé dans le vocabulaire descriptif de plusieurs instrumentistes et comme ils nous semblaient appropriés pour traduire les nuances de timbre correspondant aux sonorités violette et jaune mises de l'avant par Trevor Wye dans ses *Practice books for the flute* (1999), nous les avons donc retenus dans le cadre de cette étude. Il est possible que la perception et la production de ces deux nuances de timbre diffèrent d'un.e flûtiste à l'autre, mais nous avons de bonnes raisons de croire qu'on pourra les reconnaître chez la plupart des instrumentistes qui sont familières avec elles.

2.3 Extraction des descripteurs acoustiques

Pour chacune des catégories de sons à analyser, une série de 47 descripteurs acoustiques du timbre a été extraite pour chaque fichier sonore. Les descripteurs sont calculés et extraits à l'aide de la Timbre Toolbox (Peeters et al. 2011) dans l'environnement MATLAB⁸.

Choix des types de calcul et de représentations

Plusieurs types de descripteurs acoustiques ont été extraits :

- **Descripteurs temporels** (temps d'attaque, temps de déclin, temps de décroissance, logarithme du temps d'attaque, pente de l'attaque, pente de décroissance, centroïde temporel, durée effective) ;
- **Descripteurs calculés à partir de l'enveloppe d'amplitude** (12 coefficients d'autocorrélation, fréquence et amplitude de modulation du signal, taux de passage à zéro) ;
- **Descripteurs spectraux** (centroïde, étalement, asymétrie, aplatissement, pente globale, décroissance spectrale, flux spectral, énergie du spectre, aspect plat du spectre, crête spectrale) ;
- **Descripteurs harmoniques** (énergie du spectre, énergie harmonique, énergie bruitée, rapport bruit/énergie totale, fréquence fondamentale, inharmonicité, tristimulus, déviation harmonique/irrégularité spectrale, rapport entre les harmoniques d'ordre impair et pair).

Certains de ces descripteurs peuvent être calculés selon plusieurs types de représentation du signal (représentation de la transformée de Fourier à court terme avec une échelle de magnitude

⁸MATLAB R2015a, version 8.5.0.197613, sur Mac OS 10.11.6. Voir (s.d.) [site web].

ou avec une échelle de puissance, spectre harmonique, représentation basée sur un modèle du système auditif avec bandes critiques). Pour éviter toute redondance dans les données, seule la représentation de la transformée de Fourier à court terme avec échelle de puissance (STFTpow) a été retenue pour ces analyses. En effet, son algorithme de calcul a été considéré comme étant le plus robuste lors des tests réalisés par Kazazis et al. (2017, p. 147).

De plus, la Timbre Toolbox permet de calculer les descripteurs globaux selon deux méthodes statistiques (médiane et interquartile). Ici, c'est la méthode avec médiane qui a été privilégiée. Il est à noter que les valeurs obtenues lors de l'extraction des descripteurs ont été normalisées grâce à la fonction `zscore`, afin d'uniformiser les échelles et ainsi, de faciliter la compréhension des relations entre les différentes dimensions représentées.

2.4 Analyse par composantes principales

Par la suite, pour chacun des groupes énumérés, une analyse par composantes principales (PCA) a été effectuée afin de pouvoir traiter l'ensemble des valeurs obtenues pour tous les descripteurs. La PCA (pour *Principal Component Analysis* en anglais) est une méthode statistique de réduction des données à partir de leur matrice de covariance. Elle permet non seulement d'identifier d'éventuelles redondances dans les données, mais aussi de les représenter dans un espace dont les dimensions (ou composantes principales) correspondent à des combinaisons linéaires optimisées des dimensions originales. Ainsi, en l'occurrence, chacune des dimensions obtenues correspondra à une combinaison de descripteurs de timbre, et ces dimensions généreront chacun des espaces multidimensionnels dans lesquels on représentera l'ensemble des timbres analysés pour chaque groupe.

2.5 Implémentation dans MATLAB et représentation graphique

Les analyses ont été réalisées grâce à une implémentation en quatre scripts des procédés mentionnés plus haut dans l'environnement MATLAB. Ces scripts constituent une adaptation du travail sur l'analyse des nuances de timbre du piano de Manon Moulin, stagiaire-ingénierie au Laboratoire d'Informatique et d'Acoustique Musicales (LIAM), à la Faculté de musique de l'Université de Montréal, avec la contribution de Sébastien Bel.

Le premier script, fourni avec la librairie Timbre Toolbox (fonction `Gtimbredescriptor.m`),

effectue l'extraction des valeurs pour chacun des descripteurs selon les représentations du signal choisies. Le script génère un fichier texte pour chaque fichier analysé, ainsi qu'une série de variables MATLAB.

Le deuxième script sert principalement à stocker les résultats des analyses dans différentes variables MATLAB afin de pouvoir procéder à l'analyse par composantes principales. Il identifie le nombre de conditions différentes analysées, dresse une liste des descripteurs dont les valeurs ont été extraites, place ces valeurs dans une matrice, puis effectue un tri des descripteurs extraits par le premier script, afin de ne garder que les représentations choisies et d'éviter toute redondance, tel qu'expliqué dans la section précédente.

Le troisième script se charge de l'analyse par composantes principales et génère six variables sous forme de matrices : les coefficients des composantes principales par descripteurs, les poids des composantes principales pour chaque fichier, la variance de chaque composante principale, la distribution T^2 de Hotelling, le pourcentage de variance totale expliquée pour chaque composante principale et la moyenne estimée des valeurs pour chaque descripteur évalué.

Quant au quatrième script, il convertit les variables de l'environnement MATLAB de manière à en sauvegarder le contenu dans des fichiers en format texte. Ces derniers seront utilisées pour obtenir les représentations graphiques permettant l'analyse, grâce à la librairie Matplotlib (Hunter 2007), version 2.0.2, en langage Python.

3 Résultats

Après l'extraction des descripteurs et l'analyse par composantes principales, les données des quatre premières dimensions, soit les plus significatives, ont été gardées. Avec trois dimensions, il a été possible d'expliquer entre 70,095% et 77,467% de la variance totale entre les sons, tandis qu'avec quatre dimensions, on a atteint entre 76,603% et 82,318% de variance expliquée. Par souci de clarté, des représentations graphiques en deux dimensions des analyses par composantes principales ont été privilégiées.

Pour chacun des groupes de sons à partir desquels on a effectué une extraction, la nature des dimensions de l'analyse par composantes principales sera expliquée, puis les résultats seront présentés à partir des représentations graphiques. Les tableaux montrant les dimensions de

l'analyse par composantes principales énumèrent les descripteurs du plus important au moins important (d'après la valeur absolue de chaque coefficient) pour chaque extrémité des axes dimensionnels. Les coefficients minimum et maximum aussi sont indiqués pour chaque dimension, afin de donner une idée de l'importance relative des descripteurs mentionnés dans chaque cas. Les descripteurs qui se démarquent clairement des autres par un coefficient en valeur absolue très élevé sont indiqués en caractère gras dans les tableaux. Enfin, dans les représentations graphiques, les pictogrammes apparaissant à l'intérieur d'un losange noir correspondent à la position moyenne pour chaque condition testée.

3.1 Mode de production sonore standard

3.1.1 Sons standard longs : entre brillance et dynamique

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Pour ce groupe, la première dimension se définit principalement par des descripteurs spectraux ainsi que des coefficients d'autocorrélation médians. La deuxième dimension se rapporte à l'harmonicité et aux propriétés de l'attaque ; la troisième aux descripteurs temporels et à la synchronicité des partiels et enfin, la quatrième se définit par des paramètres temporels et d'autres relatifs à l'attaque.

Dimensions PCA — Sons standard longs (Variance expliquée totale : 82,318 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	54,896 %	Max : 0,19695	Pente spectrale, Centroïde spectral, Tristimulus 2, Flux spectral
		Min : -0,19635	Coefficients d'autocorrélation 6, 7, 5, 8
2	15,003 %	Max : 0,34955	Valeur RMS, Énergies harmonique, bruitée, spectrale
		Min : -0,23177	Rapport bruit/énergie totale, Pente de l'attaque, Pente de décroissance
3	7,568 %	Max : 0,43486	Centroïde temporel, Temps de décroissance, Durée effective, Temps d'attaque
		Min : -0,35845	Fréquence fondamentale, Irrégularité spectrale, Fréquence de modulation du signal, Aspect plat du spectre
4	4,851 %	Max : 0,40438	Logarithme du temps d'attaque, Durée effective, Temps de décroissance, Centroïde temporel
		Min : -0,32041	Pente de l'attaque, Temps d'attaque, Pente de déclin, Tristimulus 3

TABLE 6.1 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 1

Observations

Lorsqu'on considère la première dimension, on constate la formation de trois groupes distincts : les sons ronds *piano*, les sons brillants *forte*, puis les autres. Les premiers, à l'extrême minimale de l'axe, penchent vers des coefficients d'autocorrélation médians élevés, donc vers une certaine stabilité dans le déroulement temporel ; les seconds se démarquent par des valeurs élevées pour la pente spectrale, le centroïde et le tristimulus 2, soit des descripteurs en lien avec la brillance du son (Cf. figure 6.2 pour les dimensions 1-2).

La deuxième dimension sépare le groupe formé par les sons brillants *piano* et ronds *forte* d'une part, qui penchent vers un rapport bruit/énergie totale et un temps d'attaque élevés, et un autre groupe formé des sons brillants *forte* et ronds *piano* d'autre part, dont la valeur RMS et l'énergie harmonique sont plus élevés. On peut donc émettre l'hypothèse que jouer rond et fort, ou encore brillant et *piano* n'irait pas dans le sens des tendances naturelles de l'instrument, et que ne pas combiner dynamique et brillance conduirait à plus d'instabilité et de bruit dans le son.

Maintenant, la troisième dimension est intéressante lorsque l'on cherche à caractériser ces états plus contradictoires : le rond *forte* tend à avoir des valeurs d'aplatissement, d'asymétrie et de décroissance spectrale plus élevées, donc un spectre plus aplati et plus d'énergie dans les graves, alors que le brillant *piano* tend à avoir des énergies bruitées et harmoniques plus élevées, ce qui s'explique bien par une présence accrue de bruit dans le son, mais aussi par une brillance effective plus élevée que dans le rond *piano* (Cf. figure 6.3 pour les dimensions 1-3).

3.1.2 Sons standard courts : types d'attaque et dynamique

Dimensions de l'analyse par composantes principales

À l'extrême maximale de la première dimension, on retrouve le taux de passage à zéro, le flux spectral et le tristimulus 3, ce qui indique en toute probabilité que les sons se situant de ce côté sont plus bruités, et contiennent plus d'énergie dans les partiels plus élevés, tandis que de l'autre côté (extrême minimale), on retrouve des coefficients d'autocorrélation médians élevés. La deuxième dimension se caractérise d'une part par une combinaison de descripteurs temporels (temps d'attaque, centroïde temporel) et spectraux (pente et centroïde) qui se rapproche en fait des principales dimensions perceptives du timbre instrumental. D'autre part (extrême

négative), on retrouve des descripteurs en lien avec l'intensité sonore : valeur RMS, énergie du spectre, énergie bruitée et harmonique. Enfin, l'extrémité minimale de la troisième dimension regroupe des paramètres comme l'aplatissement, l'asymétrie et la décroissance spectraux, tandis que son extrémité maximale rassemble l'énergie bruitée et l'énergie totale du spectre harmonique, ainsi que le centroïde et la pente spectrale. Finalement, la quatrième dimension s'étend entre la fréquence de modulation du signal (négatif) et la pente de décroissance (positif).

Dimensions PCA — Sons standard courts (Variance expliquée totale : 79,813 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	44,955 %	Max : 0,21399	Taux de passage à zéro, Flux spectral, Tristimulus 3 et 2
		Min : -0,24497	Coefficients d'autocorrélation 7, 8, 1, 9
2	16,697 %	Max : 0,25548	Temps d'attaque, Centroïde temporel, Pente spectrale, Centroïde spectral
		Min : -0,23687	Valeur RMS, Énergie du spectre harmonique, Énergies non-harmonique et harmonique
3	9,682 %	Max : 0,276595	Énergie non-harmonique, Énergie du spectre harmonique, Centroïde spectral, Pente spectrale
		Min : -0,26804	Aplatissement spectral, Asymétrie spectrale, Décroissance spectrale, Fréquence fondamentale
4	8,479 %	Max : 0,43357	Pente de décroissance, Durée effective, Temps de décroissance, Amplitude de la modulation du signal
		Min : -0,40319	Fréquence de modulation du signal, Rapport entre les harmoniques impaires et paires, Inharmonicité, Étalement spectral

TABLE 6.2 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 2

Observations

Pour ce groupe de sons, l'analyse par composantes principales ne permet pas vraiment d'arriver à des conclusions claires. Il y a un manque de constance assez considérable entre les différents types d'attaque. Toutefois, les attaques en K avec nuance *forte* semblent se distinguer des autres sur le plan spectral (les sons étant situés à l'extrémité positive de la dimension 1). Les attaques en F, autant dans la nuance *forte* que *piano*, se distinguent des autres par rapport à leur énergie spectrale (extrémité positive de la dimension 2) (Cf. figure 6.4 pour les dimensions 1-2 et 6.5 pour les dimensions 2-3). Dans le chapitre suivant (Cf. chapitre 7, section 3.1), nous examinerons plus en détail les aspects timbraux relatifs à l'attaque.

3.1.3 Sons standard longs et courts

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Pour la dimension 1, on a d'une part les derniers coefficients d'autocorrélation (extrémité maximale) et d'autre part, des descripteurs spectraux (centroïde, pente spectrale globale et taux de passage à zéro). La dimension 2 se rapporte à l'harmonicité et à l'énergie du spectre (extrémité positive) et aux descripteurs spectraux (étalement, flux, rapport bruit/énergie totale), du côté négatif. Enfin, la fréquence fondamentale, la valeur RMS et l'énergie du spectre jouent un rôle important du côté de la troisième dimension (extrémité maximale), tout comme l'inharmonicité, le roulement spectral et la durée effective du signal de l'autre côté (extrémité minimale). Quant à la quatrième dimension, elle se rapporte à des paramètres temporels (durée effective, temps de décroissance – positif) et spectraux (aspect plat du signal, tristimulus 3, roulement et flux spectral – négatif).

Dimensions PCA — Sons standard longs et courts (Variance expliquée totale : 79,044 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	37,37 %	Max : 0,23148	Coefficients d'autocorrélation 7, 6, 5, 8
		Min : -0,22861	Taux de passage à zéro, Tristimulus 3, Flux spectral, Fréquence fondamentale
2	26,195 %	Max : 0,24595	Énergie du spectre (mesures STFT et harmonique), Énergie bruitée, Énergie harmonique
		Min : -0,22825	Rapport bruit/énergie totale, Amplitude de la modulation du signal, Étalement spectral, Temps de décroissance
3	8,015 %	Max : 0,41536	Temps de déclin (<i>decay</i>), Temps d'attaque, Pente spectrale, Centroïde temporel
		Min : -0,36229	Fréquence de la modulation du signal, Durée effective, Valeur RMS, Amplitude de la modulation du signal
4	7,464 %	Max : 0,39864	Tristimulus 2, Pente de l'attaque, Décroissance spectrale, Aspect plat du spectre
		Min : -0,28266	Crête spectrale, Tristimulus 1, Logarithme du temps d'attaque, Rapport entre les harmoniques impaires et paires

TABLE 6.3 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 3

Observations

La disposition des sons le long de la première dimension laisse supposer que la nuance dynamique induit des différences plus prononcées que la nuance de timbre choisie. Les sons en nuance *forte* ont des valeurs plus élevées du côté des descripteurs spectraux (extrémité négative), tandis que les

sons *piano* se situent près de l'autre extrémité (positive – coefficients d'autocorrélation médians), laissant supposer qu'ils sont plus stables que les premiers.

Quant à la deuxième dimension, elle souligne plutôt les nuances de timbre et la longueur des sons. Le regroupement des sons courts laisse deviner des valeurs d'étalement et de flux spectral élevées, tout comme pour le rapport bruit/énergie totale. Les sons ronds se situent du côté de l'autre extrémité (harmonicité et énergie du spectre), tandis que les sons brillants se situent plutôt au milieu de la dimension (Cf. figures 6.6 pour les dimensions 1-2 et 6.7 pour les dimensions 2-3). L'observation des deux autres dimensions (3 et 4) sur le graphique ne permet toutefois pas d'arriver à un constat significatif.

3.2 Espace de timbres : sons à excitation continue

3.2.1 Excitation continue : tous les timbres

Dimensions de l'analyse par composantes principales

La première dimension distingue d'un côté des coefficients d'autocorrélation médians élevés (négatif) et de l'autre, des valeurs élevées pour des descripteurs spectraux tels que la pente spectrale globale, le centroïde, le roulement (et le taux de passage à zéro), du côté positif. La deuxième dimension met l'accent sur le tristimulus 1, l'asymétrie et l'aplatissement spectral d'une part, et sur l'irrégularité spectrale et le tristimulus 2 d'autre part (positif). La troisième dimension est relative aux propriétés de l'attaque (pente de l'attaque à extrémité maximale, logarithme du temps d'attaque et temps de déclin (*decay*) à l'extrémité minimale). Quant à la quatrième dimension, elle se rapporte à la durée du signal (durée effective et temps de décroissance, extrémité maximale), ainsi qu'à divers paramètres relatifs à la périodicité du signal (fréquence de modulation, énergie harmonique, etc. à l'extrémité minimale).

Observations

Du côté de la première dimension, les sons éoliens (voyelles [i] et [o]) se situent plus près de l'extrémité positive que tous les autres sons. On peut émettre l'hypothèse qu'ils se distinguent par leur brillance et leur qualité bruitée. Lorsqu'on regarde la deuxième dimension, on remarque que les sons multiphoniques, ainsi que les combinaisons avec la voix à l'octave, le son standard sur *Si b₅* se rapprochent davantage de l'extrémité positive de l'axe. Ces types de sons contiennent plus de composantes non périodiques et comprennent possiblement une plus grande part d'instabilité.

Dimensions PCA — Timbres à excitation continue (avec sons éoliens)			
(Variance expliquée totale : 79,582 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	51,127 %	Max : 0,20293 Min : -0,20210	Pente spectrale, Centroïde spectral, Taux de passage à zéro, Roulement spectral Coefficients d'autocorrélation 6, 5, 7, 4
2	12,649 %	Max : 0,34254	Irrégularité spectrale, Tristimulus 2 , Énergie du spectre (représentations harmonique et spectrale)
		Min : -0,28144	Tristimulus 1, Asymétrie spectrale, Aplatissement spectral, Coefficient d'autocorrélation 12
3	9,319 %	Max : 0,38102	Pente de l'attaque , Énergie harmonique, Décroissance spectrale, Aplatissement spectral
		Min : -0,37082	Logarithme du temps d'attaque, Temps de déclin (decay) , Fréquence fondamentale, Temps d'attaque
4	6,487 %	Max : 0,48886	Durée effective, Temps de décroissance , Centroïde temporel, Pente de décroissance
		Min : -0,15656	Fréquence de la modulation du signal, Énergie harmonique, Temps d'attaque, Amplitude de la modulation du signal

TABLE 6.4 – Dimensions de l’analyse par composantes principales, groupe 4

À l’autre extrémité, on retrouve les sons de trompette (anche lippale), le mélange éolien/son standard et les sons éoliens (mâchoire fermée). Ces sons ont donc des valeurs plus élevées pour le tristimulus 1, l’asymétrie et la décroissance spectrales. Dans leur cas, l’énergie se concentre donc vraisemblablement autour de la fondamentale (Cf. figures 6.8 pour les dimensions 1-2 et 6.9 pour les dimensions 2-3).

La troisième dimension induit une démarcation entre les sons de trompette d’un côté (extrémité positive) et les *jet whistles* sifflés et les sons éoliens de l’autre (extrémité négative). Les premiers ont plus d’énergie dans le spectre et une valeur RMS plus élevée (ce qui est logique pour un aérophone à anche lippale), tandis que les seconds se distinguent par l’amplitude de la modulation de leur signal. Finalement, en jetant un coup d’œil du côté de la quatrième dimension, on constate que l’inharmonicité est plus élevée pour les sons standard sur *Si b*₅ et les *jet whistles* sur *Fa#*₄, et que le *Do#*₄ avec multiphonique à l’octave se caractérise par un logarithme du temps d’attaque plus élevé. Cela s’explique facilement par le fait que la multiphonique est l’un des phénomènes sonores les plus instables et les plus difficiles à stabiliser sur la flûte (Cf. figures 6.10 pour les dimensions 1-3 et 6.11 pour les dimensions 3-4).

3.2.2 Excitation continue : tous timbres à l'exception des sons éoliens

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Si l'on refait une analyse par composantes principales en excluant les sons éoliens afin d'observer de plus près ce qui se passe du côté des autres sons, on constate que la première dimension reste tout de même assez similaire. L'ordre des descripteurs change et ceux-ci ne sont pas exactement les mêmes, mais l'ensemble des paramètres ressemble à celui de l'exemple précédent. L'extrémité positive de la deuxième dimension bouge également peu, mais l'extrémité négative de celle-ci se rapporte plus à des descripteurs spectraux (étalement, flux, et rapport bruit/énergie totale), en excluant le tristimulus 1. Quant à la troisième dimension, on peut la relier à l'inharmonicité et au roulement spectral d'une part (négatif) et à la fréquence fondamentale, à la valeur RMS et à l'énergie du spectre en représentation harmonique de l'autre (positif). Finalement, la quatrième dimension s'étend entre des descripteurs de nature plus spectrale (aspect plat du spectre, tristimulus 3, roulement et flux spectraux) à l'extrémité minimale, et des descripteurs temporels (durée effective, temps de décroissance, centroïde temporel) à l'autre extrémité (maximale).

Dimensions PCA — Timbres à excitation continue (sans sons éoliens)			
(Variance expliquée totale : 77,151 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	44,659 %	Max : 0,21772	Coefficients d'autocorrélation 11, 10, 9, 12
		Min : -0,20891	Centroïde spectral, Pente spectrale, Taux de passage à zéro, Tristimulus 2
2	16,523 %	Max : 0,32362	Énergie harmonique, Décroissance spectrale, Énergie du spectre (représentations spectrale et harmonique)
		Min : -0,31041	Étalement spectral, Flux spectral, Rapport bruit/énergie totale, Temps d'attaque
3	8,915 %	Max : 0,32377	Fréquence fondamentale, Valeur RMS, Énergie bruitée et du spectre (en représentation harmonique)
		Min : -0,28658	Inharmonicité, Roulement spectral, Durée effective, Temps de décroissance
4	7,054 %	Max : 0,41645	Durée effective, Temps de décroissance, Centroïde temporel, Centroïde spectral
		Min : -0,36437	Aspect plat du spectre, Tristimulus 3, Roulement spectral, Flux spectral

TABLE 6.5 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 5

Observations

Les sons du registre médium/aigu se distinguent par des valeurs élevées de descripteurs spectraux (dimension 1, extrémité positive ; centroïde, pente) et dans une moindre mesure par leur taux de passage à zéro. Il serait ainsi conséquent d'affirmer que la brillance croît avec le registre, mais ces sons sont aussi plus instables. À l'autre extrémité (négative) de la première dimension,

on retrouve les sons de trompette, le mélange éolien/standard et le son standard en nuance *piano*; ces sons semblent être les plus constants dans leur déroulement temporel. La deuxième dimension permet d'affirmer que les *jet whistles* sifflés ont des valeurs plus élevées d'étalement, de flux spectral ainsi que plus de composantes bruitées que les autres sons. Ces caractéristiques s'ajoutent à l'importance de l'amplitude de la modulation du signal qui était ressortie dans l'exemple précédent (Cf. figures 6.12 pour les dimensions 1-2 et 6.13 pour les dimensions 2-3).

La troisième dimension permet aussi de dire que les *jet whistles* (comme les sons joués sur *Si b₅*) se distinguent également par leur fréquence fondamentale plus élevée (ce qui est dû au changement de registre ou à la nature de la technique, dans le cas des *jet whistles*), ainsi que par une valeur RMS et une énergie spectrale importantes. À l'autre extrémité (négative), les *Do#₄* avec multiphonique à l'octave et les sons brillants ont une inharmonicité et un roulement spectral plus élevés. Finalement, l'observation de la quatrième dimension permet d'ajouter que les sons ronds et brillants *forte* joués sur *Do#₄* ont des valeurs plus élevées pour l'aspect plat du spectre, le tristimulus 3 et le roulement spectral (Cf. figures 6.14 pour les dimensions 1-3 et 6.15 pour les dimensions 3-4).

3.3 Espace de timbres : sons à excitation instantanée

3.3.1 Excitation instantanée : tous les timbres

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Comme pour plusieurs groupes de sons analysés précédemment, les coefficients d'autocorrélation (12,10,11) se retrouvent à une extrémité de la première dimension, dépassés ici seulement par le facteur de crête spectrale (extrémité minimale). Du côté de l'extrémité maximale, on retrouve en premier lieu le taux de passage à zéro, puis le tristimulus 3 et l'aspect plat du spectre. La deuxième dimension regroupe d'un côté la décroissance et l'irrégularité spectrales ainsi que des descripteurs temporels (négatif) et de l'autre (positif), des descripteurs spectraux (étalement, roulement, pente) ainsi que la pente de l'attaque. Pour la troisième dimension, on retrouve d'une part l'asymétrie, la décroissance et l'aplatissement spectraux (négatif) et d'autre part, l'énergie bruitée, l'énergie du spectre harmonique, le centroïde et la pente spectraux. Finalement, la quatrième dimension est un mélange de plusieurs descripteurs appartenant à des catégories différentes : tristimulus

2 et descripteurs temporels (temps d'attaque et de décroissance, centroïde temporel) d'un côté (négatif) et rapport entre les harmoniques impaires et paires et valeur RMS de l'autre (positif).

Dimensions PCA — Timbres à excitation instantanée (Variance expliquée totale : 79,343 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	37,319 %	Max : 0,21952	Taux de passage à zéro, Tristimulus 3, Aspect plat du spectre, Rapport bruit/énergie totale
		Min : -0,21364	Crête spectrale, Coefficients d'autocorrélation 11, 10, 12
2	25,884 %	Max : 0,22884	Étalement spectral, Roulement spectral, Pente de l'attaque, Pente du spectre
		Min : -0,20827	Décroissance spectrale, Irrégularité spectrale, Logarithme du temps d'attaque, Durée effective
3	10,205 %	Max : 0,29903	Énergie bruitée, Énergie du spectre harmonique, Centroïde spectral, Pente spectrale
		Min : -0,25953	Asymétrie spectrale, Décroissance spectrale, Aplatissement spectral, Amplitude de la modulation du signal
4	5,935 %	Max : 0,38573	Rapport entre les harmoniques impaires et paires, Valeur RMS, Tristimulus 1, Énergie du spectre
		Min : -0,32081	Tristimulus 2, Temps d'attaque, Centroïde temporel, Temps de décroissance

TABLE 6.6 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 6

Observations

La première dimension permet de remarquer la présence des sons éoliens courts et, dans une moindre mesure, celle des *pizzicati* en *slap* à l'extrémité positive. Ces sons sont en effet susceptibles de présenter une quantité de contenu bruité (non périodique) importante. De l'autre côté, on retrouve les mélanges son/éolien et les sons courts *piano*, dont la crête spectrale et les coefficients d'autocorrélation supérieurs sont plus élevés. Ensuite, les sons produits avec du souffle se retrouvent à l'extrémité minimale de la deuxième dimension, se distinguant ainsi par leur décroissance et leur irrégularité spectrales plus élevées, tout comme par un logarithme du temps d'attaque élevé : ils sont plus instables et moins directs à s'établir dans l'attaque. À l'autre extrémité, les sons produits par une technique percussive ont des valeurs plus élevées du côté de l'étalement et du roulement spectral ; ils sont donc susceptibles d'être plus brillants (Cf. figures 6.16 pour les dimensions 1-2 et 6.17 pour les dimensions 2-3).

Lorsque l'on regarde la troisième dimension, les *pizzicati* et les percussions de clés, à l'extrême négative, ont des valeurs plus élevées pour l'asymétrie, la décroissance et l'aplatissement spectraux. Cela indique possiblement que leur énergie se concentre dans les premiers partiels. Quant aux *tongue rams* et aux sons éoliens, à l'extrême positive, ils ont une énergie bruitée et

harmonique plus élevée, probablement dues au bruit de souffle que l'on retrouve à la base des deux techniques. Enfin, les sons courts *forte*, du côté négatif de la quatrième dimension, ont des valeurs moyennes plus élevées pour le tristimulus 2 ainsi qu'un plus long temps d'attaque. Cela est logique lorsqu'on les compare aux techniques percussives (vitesse d'attaque) ou aux autres sons, le son de flûte standard se caractérisant par une énergie élevée dans les premiers partiels harmoniques (Cf. figures 6.18 pour les dimensions 1-3 et 6.19 pour les dimensions 3-4).

3.3.2 Excitation instantanée : techniques percussives

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Lorsque l'on ne conserve que les techniques percussives (*pizzicati*, *tongue rams* et percussions de clés) pour l'analyse, on retrouve toujours les coefficients d'autocorrélation au coeur de la première dimension, mais ils sont d'ordre moins élevé (5, 4, 6, 7). À l'autre extrémité (négative), on retrouve le taux de passage à zéro, l'asymétrie, la décroissance et l'aplatissement spectraux (ce trio de descripteurs spectraux étant également présent dans la troisième dimension du groupe précédent). Pour la deuxième dimension, le tristimulus 1, la décroissance et l'asymétrie spectrales ainsi que l'amplitude de la modulation du signal se retrouvent à l'extrémité négative, tandis que l'autre extrémité est une combinaison du rapport bruit/énergie totale, des temps d'attaque et de déclin (*decay*) ainsi que d'énergie bruitée. La troisième dimension se définit d'une part par l'amplitude de la modulation du signal (négatif) et par la valeur RMS et l'énergie du spectre d'autre part (positif). Quant à la quatrième dimension, elle se caractérise par l'inharmonicité, les pentes d'attaque et de décroissance ainsi que le flux spectral d'un côté (négatif) et une combinaison du logarithme du temps d'attaque et de la fréquence fondamentale de l'autre (positif).

Observations

La première dimension permet de distinguer les *pizzicati* en *slap* (par le taux de passage à zéro ainsi que l'asymétrie et la décroissance spectrales, indiquant plus de contenu dans les fréquences basses) des *pizzicati* avec attaque en T (par des valeurs élevées pour les coefficients d'autocorrélation, donc par plus de stabilité dans le déroulement temporel).

La deuxième dimension sépare l'ensemble des *pizzicati* et des percussions de clé (extrémité

Dimensions PCA – Techniques percussives (Variance expliquée totale : 77,859 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	37,323 %	Max : 0,23107	Coefficients d'autocorrélation 5, 4, 6, 7
		Min : -0,21030	Taux de passage à zéro, Asymétrie spectrale, Décroissance spectrale, Aplatissement spectral
2	21,286 %	Max : 0,27425	Rapport bruit/énergie totale, Temps d'attaque, Temps de décroissance, Énergie bruitée
		Min : -0,21581	Tristimulus 1, Décroissance spectrale, Amplitude de la modulation du signal, Asymétrie spectrale
3	11,486 %	Max : 0,37488	Valeur RMS, Énergie du spectre, Décroissance spectrale, Énergie harmonique
		Min : -0,28744	Amplitude de la modulation du signal , Temps de décroissance, Centroïde temporel, Tristimulus 2
4	7,764 %	Max : 0,38945	Logarithme du temps d'attaque, Fréquence fondamentale, Durée effective, Temps de décroissance
		Min : -0,35803	Inharmonicité, Pente de l'attaque, Pente de décroissance, Flux spectral

TABLE 6.7 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 7

minimale) de l'ensemble des *tongue rams*, toutes variantes techniques confondues. Les premiers ont un tristimulus 1 et une décroissance spectrale plus élevée, donc sensiblement plus d'énergie dans les basses fréquences que les deuxièmes. Ceux-ci ont par contre un rapport bruit/énergie totale et un temps d'attaque plus élevés, ce qui s'explique par la nature de la technique : on entend le souffle d'abord, puis l'impulsion ensuite (Cf. figures 6.20 pour les dimensions 1-2 et 6.21 pour les dimensions 2-3). Les graphiques sur lesquels on observe les dimensions 3 et 4 ne permettent pas d'arriver à des conclusions précises ; ils n'ont donc pas été inclus dans cette présentation des résultats.

3.4 Espace de timbres : techniques polyphoniques et de modulation

3.4.1 Registre grave ($Fa\#_3$)

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Encore une fois, on a pour la première dimension une extrémité (positive) caractérisée par des valeurs associées aux coefficients d'autocorrélation ; l'autre extrémité (négative) regroupe des descripteurs spectraux (pente spectrale globale, centroïde, étalement) ainsi que le taux de passage à zéro. La deuxième dimension se définit par le rapport bruit/énergie totale, le flux et l'aspect plat du spectre d'un côté (négatif) et par l'énergie harmonique et spectrale de l'autre (positif). La troisième dimension est fortement déterminée par l'inharmonicité (extrémité minimale) et la fréquence fondamentale (extrémité maximale). Finalement, la quatrième dimension s'étend entre

un ensemble formé du tristimulus 3, de l'aspect plat du spectre, de la pente de l'attaque et de la fréquence de modulation du signal d'un côté (négatif) et les descripteurs temporels (temps de décroissance, durée effective, centroïde temporel) à l'autre extrémité (négative).

Dimensions PCA — Techniques polyphoniques et de modulation (registre grave)			
(Variance expliquée totale : 81,31 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	48,547 %	Max : 0,20803	Coefficients d'autocorrélation 4, 5, 3, 6
		Min : -0,20727	Pente spectrale, Centroïde spectral, Étalement spectral, Taux de passage à zéro
2	16,023 %	Max : 0,34061	Énergie harmonique, Énergie du spectre, Énergie du spectre harmonique, Énergie bruitée
		Min : -0,22408	Rapport bruit/énergie totale, Flux spectral, Aspect plat du spectre, Amplitude de la modulation du signal
3	8,822 %	Max : 0,40630	Fréquence fondamentale, Tristimulus 1, Rapport entre les harmoniques impaires et paires, Temps de déclin (<i>decay</i>)
		Min : -0,37828	Inharmonicité, Tristimulus 2, Irrégularité spectrale, Tristimulus 3
4	7,918 %	Max : 0,43547	Temps de décroissance, Durée effective, Centroïde temporel, Temps de déclin (<i>decay</i>)
		Min : -0,23259	Tristimulus 3, Aspect plat du spectre, Pente de l'attaque, Fréquence de la modulation du signal

TABLE 6.8 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 8

Observations

Première remarque à propos de la dimension 1 : l'usage de la voix au triton inférieur (et, dans une moindre mesure, la multiphonique à l'octave) augmente les valeurs de la pente spectrale globale et du centre de gravité spectral. Ensuite, l'usage du *fluttermouth* (avec ou sans voix) tend à augmenter les valeurs correspondant aux coefficients d'autocorrélation médians. L'usage de cette technique (*fluttermouth*) se remarque également par la position des points lui appartenant dans la deuxième dimension, avec le rapport bruit/énergie totale et le flux spectral. Ces descripteurs se rapportent à l'instabilité de la vibration ; il est donc logique que ces sons se rapprochent de l'extrémité négative de cette dimension. À l'autre extrémité (positive), on retrouve les sons avec usage de la voix au triton supérieur, les sons standard et la multiphonique à l'octave : on y retrouve plus d'énergie dans le spectre, et spécialement dans le spectre harmonique (Cf. figures 6.22 pour les dimensions 1-2 et 6.23 pour les dimensions 2-3).

Quant à la troisième dimension, elle permet de distinguer, du côté de l'extrémité minimale, les sons avec usage de la voix à l'octave et du *fluttermouth*, qui amènent une grande inharmonicité. Cela peut s'expliquer par la difficulté d'exécution de la technique, où le réglage de la voix

exactement sur la même fréquence fondamentale que le son de flûte reste malaisée. Cela amène une certaine instabilité, qui est ensuite augmentée par le *fluttermouth*. De l'autre côté (maximal), on constate que l'usage de la voix au triton inférieur ou supérieur change la détection de la fréquence fondamentale et le rapport d'amplitude entre les partiels. Cela confirme la sensation de conflit qui existe entre la voix et le son de flûte à l'exécution de la technique, et coïncide aussi avec l'absence de renforcement harmonique, comme lorsqu'on utilise la voix à l'octave.

3.4.2 Registre médium/aigu (*Si b₄*)

Dimensions de l'analyse par composantes principales

Les coefficients d'autocorrélation que l'on retrouve à l'extrémité positive de la première dimension sont d'ordre plus élevé que pour le registre grave et sont précédés par la décroissance spectrale, qui est le descripteur avec le coefficient le plus élevé pour cette dimension. On retrouve aussi à l'autre extrémité (négative) le centroïde spectral et la pente spectrale globale. La deuxième dimension contient un mélange de descripteurs : d'une part, le roulement spectral, la durée effective et le temps de décroissance (extrémité maximale) et d'autre part, la fréquence de modulation du signal, le temps de déclin (*decay*) et l'énergie du spectre (extrémité minimale). La troisième dimension ressemble à celle que l'on retrouve pour le groupe de sons du registre grave : tristimulus 3 et inharmonicité d'une part (extrémité minimale) et fréquence fondamentale et flux spectral de l'autre (extrémité maximale). La quatrième dimension se définit par des descripteurs temporels (centroïde temporel, durée effective) du côté négatif, et par l'amplitude de modulation du signal et le taux de passage à zéro du côté positif.

Observations

La première dimension indique ici que l'usage combiné de la voix et du *fluttermouth* tend à faire augmenter les valeurs attribuées aux descripteurs de décroissance spectrale et aux coefficients d'autocorrélation. Par contre, contrairement aux résultats obtenus pour le registre grave, l'usage du *fluttermouth* seul ne fait pas augmenter les valeurs des coefficients d'autocorrélation médians ; on retrouve plutôt ces sons du même côté que les sons standard et que ceux produits avec l'usage de la voix, sans *fluttermouth*, ce qui indique des valeurs plus élevées pour le centroïde spectral, la

Dimensions PCA — Techniques polyphoniques et de modulation (registre médium/aigu)			
(Variance expliquée totale : 81,162 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	55,028 %	Max : 0,19405	Décroissance spectrale, Coefficients d'autocorrélation 12, 11, 9
		Min : -0,19328	Centroïde spectral, Pente spectrale, Tristimulus 2, Valeur RMS
2	13,687 %	Max : 0,28106	Roulement spectral, Durée effective, Temps de décroissance, Aspect plat du spectre
		Min : -0,23604	Fréquence de la modulation du signal, Temps de déclin (<i>decay</i>), Énergie harmonique, Énergie du spectre
3	7,668 %	Max : 0,43601	Fréquence fondamentale, Flux spectral , Temps de déclin (<i>decay</i>), Amplitude de la modulation du signal
		Min : -0,38232	Tristimulus 3, Inharmonicité, Temps d'attaque , Irrégularité spectrale
4	4,779 %	Max : 0,35067	Amplitude de la modulation du signal, Taux de passage à zéro, Inharmonicité, Temps d'attaque
		Min : -0,30994	Centroïde temporel, Durée effective, Rapport entre les harmoniques impaires et paires, Temps de décroissance

TABLE 6.9 – Dimensions de l’analyse par composantes principales, groupe 9

pente du spectre et le tristimulus 2.

Tout comme dans le registre grave, les sons produits avec la voix au triton (à l’octave inférieure dans ce cas-ci, étant donné le registre) se distinguent également par les valeurs élevées qu’ils génèrent pour le roulement spectral. Les sons produits avec la voix à l’octave inférieure semblent, eux, augmenter la fréquence de modulation du signal. Cela s’explique aisément quand on pense à la difficulté relative de régler l’intonation de la voix sur celle du son de flûte ; l’écart entre les deux fréquences fondamentales est susceptible de produire un battement qui se reflétera dans la valeur de ce descripteur. Toutefois, contrairement aux résultats obtenus dans le registre grave, l’usage du *fluttermouth* semble peu influencer ce descripteur (Cf. figure 6.24 pour les dimensions 1-2).

Enfin, l’observation de la troisième dimension indique que l’usage de la voix à l’unisson (et, dans une moindre mesure, au triton inférieur) influence fortement les valeurs générées pour le tristimulus 3 et l’inharmonicité, comme c’était le cas pour le *Fa#4* avec voix à l’octave (Cf. figure 6.25 pour les dimensions 1-3). Encore une fois, cela peut être dû à l’instabilité inhérente aux vibrations combinées de la flûte et de la voix. À l’autre extrémité de la dimension, on constate que l’usage du *fluttermouth* influence la fréquence fondamentale et le flux spectral, comme on l’observe avec la deuxième dimension obtenue dans les analyses du registre grave (Cf. figure 6.22 pour les dimensions 1-2 pour *Fa#*).

3.4.3 Tous registres confondus

Dimensions de l'analyse par composantes principales

En combinant les registres grave et médium/aigu, on obtient quatre dimensions qui reprennent de manière plus ou moins constante les descripteurs qui se trouvaient à la base des dimensions respectives des deux registres (grave et médium/aigu). La première dimension s'échelonne entre les coefficients d'autocorrélation d'ordre moyen à élevé (7 à 10) d'un côté (négatif) et des descripteurs spectraux (centroïde, pente du spectre, étalement) ainsi que le taux de passage à zéro de l'autre (côté positif). La deuxième dimension est constituée de descripteurs spectraux (aspect plat du spectre, flux et roulement spectraux) et du rapport bruit/énergie totale à l'extrémité minimale, ainsi que de descripteurs relatifs à l'énergie du spectre (valeur RMS, énergie du spectre en représentations harmoniques et STFT), à l'extrémité maximale. La troisième dimension est fortement marquée par la fréquence fondamentale (côté négatif) et le tristimulus 3 (côté positif), tandis que la quatrième dimension relève des fréquences fondamentale et de modulation du signal, ainsi que de descripteurs temporels (temps de décroissance, durée effective).

Dimensions PCA — Techniques polyphoniques et de modulation (tous registres)			
(Variance expliquée totale : 76,603 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	44,034 %	Max : 0,22047	Centroïde spectral, Pente spectrale, Taux de passage à zéro, Étalement spectral
		Min : -0,22009	Coefficients d'autocorrélation 8, 9, 7, 10
2	17,876 %	Max : 0,3071	Valeur RMS, Énergie harmonique, Énergie du spectre (représentations spectrale et harmonique)
		Min : -0,2786	Aspect plat du spectre, Rapport bruit/énergie totale, Flux spectral, Roulement spectral
3	8,428 %	Max : 0,38596	Tristimulus 3, Inharmonicité, Temps d'attaque, Roulement spectral
		Min : -0,36296	Fréquence fondamentale, Durée effective, Temps de décroissance, Centroïde temporel
4	6,265 %	Max : 0,38467	Temps de décroissance, Durée effective, Centroïde temporel, Inharmonicité
		Min : -0,31263	Fréquence fondamentale, Fréquence de la modulation du signal, Tristimulus 1, Logarithme du temps d'attaque

TABLE 6.10 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 10

Observations

Ici, la première dimension permet surtout de distinguer le registre grave du registre médium/aigu : les sons appartenant à ce dernier groupe génèrent naturellement des valeurs plus élevées pour

plusieurs descripteurs spectraux en lien avec la brillance ainsi que pour le taux de passage à zéro, en raison de leur fréquence fondamentale plus élevée. Du côté des sons graves (donc de l’extrémité minimale de la dimension), ce sont les sons sur *Fa#₄* avec *fluttermouth* qui obtiennent les valeurs de coefficients d’autocorrélation les plus élevées.

En ce qui concerne la deuxième dimension, les sons standard ainsi que ceux joués avec le *fluttermouth* seul obtiennent des valeurs RMS et d’énergie du spectre plus élevées que les autres sons et ce, indépendamment du registre. À l’autre extrémité, ce sont les sons avec usage de la voix au triton inférieur sur *Fa#₄* qui obtiennent les valeurs les plus élevées pour l’aspect plat du spectre et le rapport bruit/énergie totale ; ce groupe se distingue nettement des autres sur ce plan (Cf. figure 6.26 pour les dimensions 1-2).

Les sons standard sur *Do#₄* et avec usage de la voix au triton inférieur sur *Fa#₄* obtiennent des valeurs élevées pour le tristimulus 3. La fréquence fondamentale plus élevée des sons joués sur *Si b₅* les situe à l’autre extrémité de la troisième dimension. Quant à la quatrième dimension, elle souligne également le rôle de la fréquence fondamentale dans la distinction des différents groupes de sons ; les paramètres temporels tels que la durée effective et le temps de décroissance permettent quant à eux d’isoler les sons avec multiphonique à l’octave et ceux produits avec usage de la voix à l’octave inférieure sur *Fa#₄*, possiblement à cause de leur fréquence fondamentale plus basse, plutôt qu’en raison des valeurs obtenues pour le temps de décroissance et la durée effective du son (Cf. figures 6.27 pour les dimensions 2-3, 6.28 pour les dimensions 1-3 et 6.29 pour les dimensions 3-4).

3.5 Espace de timbres complet de la flûte traversière

3.5.1 Dimensions de l’analyse par composantes principales

Pour terminer cette section, une dernière analyse par composantes principales a été effectuée sur l’ensemble des sons enregistrés pour cette expérience, afin de donner un aperçu de l’espace complet de timbres de la flûte traversière. La première dimension qui en ressort met de l’avant des descripteurs relatifs aux paramètres temporels (taux de passage à zéro, centroïde temporel, temps de décroissance (*release*) et durée effective) du côté négatif et des coefficients d’autocorrélation de l’autre (côté positif). La deuxième dimension se rapporte à l’énergie contenue dans le spectre

(énergie du spectre en représentations harmonique et spectrale, quantité d'énergie bruitée et harmonique) à l'extrémité négative, et le rapport bruit/énergie totale, l'étalement spectral, la pente spectrale et le centroïde spectral à l'extrémité positive. La troisième dimension est aussi en lien avec des aspects spectraux du timbre, dominée d'une part par le roulement, le centroïde, la pente et l'étalement spectraux et, d'autre part, par la décroissance spectrale, l'asymétrie spectrale et les coefficients tristimulus 1 et 3. Quant à la quatrième dimension, elle consiste en un mélange de descripteurs plus ou moins associés : elle distingue les sons d'un côté par le coefficient tristimulus 2, l'amplitude de la modulation du signal, le premier coefficient d'autocorrélation et le temps d'attaque, et de l'autre, elle les distingue par une combinaison de l'aplatissement spectral, du rapport entre les harmoniques impairs et pairs, de l'asymétrie spectraux, ainsi que de l'inharmonicité.

Dimensions PCA — Espace de timbres complet de la flûte (Variance expliquée totale : 76,026 %)			
Dimension	Variance expliquée	Coefficients	Descripteurs
1	35,538 %	Max : 0,24017	Coefficients d'autocorrélation 8, 9, 7, 10
		Min : -0,22718	Taux de passage à zéro, Centroïde temporel, Temps de décroissance (<i>release</i>), Durée effective
2	26,85 %	Max : 0,23894	Rapport bruit/énergie totale, Étalement spectral, Pente spectrale, Centroïde spectral
		Min : -0,23612	Énergie du spectre (représentations harmonique et spectrale), Énergie bruitée (représentation harmonique), énergie harmonique
3	8,544 %	Max : 0,34267	Décroissance spectrale, Asymétrie spectrale, Tristimulus 1, Tristimulus 3,
		Min : -0,31885	Roulement spectral, Centroïde spectral, Pente spectrale, Étalement spectral
4	5,094 %	Max : 0,39568	Aplatissement spectral, Rapport entre les harmoniques impaires et paires, Asymétrie spectrale, Inharmonicité
		Min : -0,21464	Tristimulus 2, Amplitude de la modulation du signal, Coefficient d'autocorrélation 1, Temps d'attaque

TABLE 6.11 – Dimensions de l'analyse par composantes principales, groupe 11

3.5.2 Observations

Le long de la première dimension, ce sont les sons éoliens, puis ceux joués sur *Si b5* qui obtiennent les valeurs les plus élevées pour la combinaison formée du taux de passage à zéro et des descripteurs temporels. Le facteur influençant le plus les valeurs de ces descripteurs est probablement la présence de composantes bruitées (sons éoliens) ou d'une instabilité timbrale (usage de la voix et/ou du *fluttertongue*, spécialement dans le registre médium-aigu). Par contre, ce sont les sons courts (obtenus par l'usage de techniques percussives comme le *tongue ram* et la percussion de clé et dans une moindre mesure, par des sons standard joués en nuance *piano*) et les

sons de trompette qui se situent à l'autre extrémité de cette dimension, en raison des coefficients d'autocorrélation d'ordre moyen (Cf. figure 6.30 pour les dimensions 1-2, moyennes seulement).

Les sons courts (d'abord ceux obtenus avec un mode de production sonore standard et des techniques de *tongue ram*, puis les *pizzicati* et les percussions de clé) et les sons éoliens se retrouvent ensemble à l'extrémité positive de la deuxième dimension, en raison de leur nature plus bruitée. À l'autre extrémité, les sons de trompette, ceux à mi-chemin entre le son standard et éolien et les sons standard joués avec et sans *flutertongue* sur *Si b₅* obtiennent des valeurs élevées en ce qui concerne l'énergie contenue dans leur spectre. Par rapport aux autres types de sons, on peut supposer qu'il en est ainsi parce que leur énergie se situe davantage dans les premiers partiels. Cette caractéristique se retrouve également lors de l'observation de la quatrième dimension, qui isole les sons de trompette des autres sons à l'extrémité maximale de la dimension en raison des valeurs élevées d'asymétrie et d'aplatissement spectraux qu'ils obtiennent (Cf. figures 6.31 pour les dimensions 2-3 et 6.33 pour les dimensions 3-4, moyennes seulement).

À l'observation de la troisième dimension, on constate que les sons joués sur *Do#₄* (ou sur *Fa#₄* avec la voix sur une fréquence plus basse) obtiennent des valeurs élevées de décroissance spectrale, indiquant une énergie élevée dans les basses fréquences. À l'autre extrémité, les *tongue rams* et, dans une moindre mesure, les sons standards avec et sans *flutertongue* joués sur *Si b₅* obtiennent des valeurs élevées pour le roulement, le centroïde et la pente du spectre, indiquant qu'ils se distinguent par une certaine brillance (Cf. figure 6.32 pour les dimensions 1-3, moyennes seulement). Les graphiques bidimensionnels montrant les représentations des quatre premières dimensions de l'analyse en composantes principales avec tous les échantillons sonores sont également présentés en fin de section (Cf. figures 6.34 pour les dimensions 1-2, 6.35 pour les dimensions 2-3, 6.36 pour les dimensions 1-3 et 6.37 pour les dimensions 3-4).

Pour passer directement à la section discussion du chapitre, cliquez [ici](#).

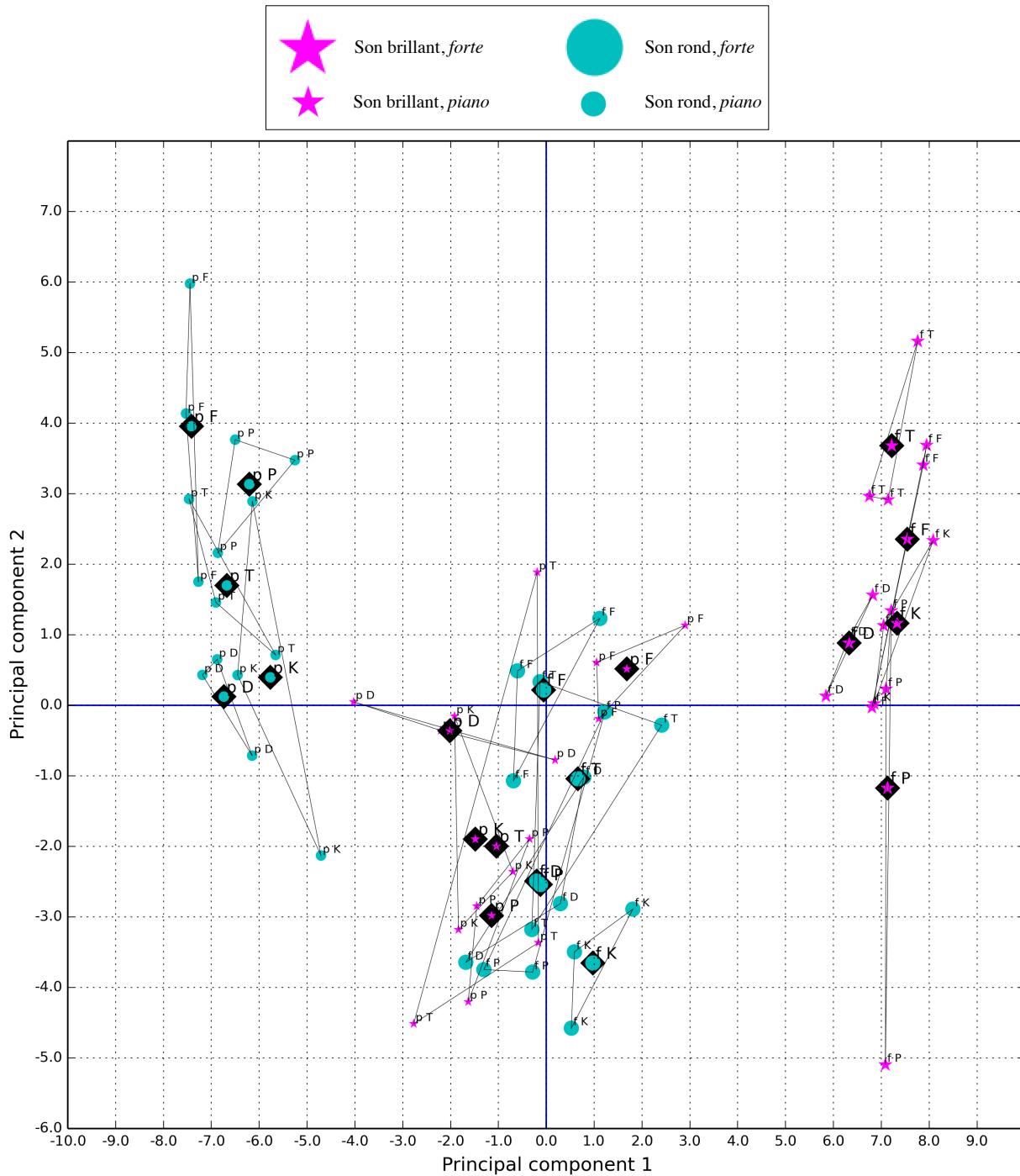


FIGURE 6.2 – Sons standard longs - PCA dim. 1-2 – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D formé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. On observe trois groupes distincts : les sons ronds et *piano*, les sons brillants *piano* et ronds *forte*, et enfin, les sons brillants et *forte*. Retour au texte : cliquez [ici](#).

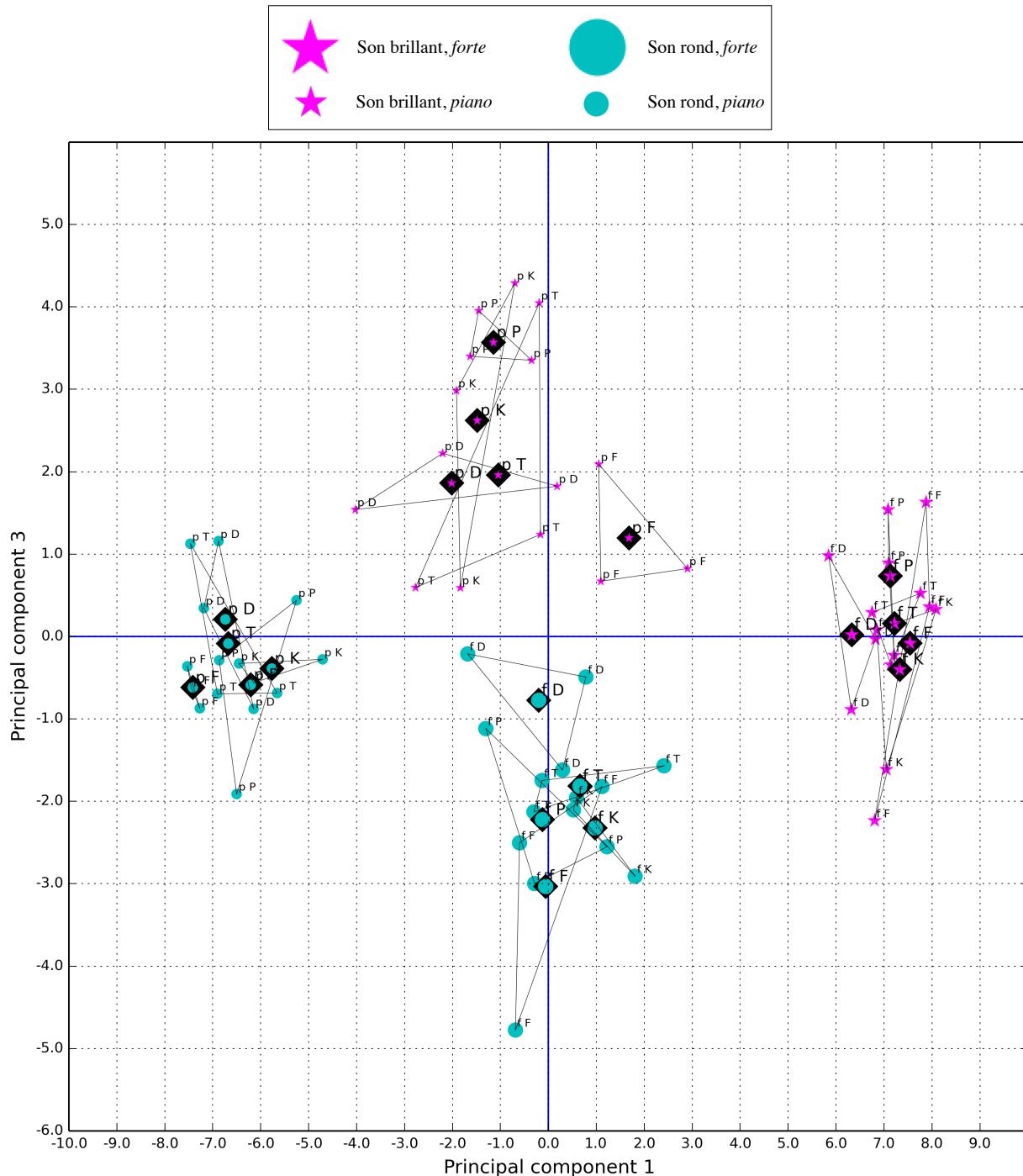


FIGURE 6.3 – Sons standard longs - PCA dim. 1-3 – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *D#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D formé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. On observe quatre groupes distincts correspondant aux quatre types de sons : ronds et *piano*, brillants et *piano*, ronds et *forte*, et enfin, les sons brillants et *forte*. Retour au texte : [cliquez ici](#).

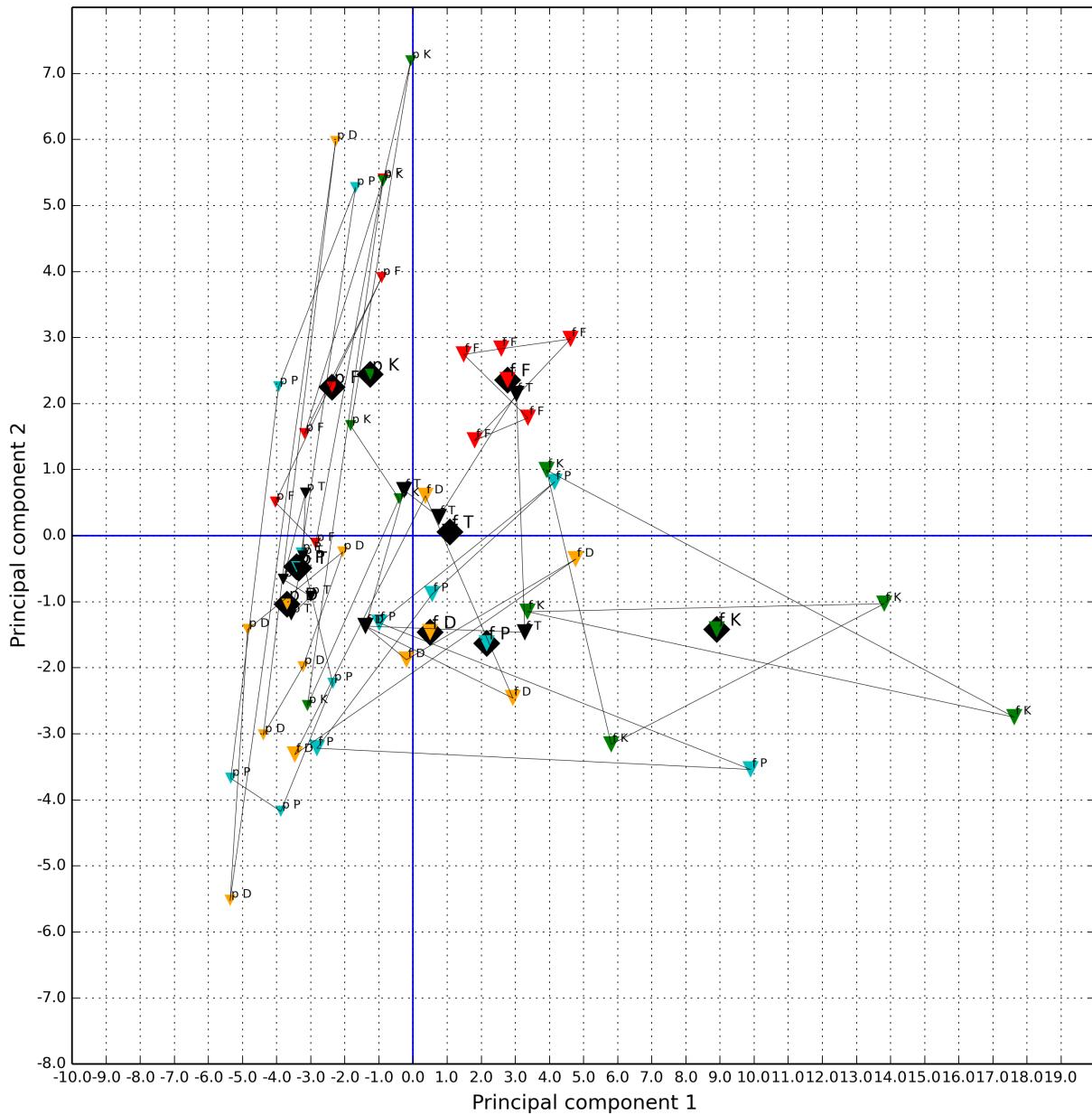


FIGURE 6.4 – Sons standard courts - PCA dim. 1-2 – Des sons courts, en nuance *piano* et *f* obtenus avec un mode de production sonore standard, ont été enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz). Pour chaque nuance dynamique, cinq types d'attaque ont été testées. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. De plus, pour plus de clarté, des couleurs distinctes ont été associées à chacun des types d'attaques : jaune pour D, orange pour F, vert pour K, cyan pour P et noir pour T. Sur ce graphique, les sons sont placés dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. **Retour au texte : cliquez ici.**

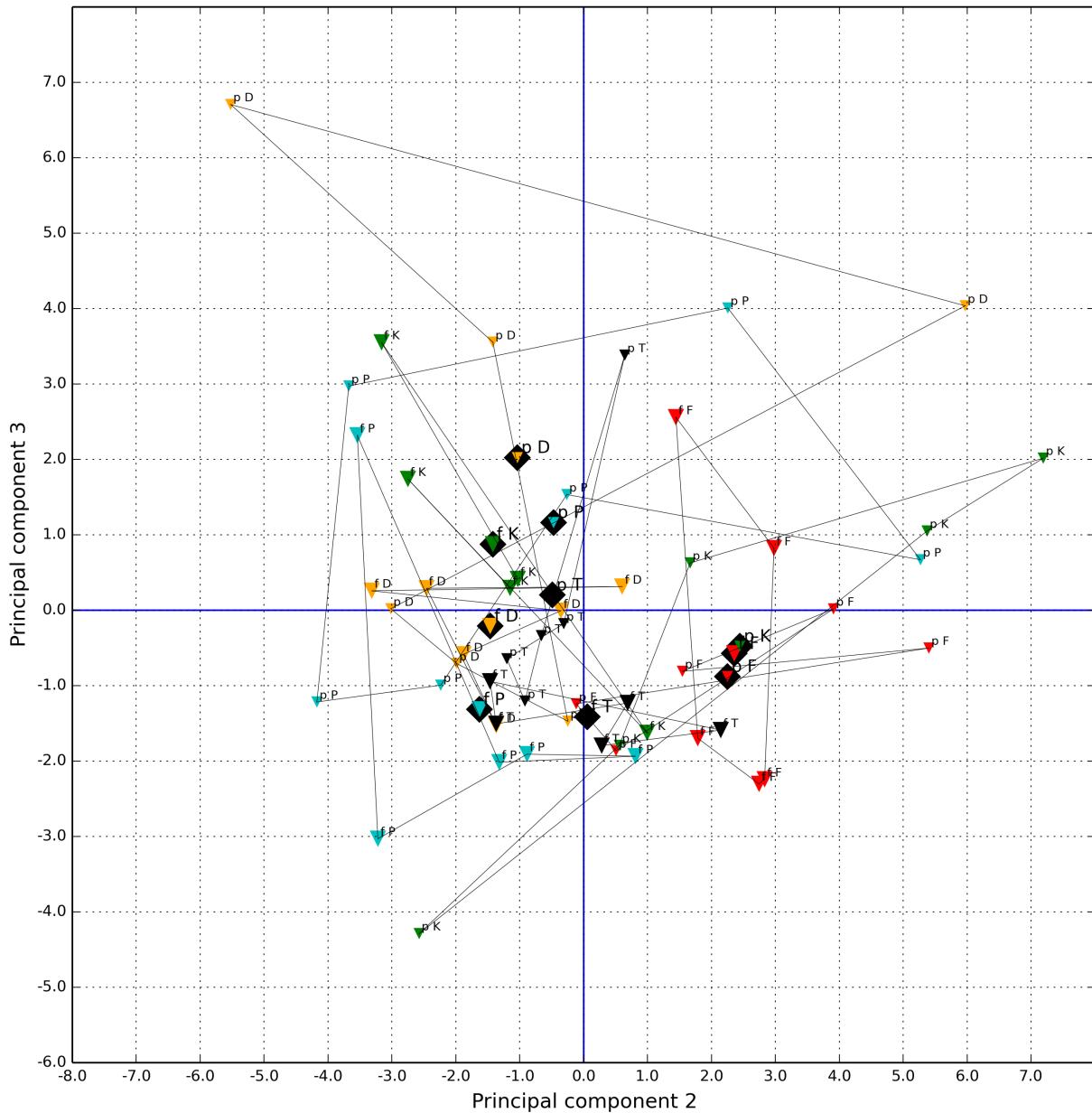


FIGURE 6.5 – Sons standard courts - PCA dim. 2-3 – Des sons courts, en nuance *piano* et *f* et obtenus avec un mode de production sonore standard, ont été enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz). Pour chaque nuance dynamique, cinq types d'attaque ont été testées. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. De plus, pour plus de clarté, des couleurs distinctes ont été associées à chacun des types d'attaques : jaune pour D, orange pour F, vert pour K, cyan pour P et noir pour T. Sur ce graphique, les sons sont placés dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. **Retour au texte : cliquez ici.**

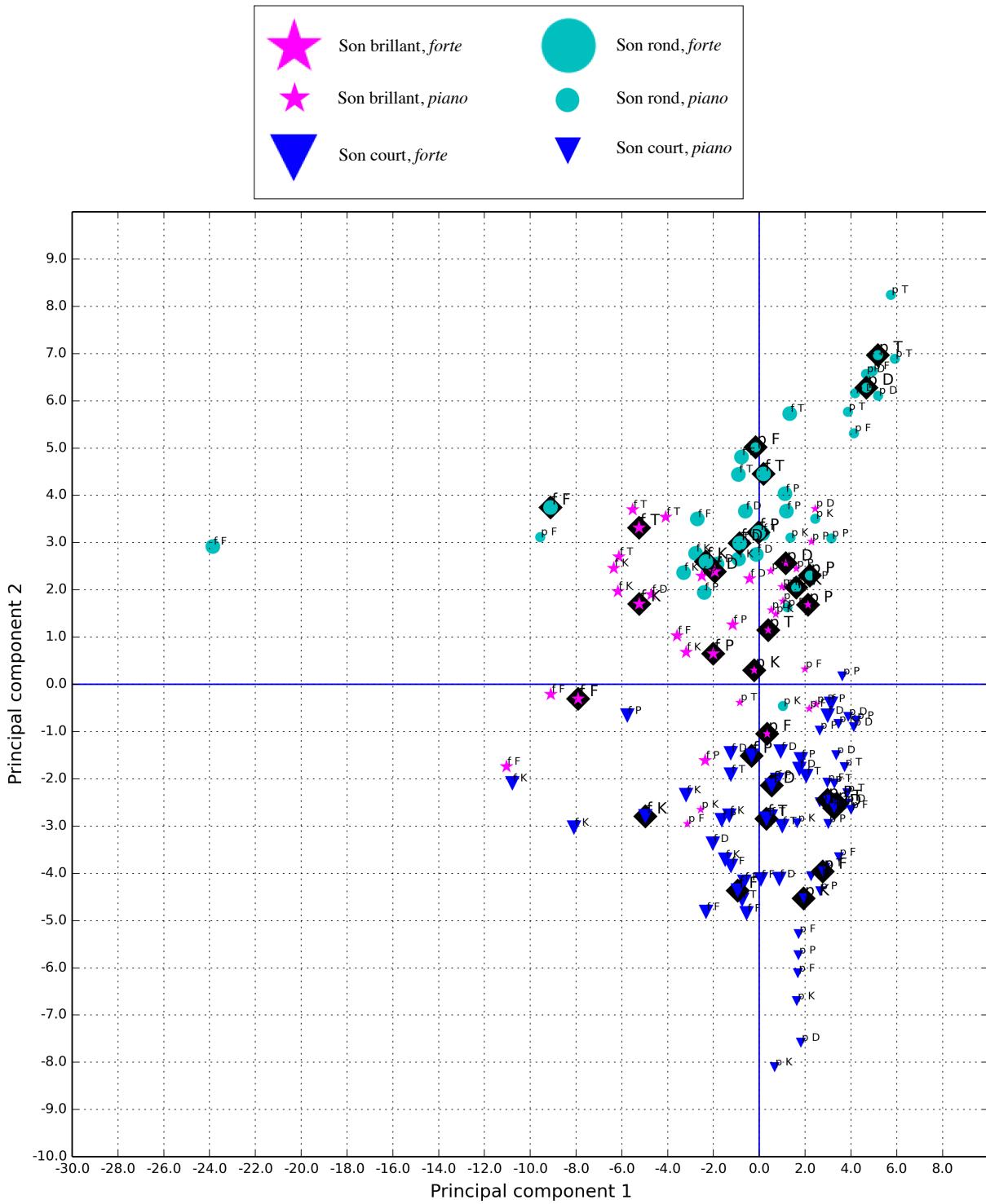


FIGURE 6.6 – Sons standard longs et courts - PCA dim. 1-2 – Quatre types de sons longs d'une durée de 2 secondes (ronds et *piano*, brillants et *piano*, ronds et *forte*, et enfin, les sons brillants et *forte*) et des sons courts en nuance *forte* et *piano*, tous enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composante principale effectuée pour ce groupe. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d'attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d'attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées.
Retour au texte : cliquez ici.

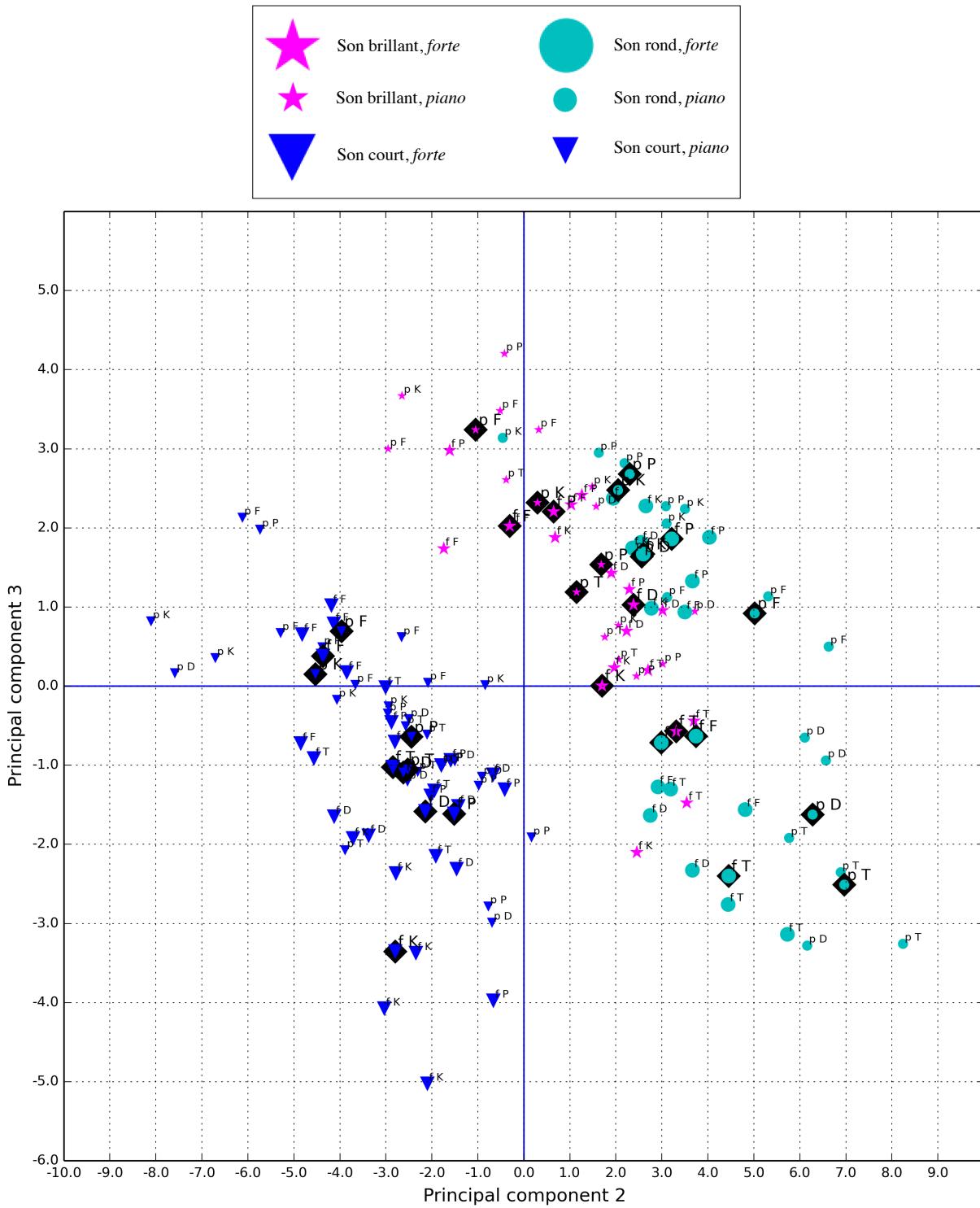


FIGURE 6.7 – Sons standard longs et courts - PCA dim. 2-3 – Quatre types de sons longs d'une durée de 2 secondes (ronds et *piano*, brillants et *piano*, ronds et *forte*, et enfin, les sons brillants et *forte*) et des sons courts en nuance *forte* et *piano*, tous enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composante principale effectuée pour ce groupe. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d'attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d'attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées.

Retour au texte : cliquez [ici](#).

4 Discussion

4.1 Caractéristiques timbrales des sons

Comme on l'a vu, l'analyse par composantes principales a l'avantage de permettre le placement des sons analysés dans un espace à deux ou trois dimensions. Cette représentation visuelle permet ensuite quels groupes de sons se distinguent des autres par rapport aux dimensions de l'analyse. Cela nous renseigne non seulement sur les caractéristiques sonores qui permettent la différenciation des catégories de sons, mais également sur les différences relatives entre les catégories de sons. Ainsi, deux sons rapprochés dans l'espace de timbre seront relativement similaires, alors que deux sons très éloignés auront un timbre très différent.

Si l'on considère la nuance dynamique (*forte* ou *piano*) ainsi que la nuance de timbre (entre *rond* et *brillant*), on constate que le fait de faire coïncider la nuance de timbre avec la nuance dynamique choisie permet d'amplifier celle-ci. En effet, les sons ronds *piano* et brillants *forte* constituent les deux groupes les plus éloignés les uns des autres dans l'espace de timbre consacré aux sons longs avec mode de production standard. Par ailleurs, la brillance ne se traduit pas seulement par un centroïde spectral élevé, mais aussi par des énergies bruitées et harmoniques plus élevées. À l'inverse, les sons plus ronds sont aussi plus stables (coefficients d'autocorrélation) et obtiennent des valeurs plus élevées pour l'aplatissement, l'asymétrie et la décroissance spectraux. Du côté de la nuance dynamique, le *forte* semble entraîner des valeurs plus hautes pour le tristimulus (coefficients 2 et 3), donc caractériser des sons avec plus d'énergie dans les aigus, mais aussi des valeurs plus hautes pour le flux spectral et le taux de passage à zéro. Cela va dans le sens d'une présence accrue de bruit par rapport à la nuance *piano*, ce qui s'explique par une plus grande présence de turbulences dans le jet d'air (voir à ce sujet, au chapitre 2, la section 2.6).

La création de l'espace de timbres dédié aux types d'attaque pour les sons courts n'a pas donné de résultats concluants, excepté pour le fait que les attaques avec la consonne *K* semblent plus bruitées et instables (passage à zéro, flux spectral et tristimulus 3), et que les attaques avec la consonne *F* produisent des sons avec une plus grande énergie spectrale. Il est possible que le changement de consonne occlusive ne produise pas de changements majeurs dans l'articulation des sons, mais il est également possible que la personne ayant enregistré les échantillons sonores

(en l'occurrence, l'auteure de cette thèse) ait manqué de constance dans cet exemple particulier. Il serait intéressant de reprendre l'analyse avec plusieurs participant.e.s, afin de déterminer s'il existe réellement des différences timbrales constantes entre les différents types d'attaque. Cela dit, en comparant les sons longs et les sons courts (avec mode de production sonore standard), on constate que la différence entre les deux groupes ne se caractérise pas uniquement par la longueur des sons mais aussi des variations sur le plan spectro-temporel, notamment du côté du flux spectral, les sons courts obtenant une valeur plus élevée pour ce descripteur que les sons longs.

En regardant l'espace de timbres regroupant l'ensemble des sons à excitation continue, on remarque que ce sont les sons de trompette d'une part et les *jet whistles* sifflés d'autre part qui sont les deux groupes les plus différents l'un de l'autre (en considérant leurs positions extrêmes dans l'espace de timbres). On retrouve aussi de grandes différences entre le groupe des sons mixtes standard/éoliens et celui des sons brillants *forte*. Les sons éoliens semblent se distinguer des autres par leur énergie élevée dans les aigus, leur brillance ainsi que la quantité de bruit qu'ils contiennent. Dans une moindre mesure, les *jet whistles* sifflés, les sons joués dans l'aigu et les sons avec multiphoniques ou voix à l'octave semblent aussi suivre cette tendance. Les *jet whistles* sifflés et les sons joués dans l'aigu semblent aussi se démarquer par une inharmonicité élevée.

Du côté des sons courts (excitation instantanée), les sons produits avec du souffle se distinguent de ceux obtenus avec des techniques percussives. Celles-ci se traduisent par une quantité plus importante de bruit et d'énergie dans les aigus, ce qui s'explique par la présence de composantes bruitées extrêmement vives à l'attaque (on les remarque par le taux de passage à zéro, le tristimulus 3 et le rapport bruit/énergie totale obtenus). Et parmi les techniques percussives, une distinction claire existe entre les *pizzicati* et percussions de clé d'un côté (ils ont une plus grande quantité d'énergie près de la fondamentale), et les *tongue rams* de l'autre (qui sont plus bruités). Spécialement dans le cas de techniques percussives, la composition spectrale des sons semble être dépendante des propriétés de l'attaque (notamment avec le temps d'attaque et l'irrégularité spectrale), qui déterminera quels partiels seront excités, et si la présence de bruit dans le son sera importante ou pas.

Enfin, avec les techniques polyphoniques et de modulation, c'est l'intervalle créé avec la voix

(unisson ou octave par rapport au triton) ainsi que la présence ou l'absence de *fluttermode* qui crée la distinction entre les groupes de sons. L'usage de la voix à l'octave (et dans une moindre mesure, à l'unisson) entraîne une grande inharmonicité et un flux spectral plus élevé que pour les sons sans voix. Pour l'usage de la voix au triton, l'absence de renforcement harmonique se traduit par plus d'énergie dans les graves (tristimulus 1) et des changements dans la détection de la fréquence fondamentale. On remarque aussi des valeurs plus élevées pour l'aspect plat du spectre et pour le rapport bruit/énergie totale. Quant au *fluttermode*, il entraîne de plus grandes valeurs RMS et une instabilité qui se traduit par un rapport bruit/énergie totale et par un flux spectral plus élevés.

4.2 Importance relative des descripteurs du timbre

En début de chapitre, une des interrogations concernait le rôle des descripteurs acoustiques du timbre dans la différenciation des timbres de la flûte traversière. Si l'on considère, pour l'ensemble des expériences, les quatre dimensions de la PCA⁹ et pour chacune de ces dimensions, les quatre descripteurs dont les coefficients en valeur absolue sont les plus élevées aux extrémités minimale et maximale de la dimension, il est possible de déterminer quels sont les descripteurs qui reviennent le plus souvent dans la constitution des dimensions des espaces de timbres.

Le descripteur qui apparaît le plus souvent (20 fois) est le temps d'attaque : il se retrouve pour un total de 20 fois dans la composition des dimensions des PCA effectuées pour ce chapitre. Cela est conséquent avec les résultats obtenus en psychoacoustique lors des expériences sur la perception du timbre instrumental : le plus souvent, le temps d'attaque correspond à la première dimension des espaces perceptifs obtenus par les auteurs de ces expériences.

En général, les descripteurs temporels jouent un rôle assez important dans les analyses de ce chapitre. Le temps de décroissance, la durée effective du son et le centroïde temporel apparaissent respectivement 16, 14 et 13 fois dans la constitution des dimensions. L'amplitude de modulation du signal et le taux de passage à zéro ont aussi une certaine importance, en apparaissant respectivement 11 et 10 fois dans les dimensions.

Du côté des descripteurs spectraux et spectro-temporels, on remarque la présence de la pente globale du spectre (13 apparitions), de la décroissance spectrale (11), du centroïde (10) et du flux

⁹Analyse par composantes principales. Au besoin, on pourra se référer à la définition donnée à la section 2.4.

spectral (10). Enfin, la fréquence fondamentale (11), l'énergie harmonique (10) et les coefficients de tristimulus 3 (10) et 2 (9) se démarquent également par leur présence dans les dimensions de la PCA.

4.3 Durée effective, valeur efficace (RMS) et fréquence fondamentale

Avec la définition du timbre de l'ANSI (Cf. section 2.1.1), qui le désigne comme la caractéristique qui permet de différencier deux sons de même hauteur, intensité et longueur, on pourrait s'étonner du fait que des descripteurs comme la durée effective, la valeur efficace (RMS) et la fréquence fondamentale fassent partie de ceux que l'on utilise pour décrire le timbre instrumental. Il aurait été possible de les éliminer de l'analyse, mais ils ont été conservés. La durée effective (ou perçue) permet bien évidemment de différencier les sons à excitation continue des sons à excitation instantanée, qui dépendent du mode de production sonore utilisé.

La valeur efficace a aussi été conservée : étant donné que le registre dynamique de la flûte est relativement restreint – autour de 6 dB si on limite les variations de timbre (Meyer 2009, p. 66), le but était de déterminer son rôle relatif par rapport au timbre dans la différentiation des sons. On peut constater que les différences de valeur efficace n'occultent pas les différences de timbre dans le processus d'analyse, puisque la valeur efficace n'apparaît que 8 fois dans la constitution des dimensions.

Quant à la fréquence fondamentale, il serait pertinent de l'uniformiser lors d'expériences ultérieures sur la perception des timbres de la flûte. Cependant, puisque les analyses sont réalisées à l'aide d'un logiciel et que la fréquence fondamentale est calculée à partir d'un algorithme, on peut la considérer comme une caractéristique corrélée à d'autres propriétés timbrales en lien notamment avec la brillance et l'harmonicité du spectre.

4.4 Limites de l'expérience

Il est à noter que ces résultats ont été obtenus à partir d'un échantillon relativement restreint. Les sons enregistrés ont tous été joués par la même personne et sur le même instrument. Il est possible que l'instrumentiste n'ait pas la capacité de jouer avec la même constance pour toutes les techniques de jeu testées. Il se peut aussi que la grande diversité des écoles de pensée, des pratiques musicales et des timbres-individualité, c'est-à-dire l'ensemble des caractéristiques qui

permettent de différencier un.e instrumentiste d'un.e autre génère des résultats très variables si on demande à plusieurs personnes de répéter la même expérience. Il s'agirait alors de déterminer si les mêmes différences en terme de timbre-qualité se retrouveraient d'une personne à l'autre.

Par ailleurs, on a vu que le type de représentation du signal audio (à partir de la transformée de Fourier à court terme, du spectre harmonique ou d'un modèle auditif) est susceptible de faire varier les valeurs obtenues. Outre les erreurs possibles d'implémentation, il se pourrait que l'utilisation d'un type différent de représentation du signal ou l'inclusion ou l'exclusion de certains descripteurs dans l'analyse par composantes principales nous amène à des conclusions tout à fait différentes.

5 Conclusion

Malgré les quelques points soulevés plus tôt, les résultats de cette expérience fournissent des informations pertinentes pour la caractérisation de l'ensemble des timbres de la flûte traversière, ainsi que sur les types de descripteurs qui sont les plus susceptibles de permettre la différenciation des sons. Il serait utile, dans une recherche future, de comparer les résultats obtenus ici avec ceux d'une expérience sur la perception des sons, afin de déterminer si les différences établies ici entre les groupes de sons sont similaires aux dimensions perceptives permettant l'évaluation et la différenciation des sons par un groupe de participants.

De plus, examiner les différences entre les groupes de sons ainsi que ce qui les caractérise peut être utile au moment de valider les différents types de classifications et de descriptions proposés dans les chapitres 2 et 3. En effet, les différences les plus apparentes se traduisent par un mode de production sonore différent (par exemple, son de trompette et *jet whistle*), ou encore par un usage combiné d'une nuance dynamique et d'une nuance de timbre bien définies.

Par ailleurs, la méthodologie présentée dans le cadre de ce chapitre en est une que l'on pourrait reprendre avec plusieurs interprètes, ainsi que pour l'étude du timbre de plusieurs instruments différents. Il s'agira alors, avant de procéder à la série d'expériences, d'expliquer avec l'instrumentiste la nature de ses propres catégories timbrales, en conjonction avec d'autres définitions communément admises, comme celles de plusieurs techniques étendues et modes de jeu particuliers.

La prochaine étape consistera à examiner le rôle des descripteurs de timbres lorsqu'ils sont considérés individuellement afin de caractériser les différences qui se retrouvent dans chacun des espaces de timbre. Ceci fera l'objet du prochain chapitre.

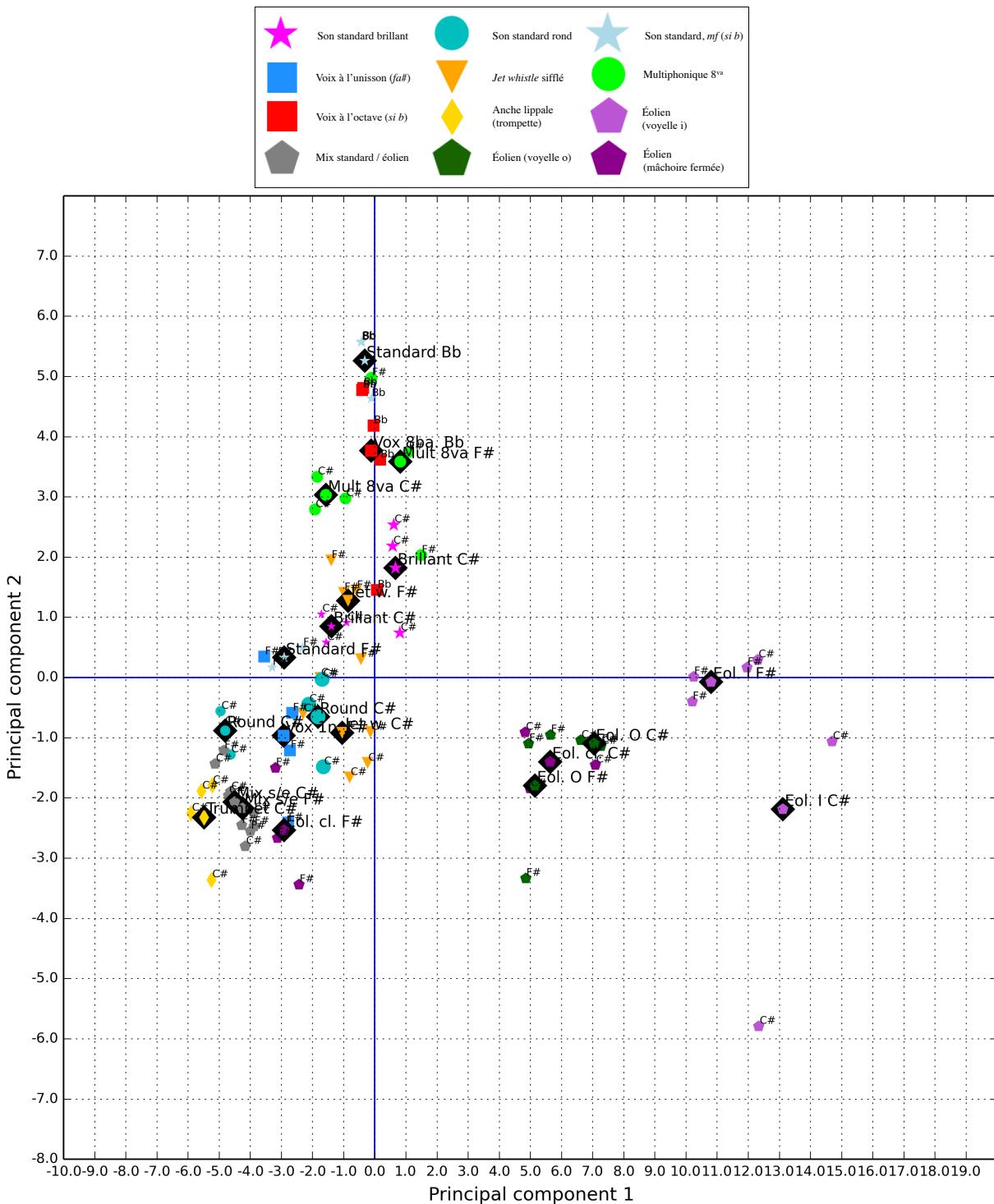


FIGURE 6.8 – Timbres à excitation continue - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**



FIGURE 6.9 – Timbres à excitation continue - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

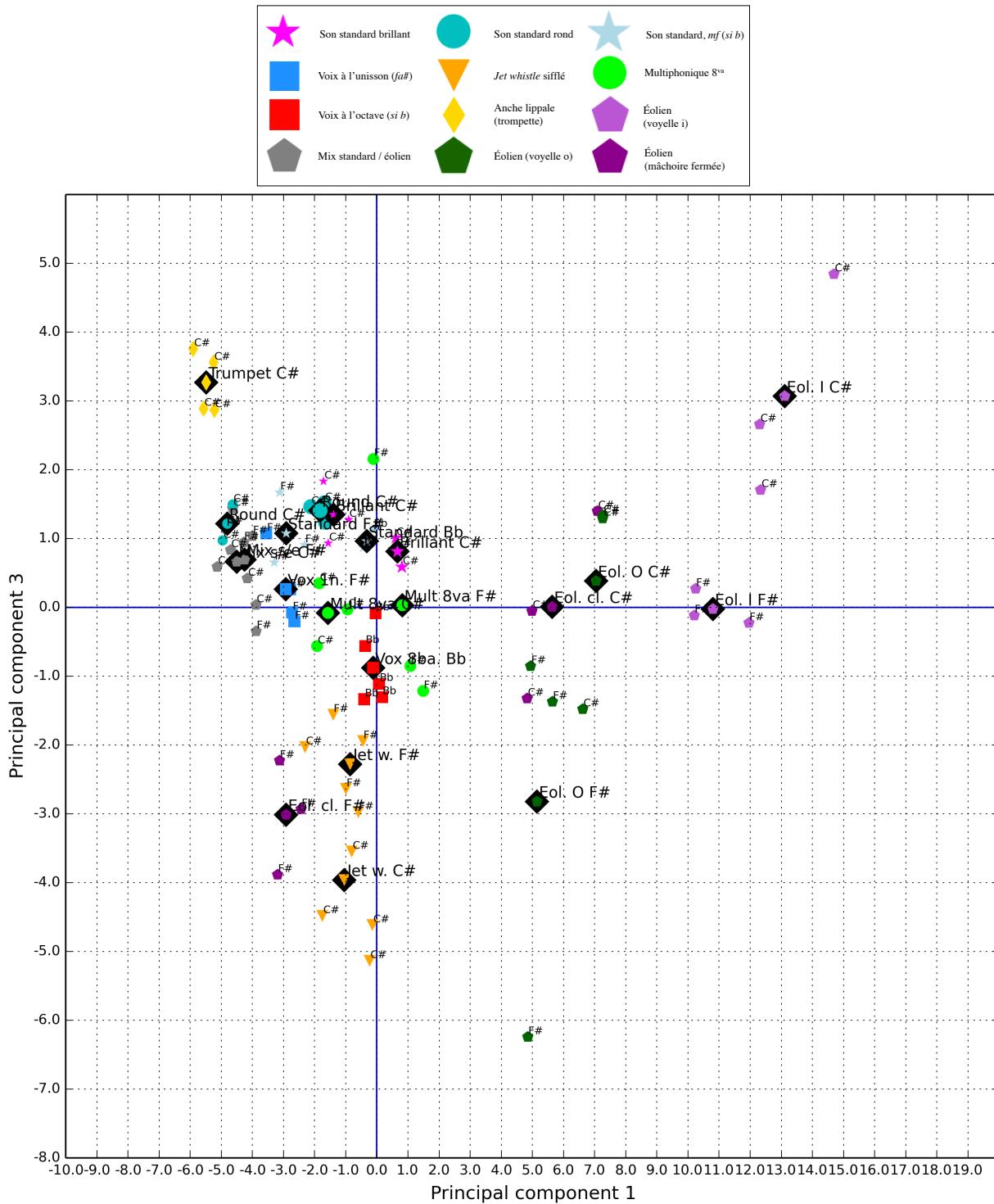


FIGURE 6.10 – Timbres à excitation continue - PCA dim. 1-3 – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

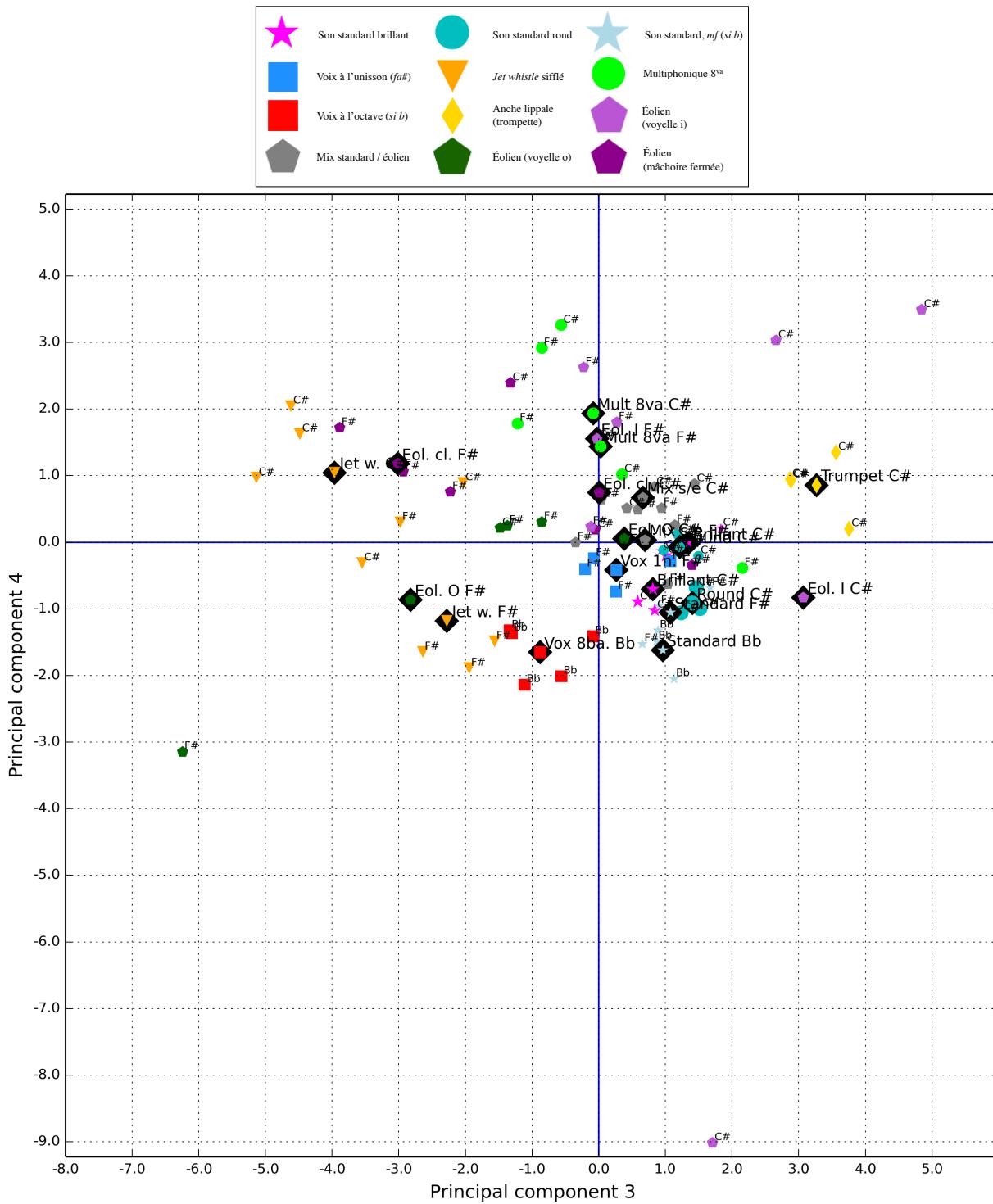


FIGURE 6.11 – Timbres à excitation continue - PCA dim. 3-4 – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 3 et 4 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

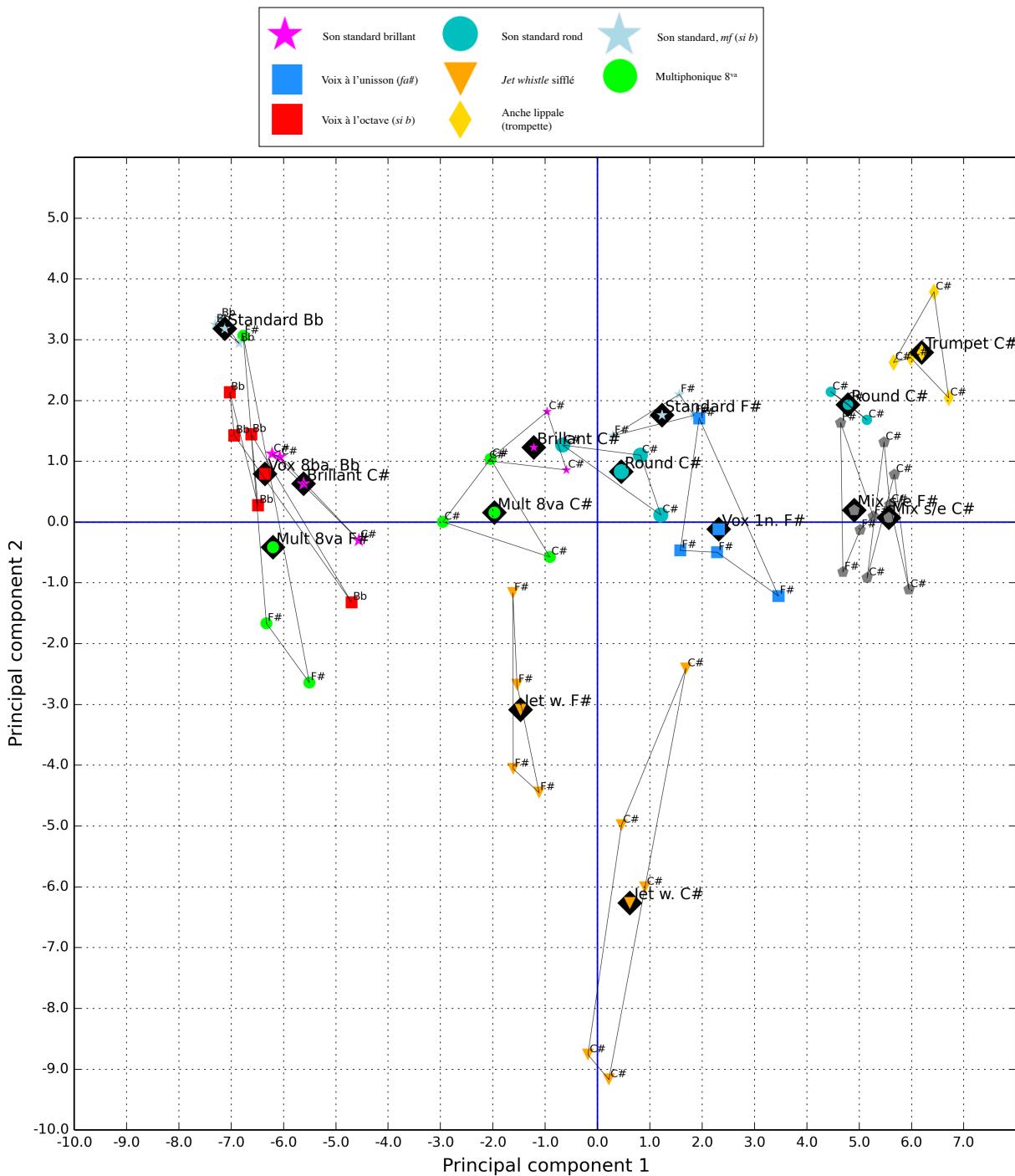


FIGURE 6.12 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

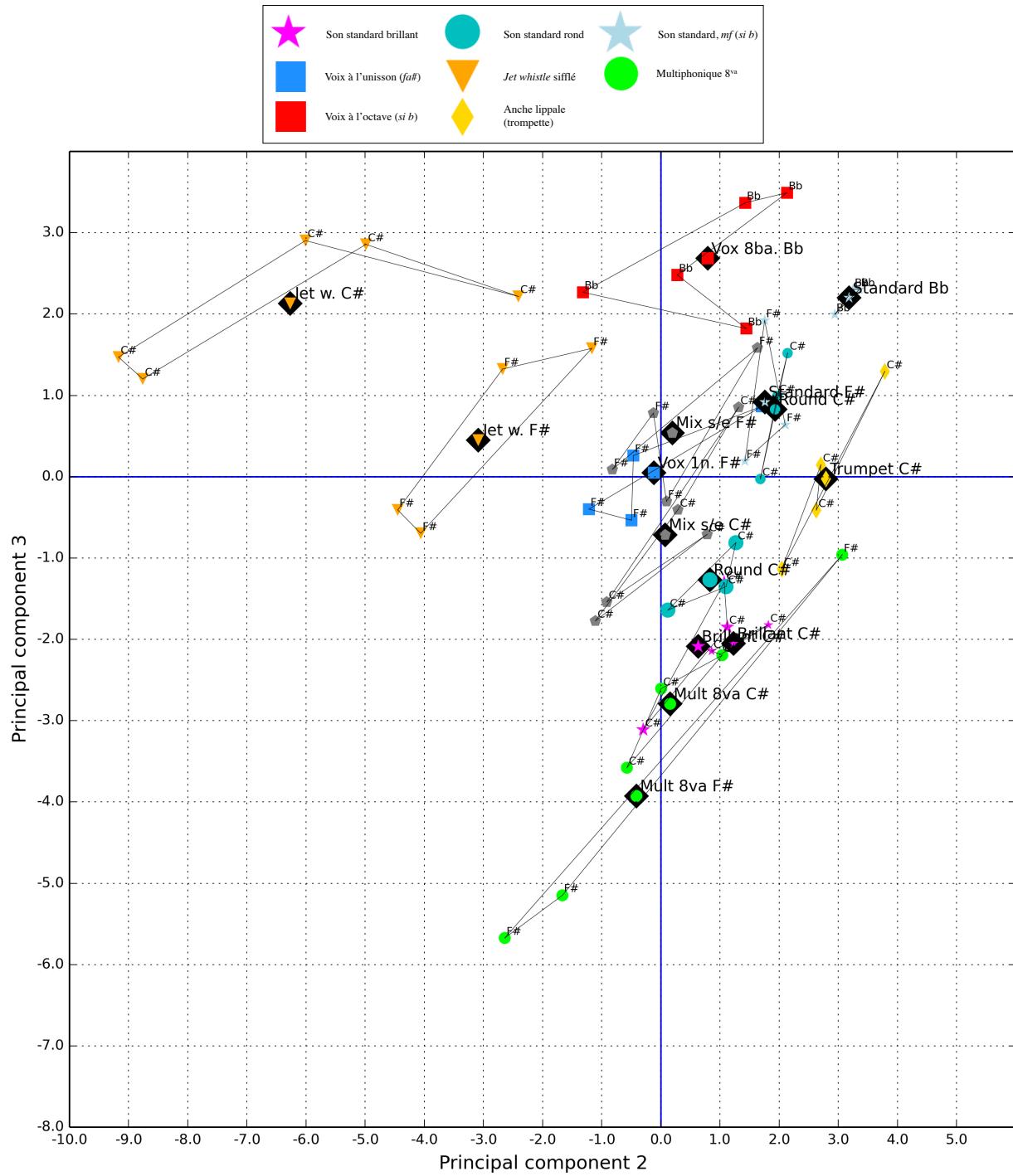


FIGURE 6.13 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

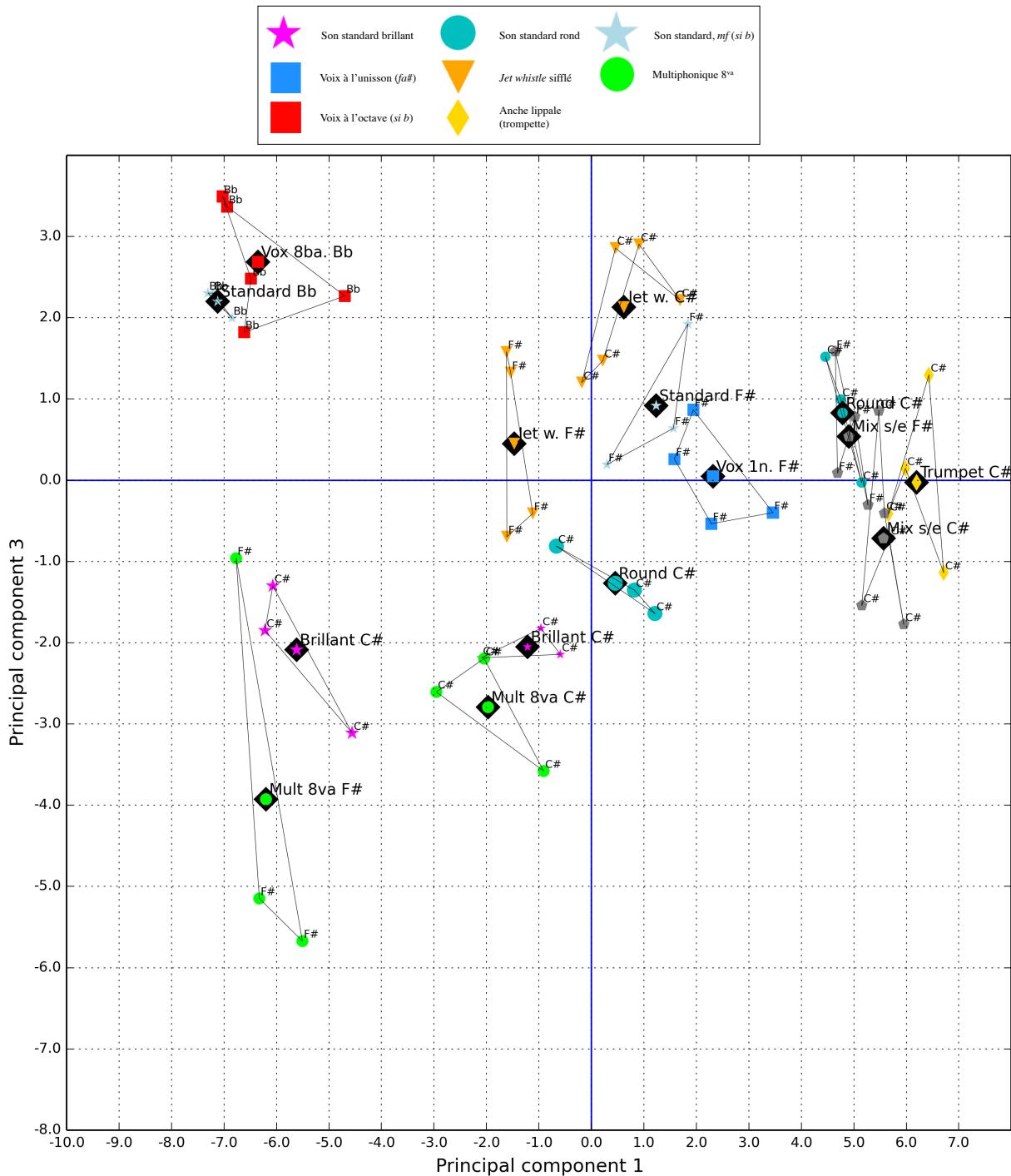


FIGURE 6.14 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 1-3 – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

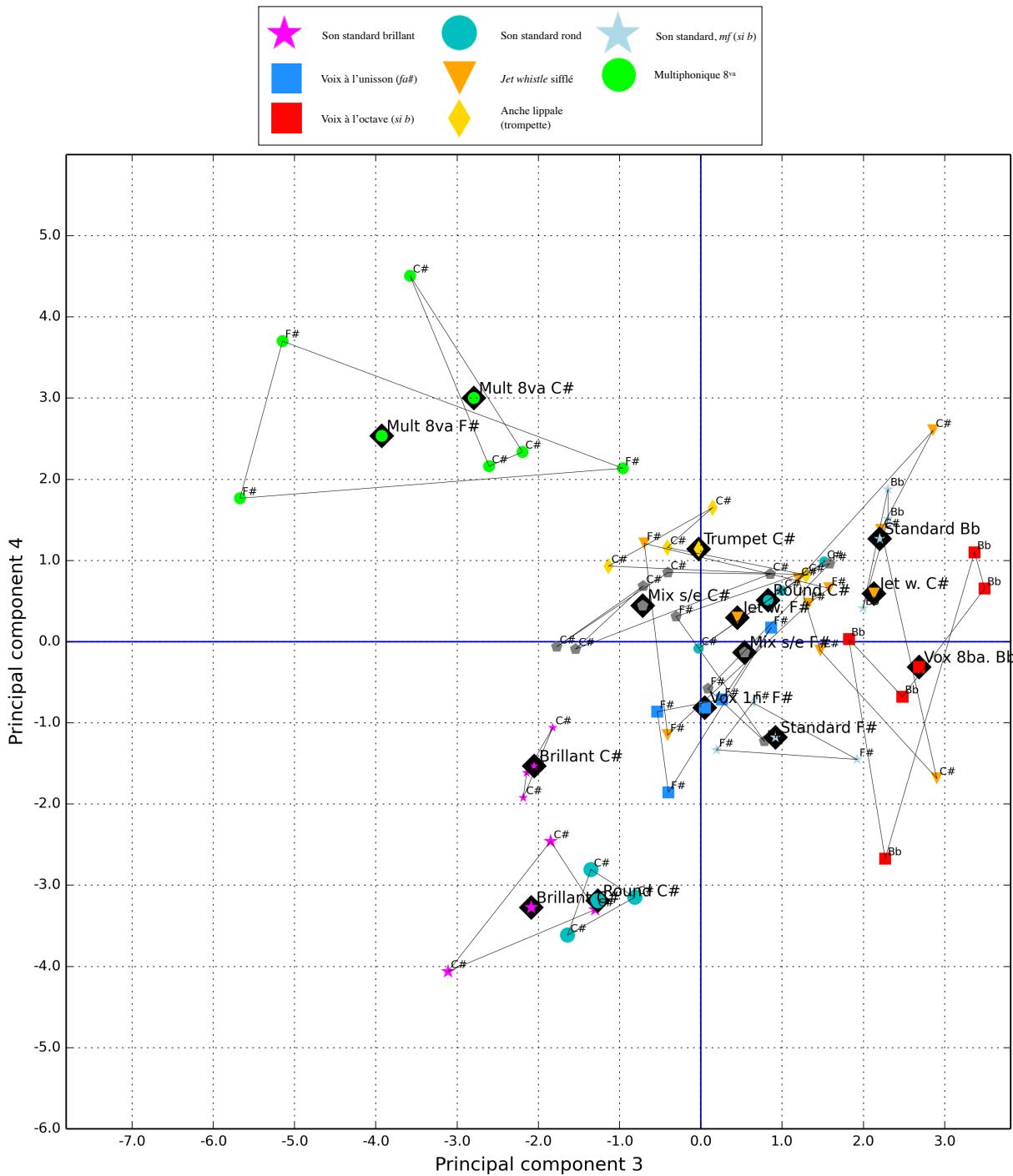


FIGURE 6.15 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - PCA dim. 3-4 – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel composé des dimensions 3 et 4 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

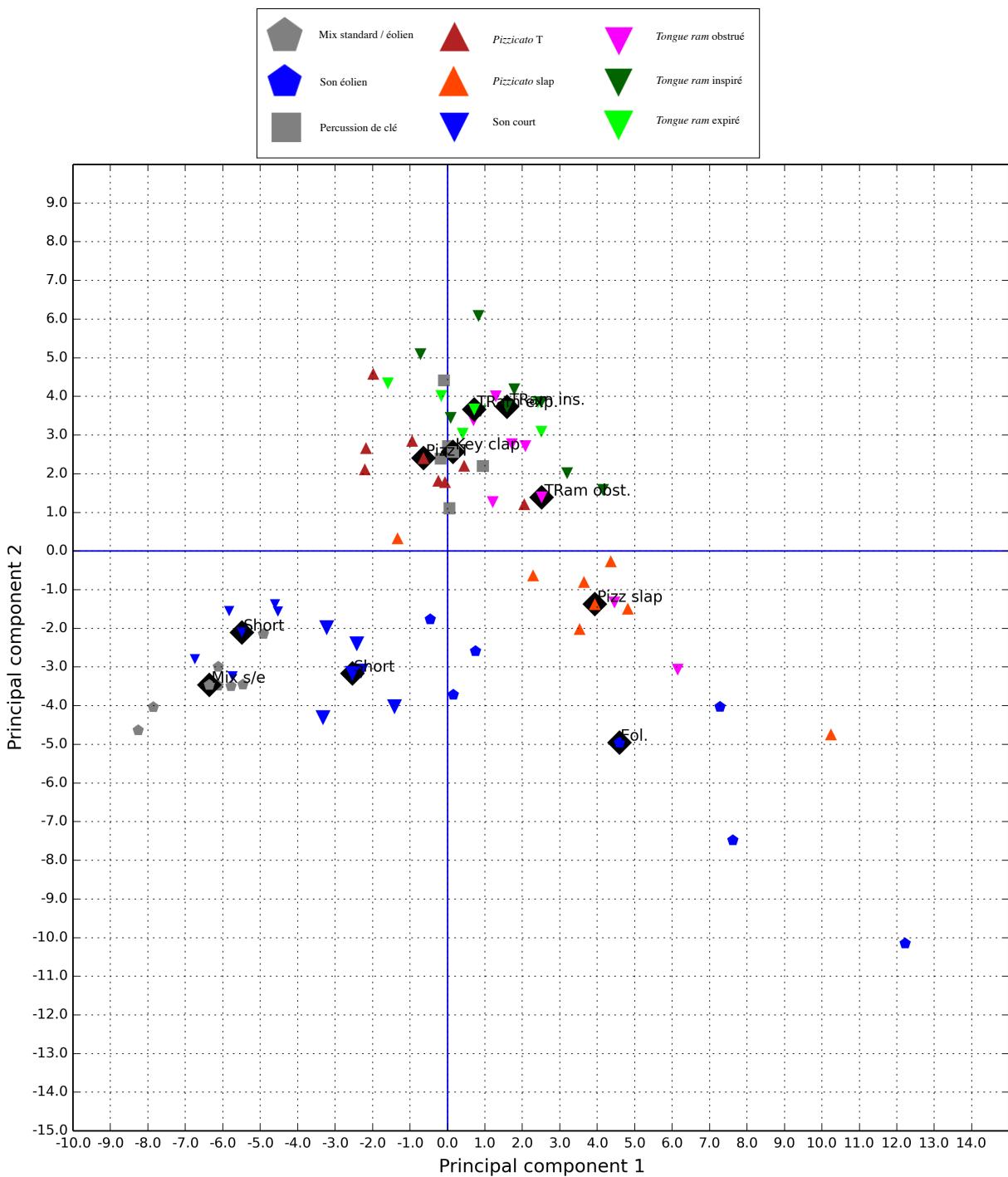


FIGURE 6.16 – Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

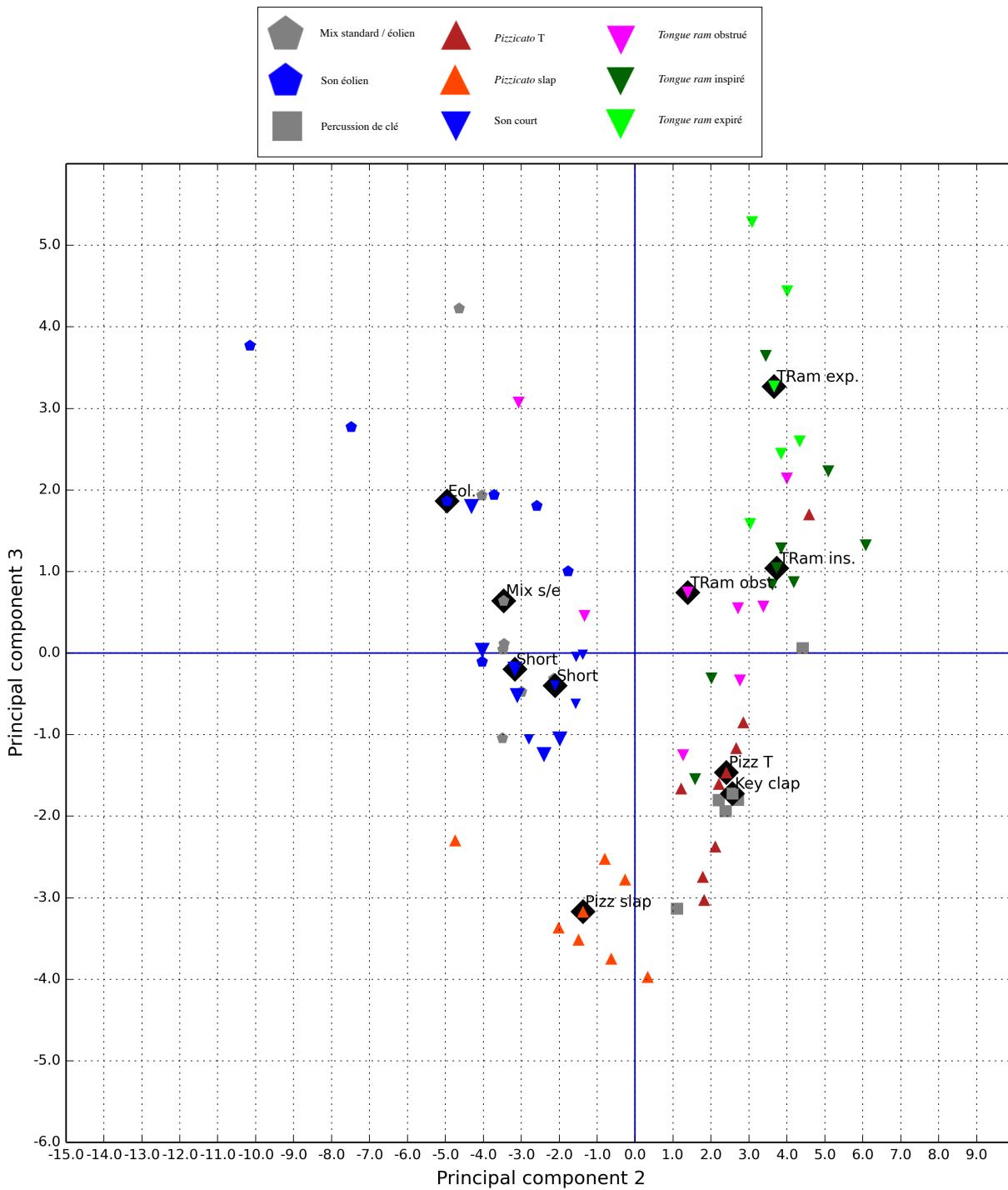


FIGURE 6.17 – Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

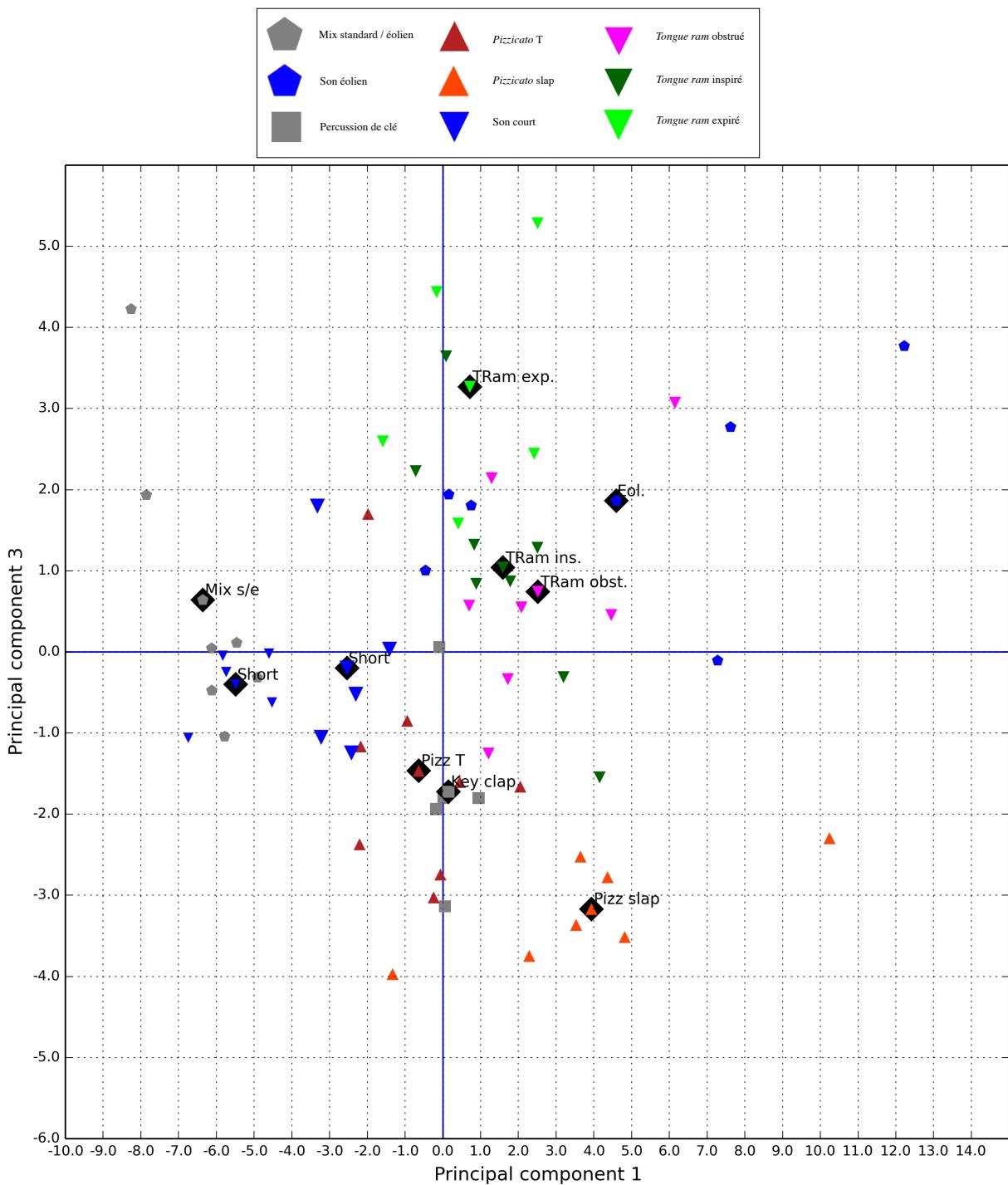


FIGURE 6.18 – Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 1-3 – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur Do# (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances piano et forte, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

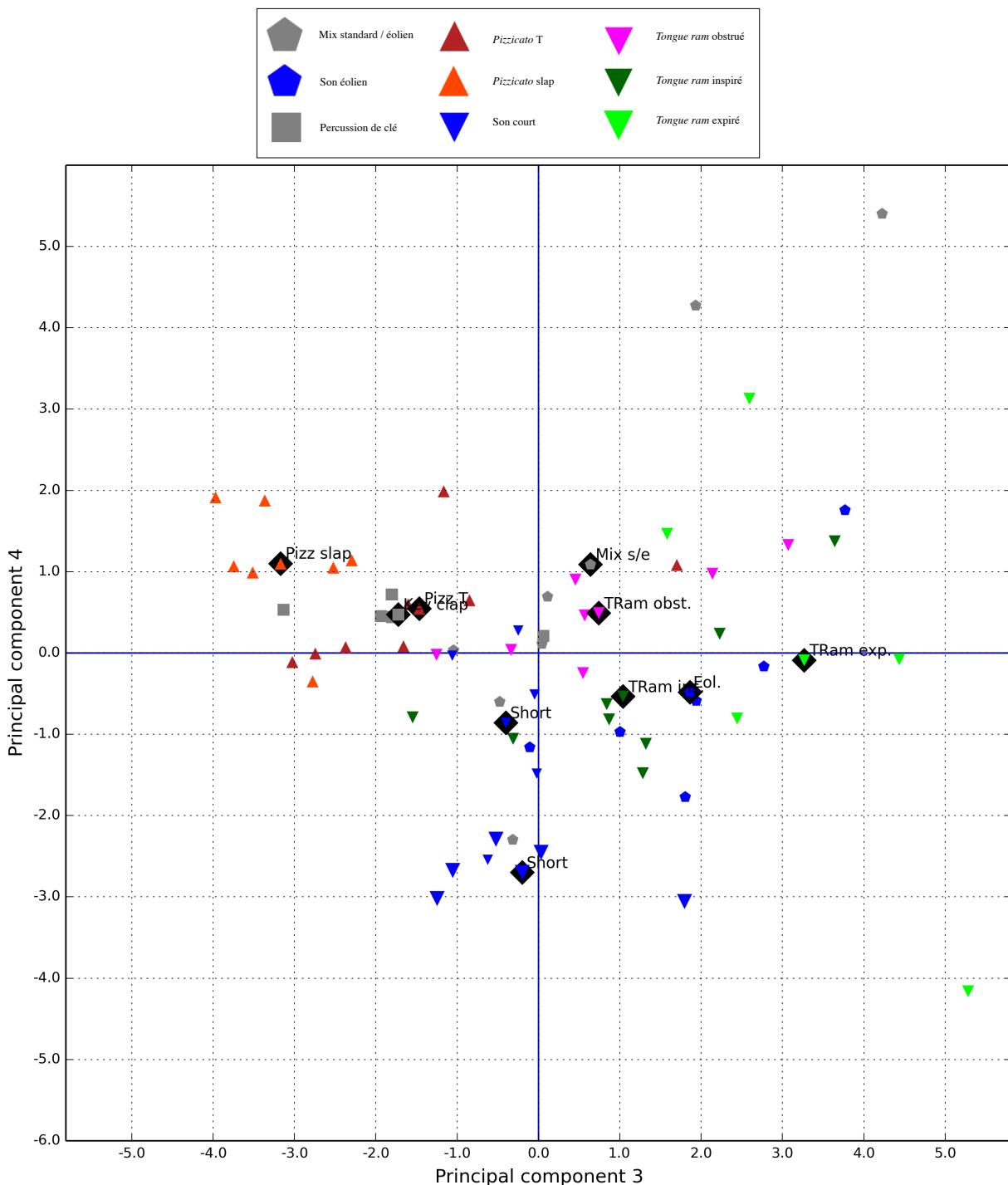


FIGURE 6.19 – Timbres à excitation instantanée - PCA dim. 3-4 – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 3 et 4 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

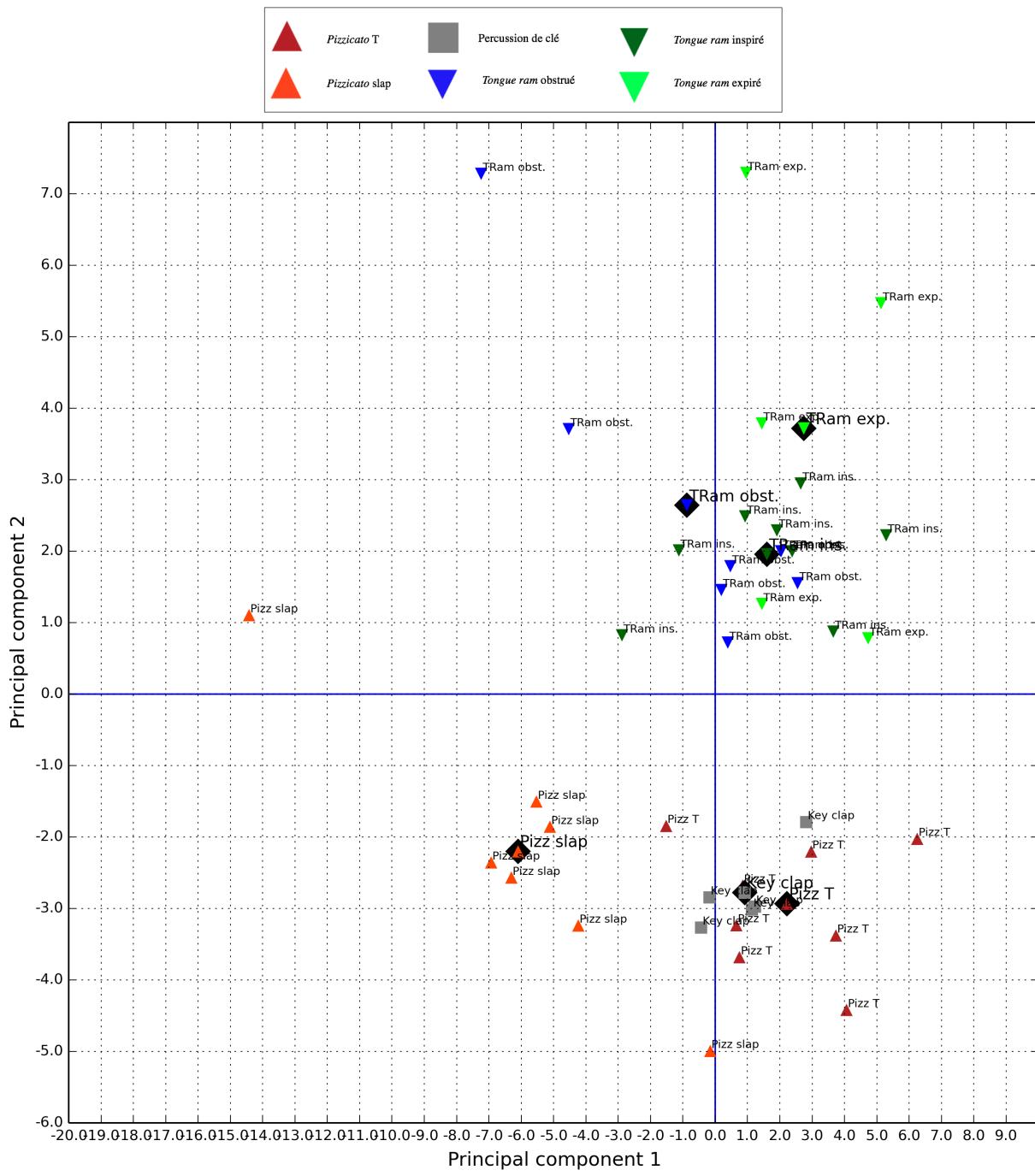


FIGURE 6.20 – Techniques percussives - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. Retour au texte : cliquez [ici](#).



FIGURE 6.21 – Techniques percussives - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 2 et 3 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

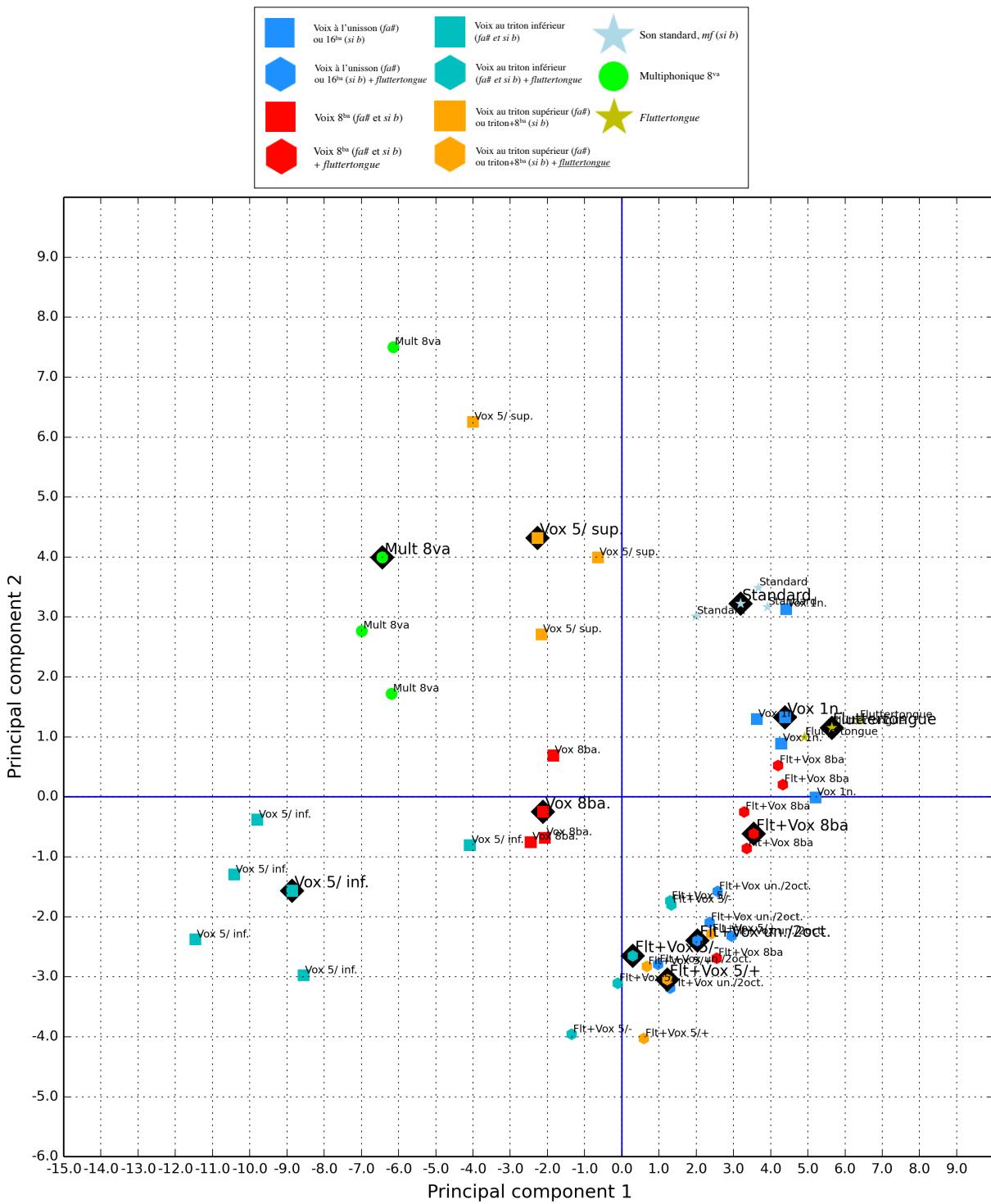


FIGURE 6.22 – Polyphonie et modulation (grave) - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 11 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation, jouées sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : son standard, son avec multiphonique à l’octave, son avec *flutterongue*, sons avec voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *flutterongue* ET voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Les pictogrammes représentés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. Pour le retour au texte sur le registre grave, cliquez [ici](#). Pour le retour au texte sur le registre médium, cliquez [ici](#).

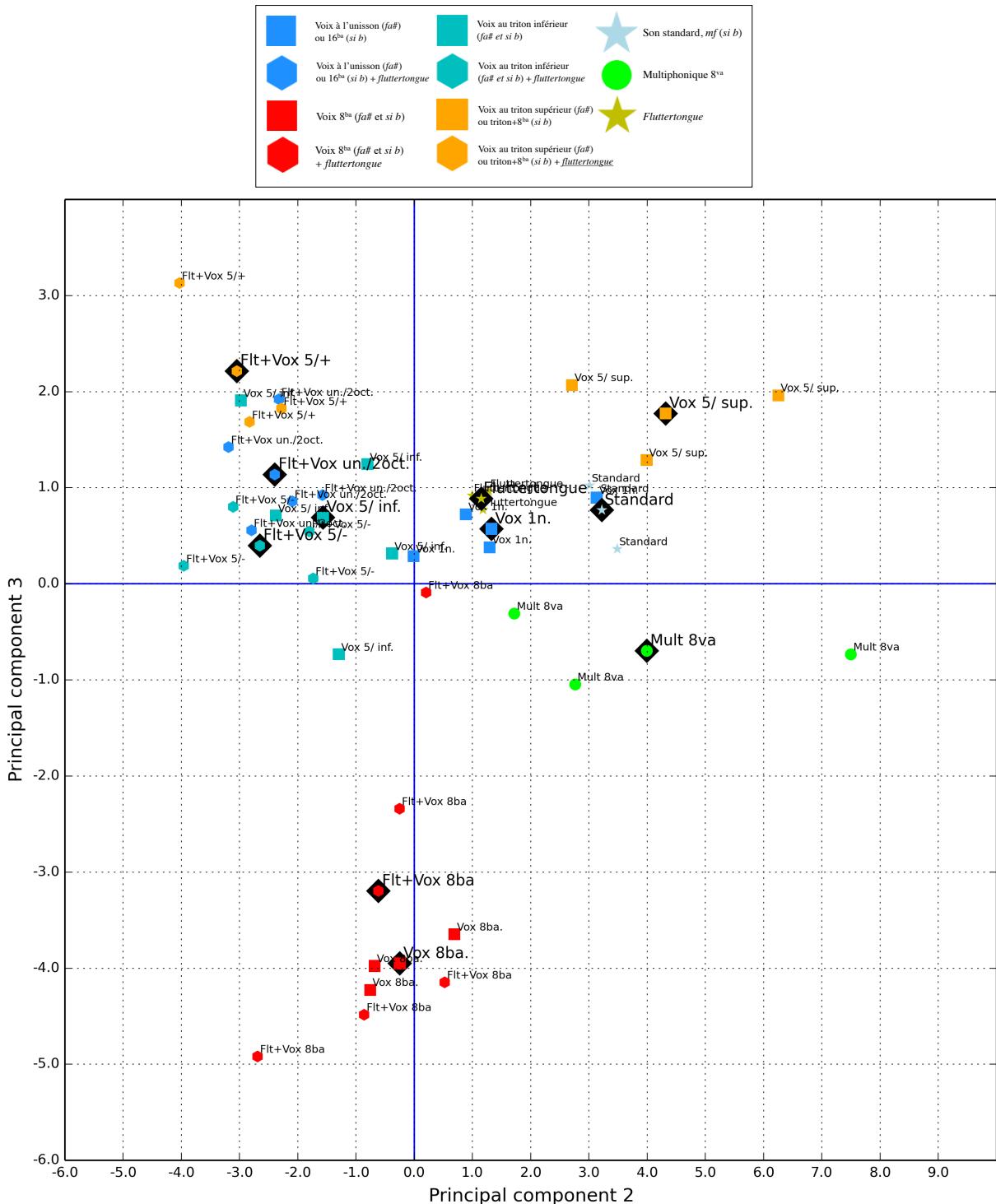


FIGURE 6.23 – Polyphonie et modulation (grave) - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 11 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation, jouées sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : son standard, son avec multiphonique à l’octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Les pictogrammes représentés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

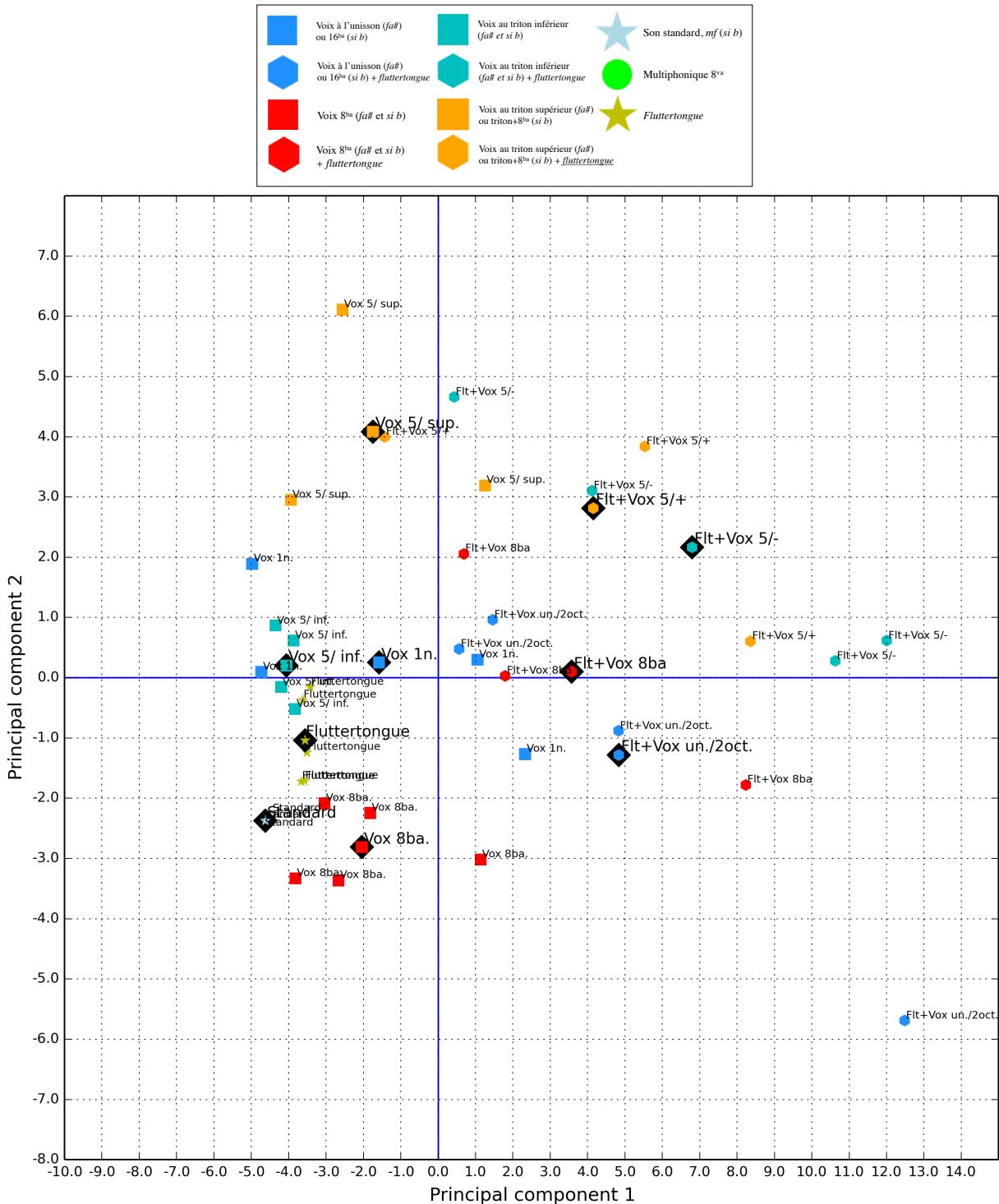


FIGURE 6.24 – Polyphonie et modulation (média/aigu) - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 10 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation, jouées sur *Si b* (936,57 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l’octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l’octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

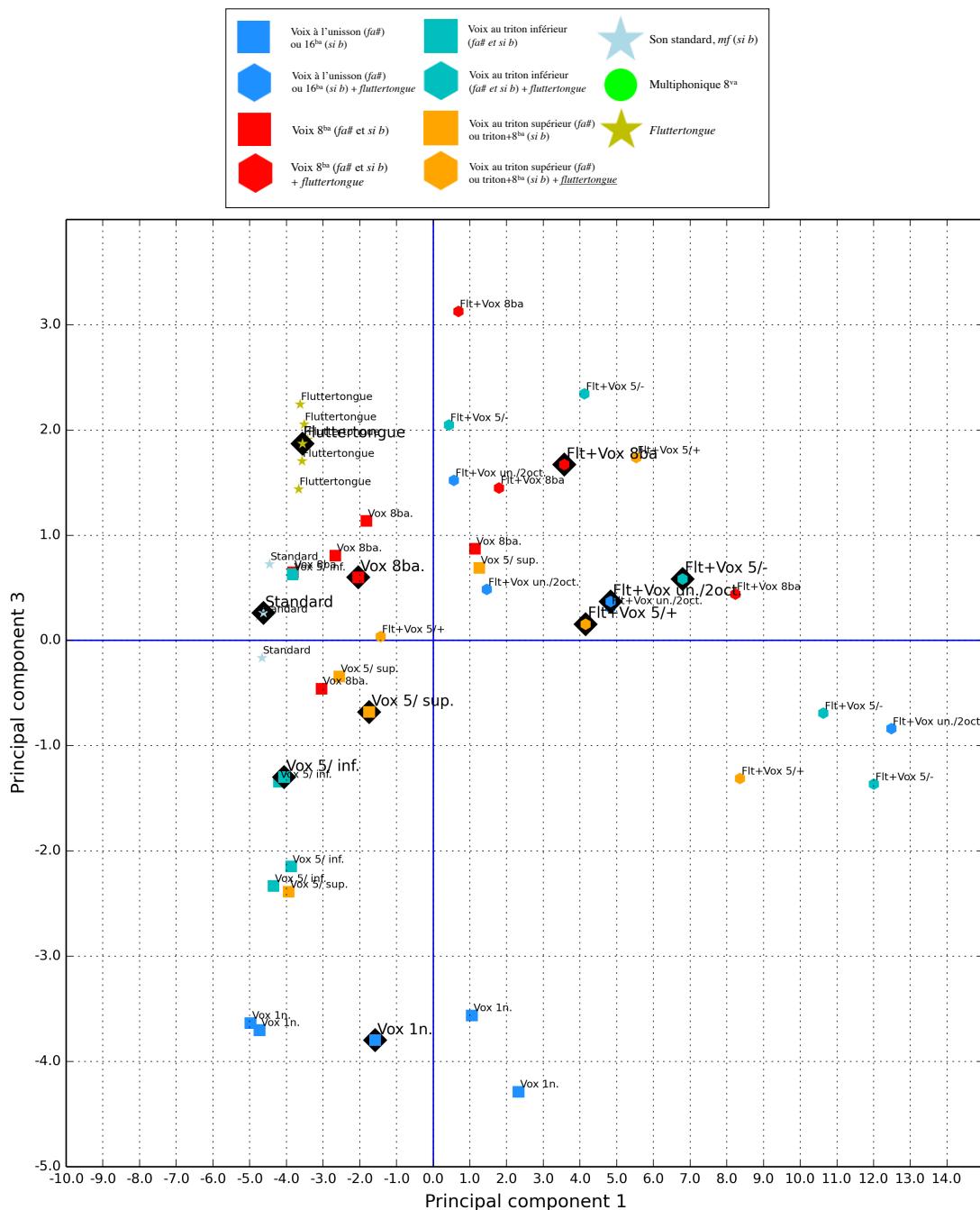


FIGURE 6.25 – Polyphonie et modulation (médiaum/aigu) - PCA dim. 1-3 – Un groupe de 10 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation, jouées sur *Si b* (936,57 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Les sons représentés sont les suivants : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

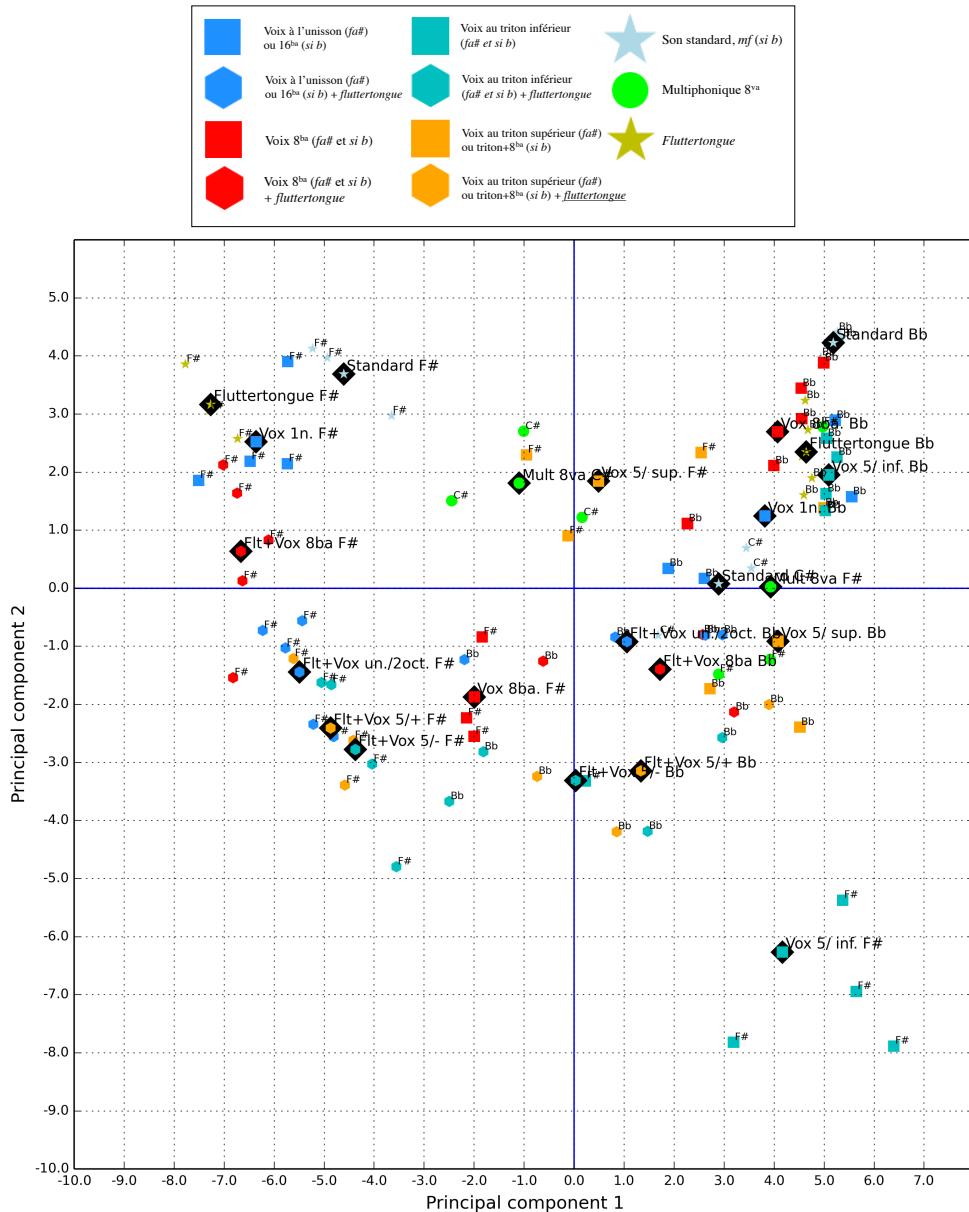


FIGURE 6.26 – Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 1-2 – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 2 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

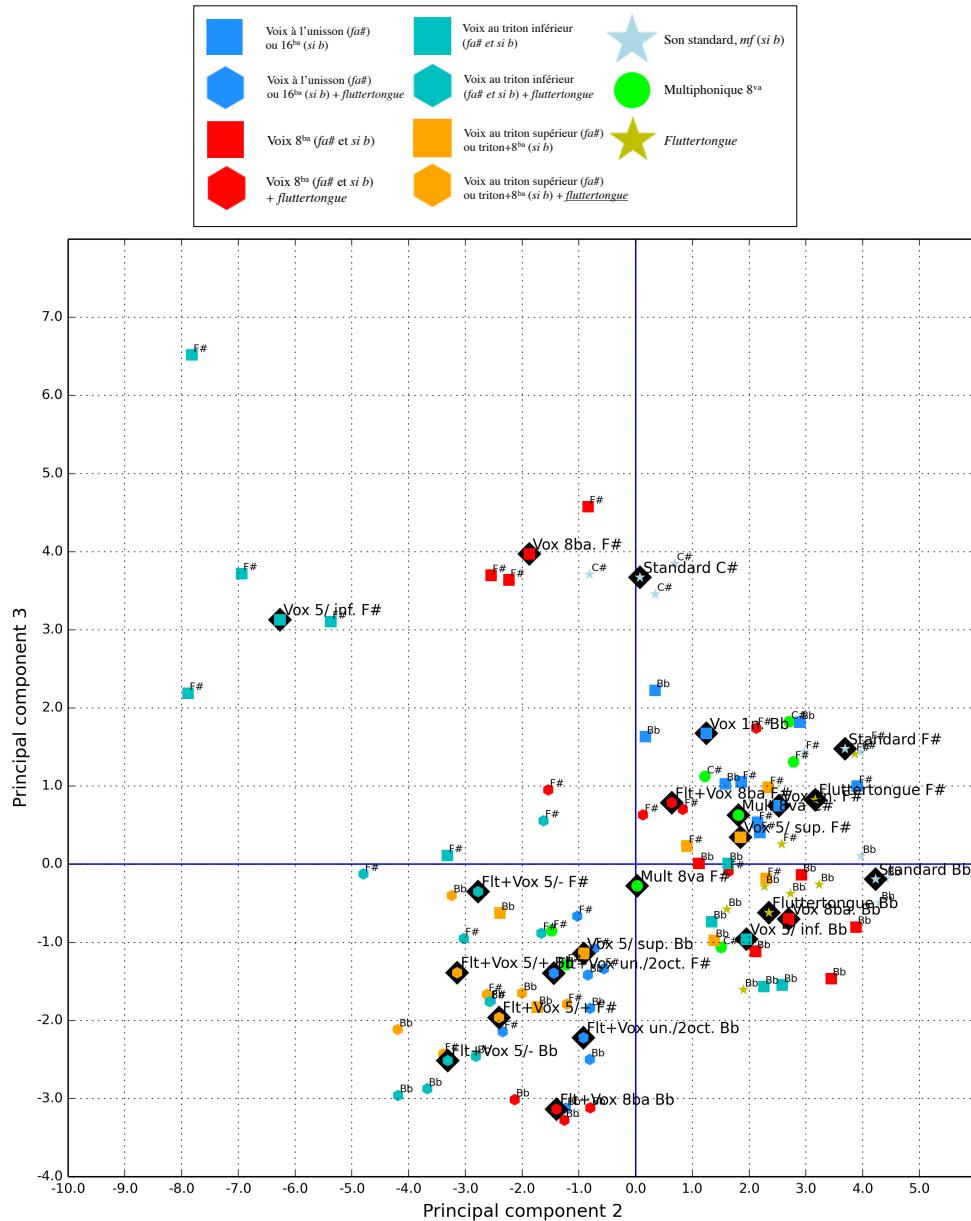


FIGURE 6.27 – Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 2-3 – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

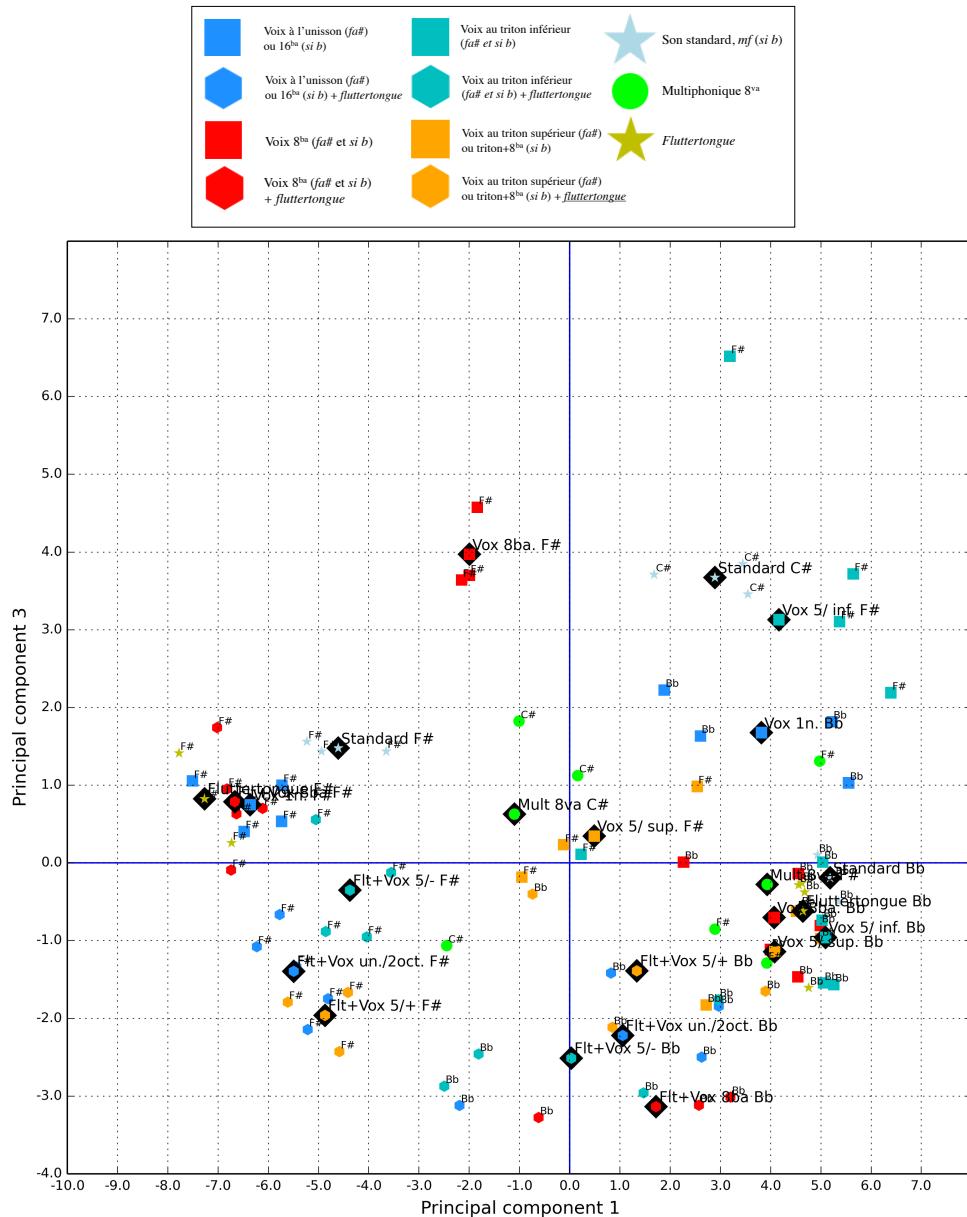


FIGURE 6.28 – Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 1-3 – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

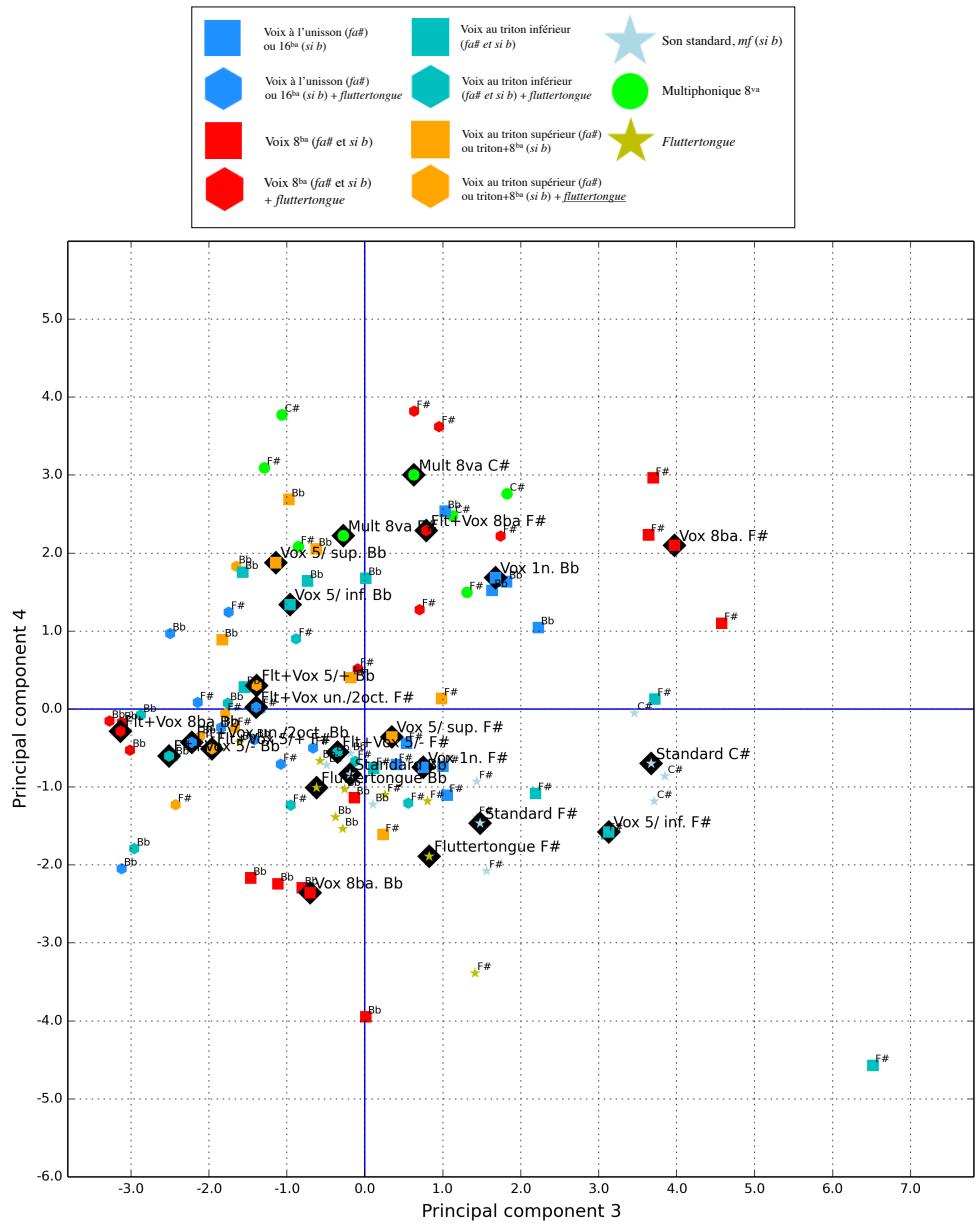


FIGURE 6.29 – Polyphonie et modulation (tous) - PCA dim. 3-4 – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel composé des dimensions 3 et 4 de l'analyse par composantes principales effectuée pour ce groupe. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. [Retour au texte : cliquez ici.](#)



FIGURE 6.30 – Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 1-2 – L’ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour l’ensemble des sons. Ici, seules les positions moyennes pour chaque type de son sont représentées, à l’intérieur d’un losange noir. Pour chaque catégorie, la note est indiquée et correspond soit au *Do#* (278,44 Hz), au *Fa#* (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). Retour au texte : cliquez [ici](#).

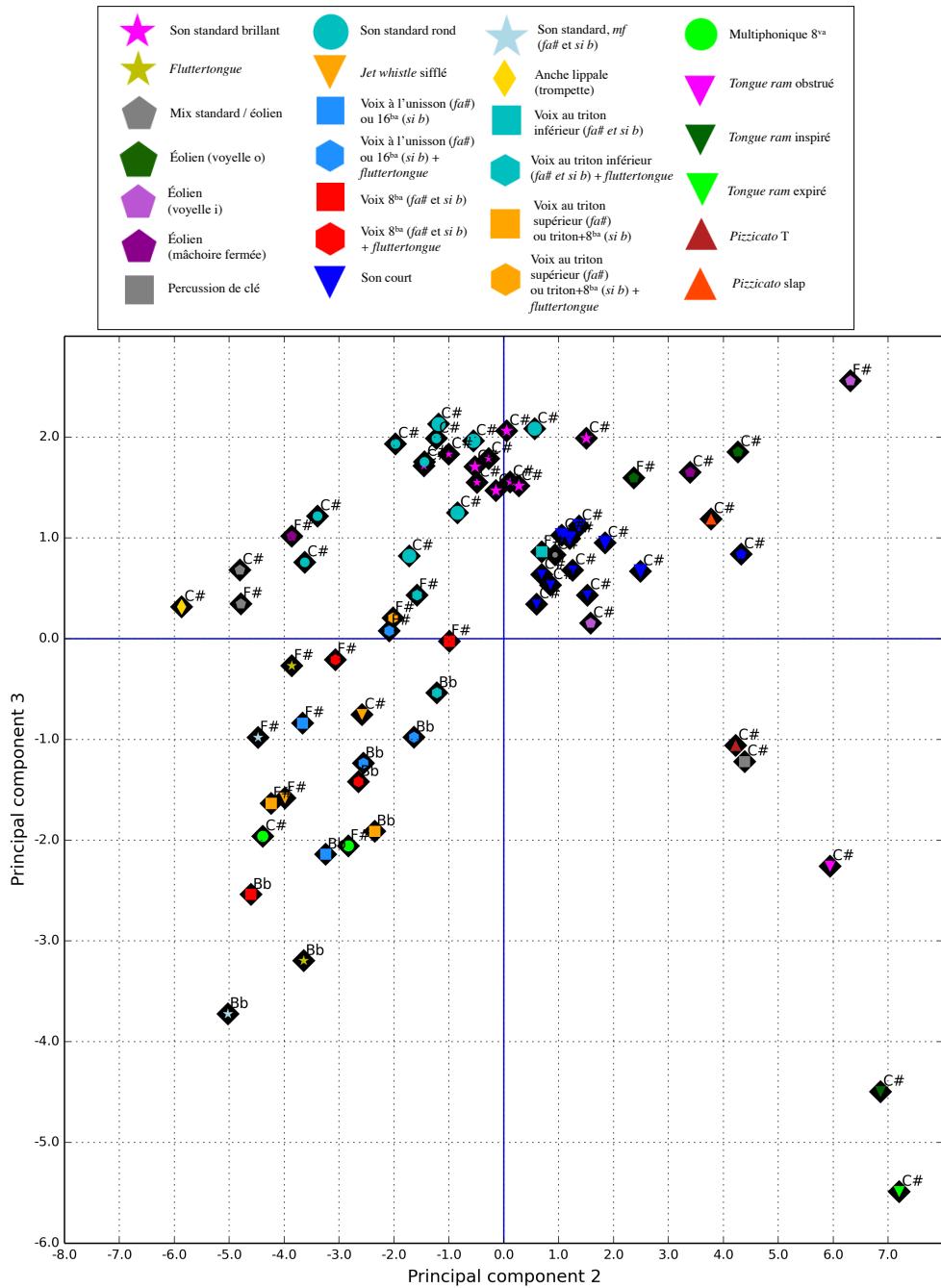


FIGURE 6.31 – Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 2-3 – L’ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 2 et 3 de l’analyse par composantes principales effectuée pour l’ensemble des sons. Ici, seules les positions moyennes pour chaque type de son sont représentées, à l’intérieur d’un losange noir. Pour chaque catégorie, la note est indiquée et correspond soit au *Do#* (278,44 Hz), au *Fa#* (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). Retour au texte : cliquez [ici](#).

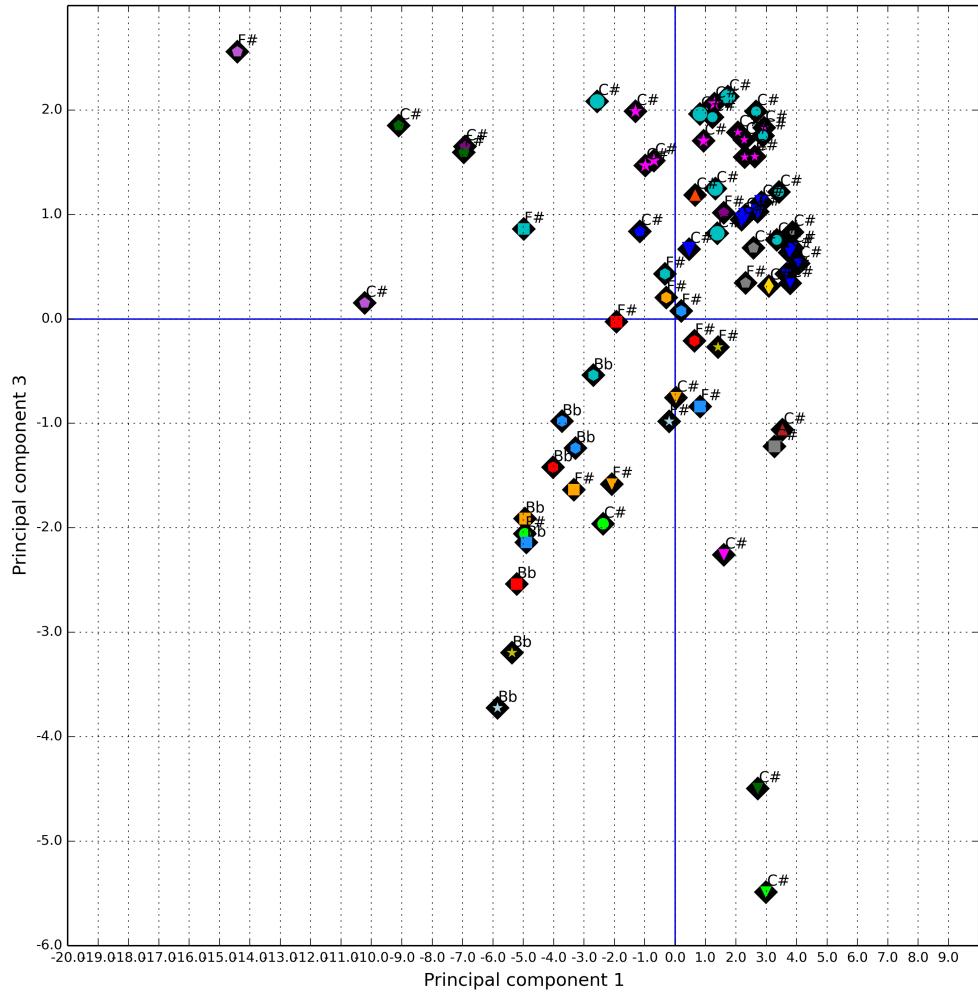
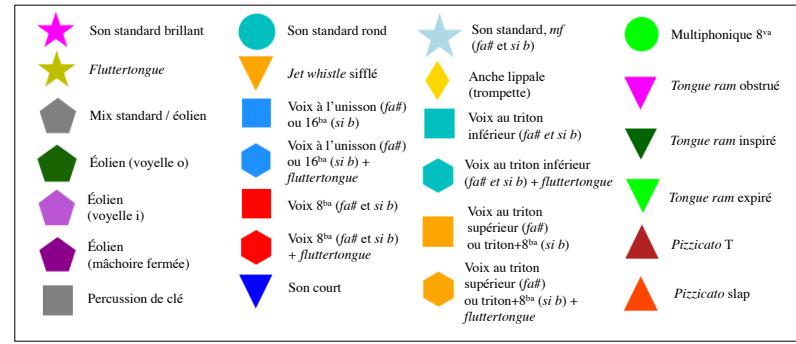


FIGURE 6.32 – Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 1-3 – L'ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour l'ensemble des sons. Ici, seules les positions moyennes pour chaque type de son sont représentées, à l'intérieur d'un losange noir. Pour chaque catégorie, la note est indiquée et correspond soit au *Do#* (278,44 Hz), au *Fa#* (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). Retour au texte : [cliquez ici](#).

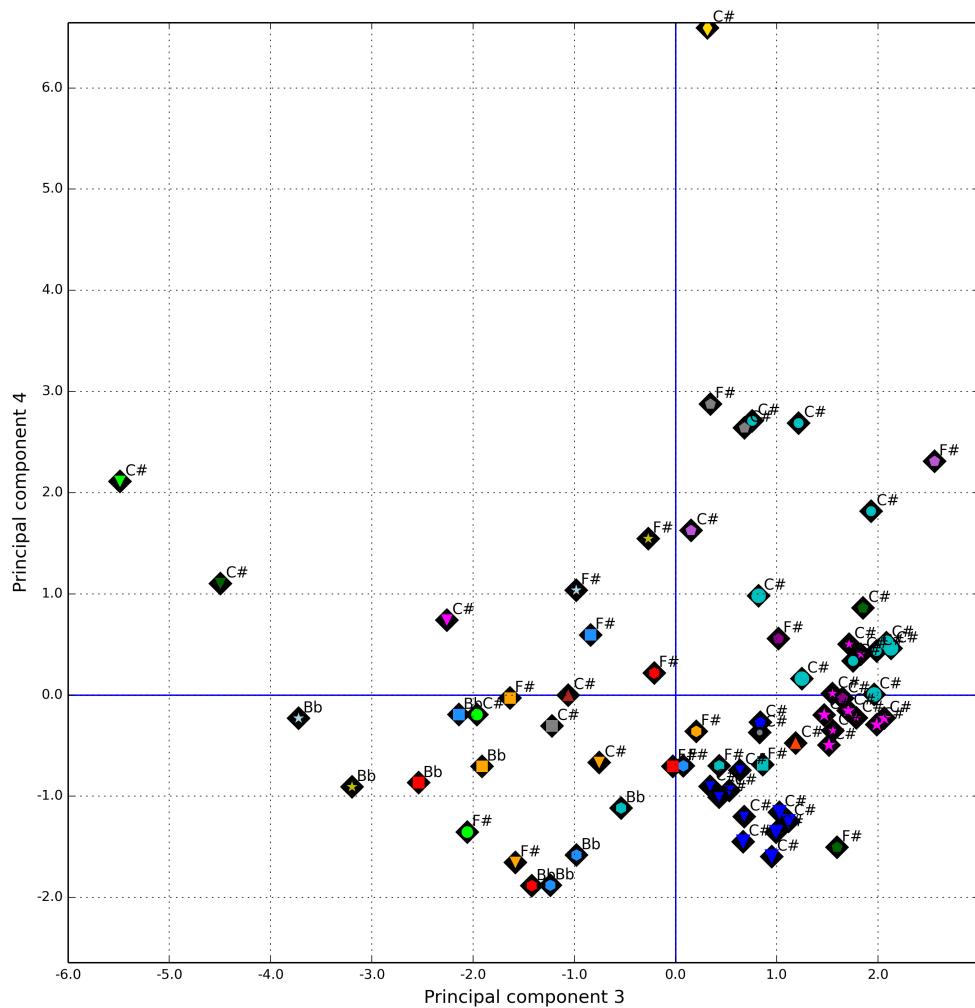
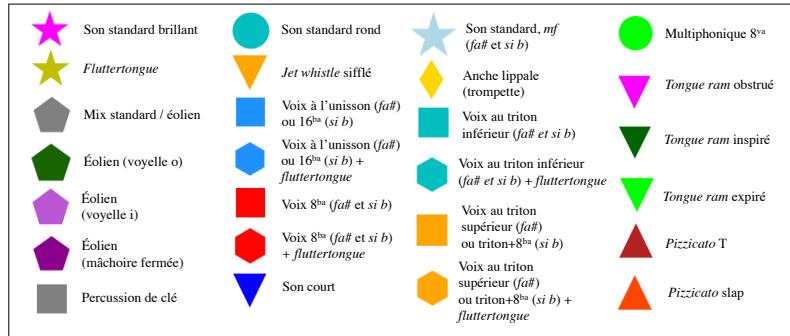


FIGURE 6.33 – Espace de timbres complet (moyennes) - PCA dim. 3-4 – L'ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 3 et 4 de l'analyse par composantes principales effectuée pour l'ensemble des sons. Ici, seules les positions moyennes pour chaque type de son sont représentées, à l'intérieur d'un losange noir. Pour chaque catégorie, la note est indiquée et correspond soit au *Dō*# (278,44 Hz), au *Fa*# (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). Retour au texte : cliquez [ici](#).

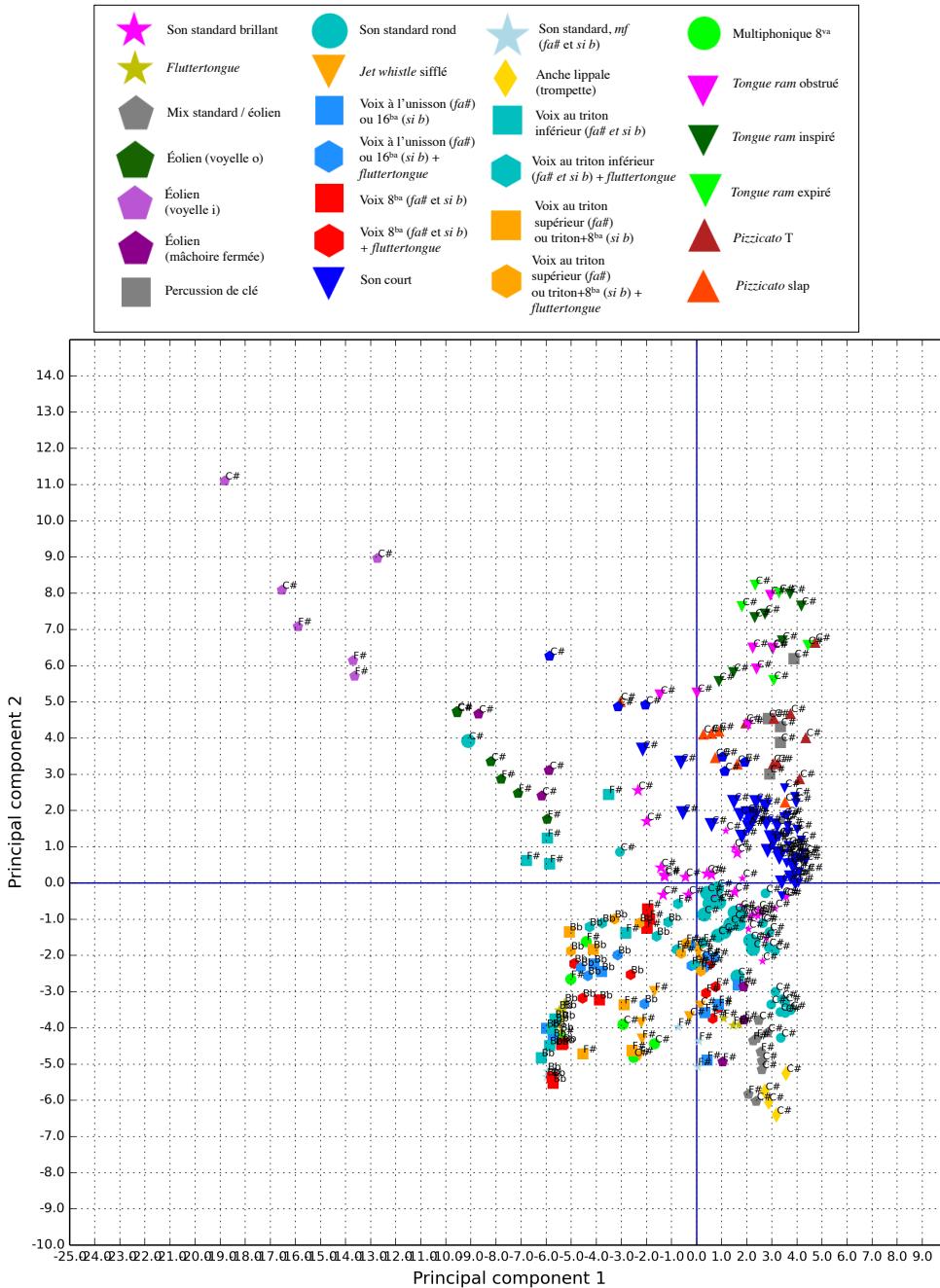


FIGURE 6.34 – Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 1-2 – L’ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 2 de l’analyse par composantes principales effectuée pour l’ensemble des sons. Ici, l’ensemble des instances de sons pour chaque type est représenté. Pour chacun des sons, la note est indiquée et correspond soit au *Dō*# (278,44 Hz), au *Fa*# (371,68 Hz) ou au *Si* b (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

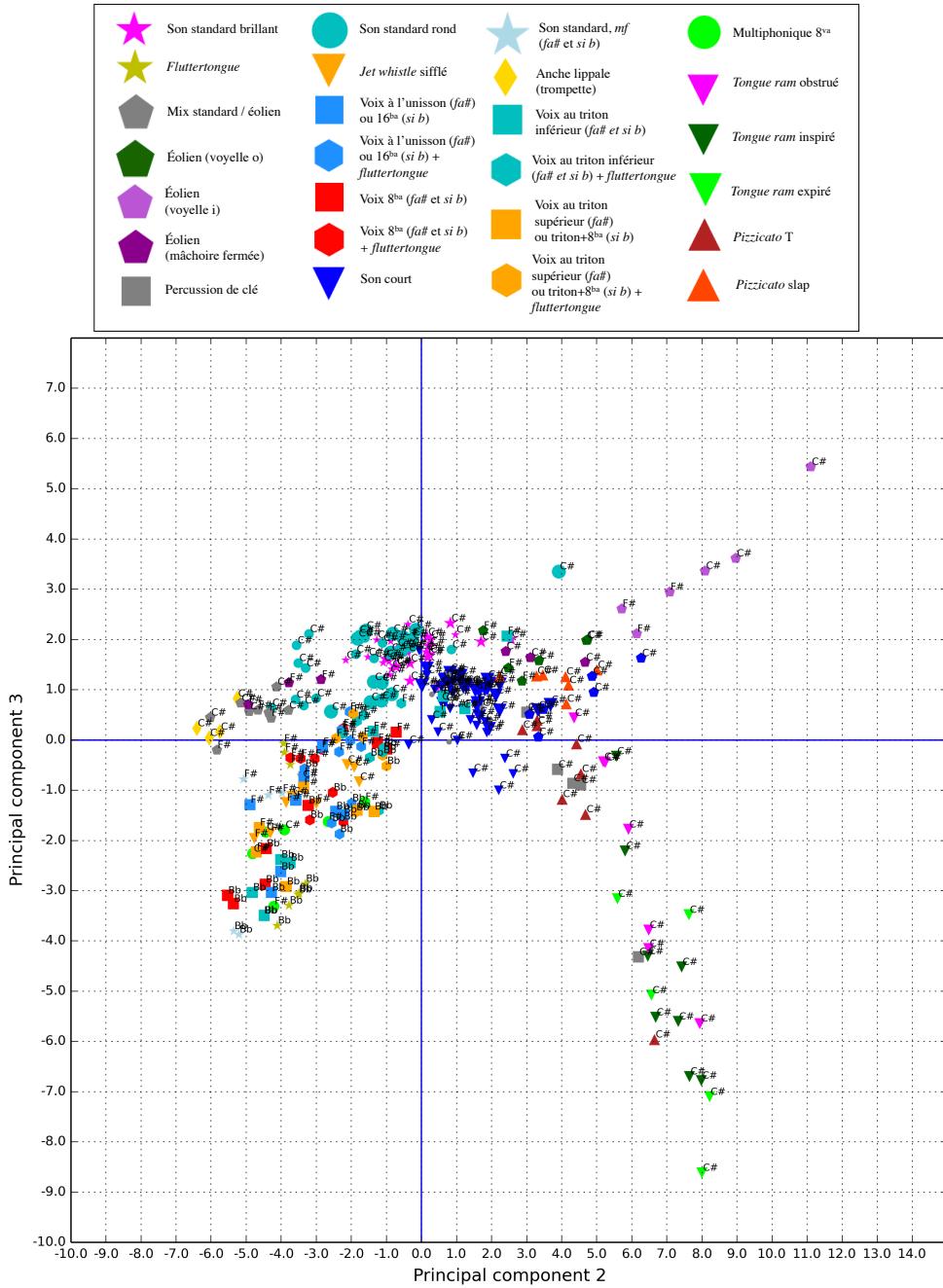


FIGURE 6.35 – Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 2-3 – L'ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 2 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour l'ensemble des sons. Ici, l'ensemble des instances de sons pour chaque type est représenté. Pour chacun des sons, la note est indiquée et correspond soit au *Do*# (278,44 Hz), au *Fa*# (371,68 Hz) ou au *Si* b (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

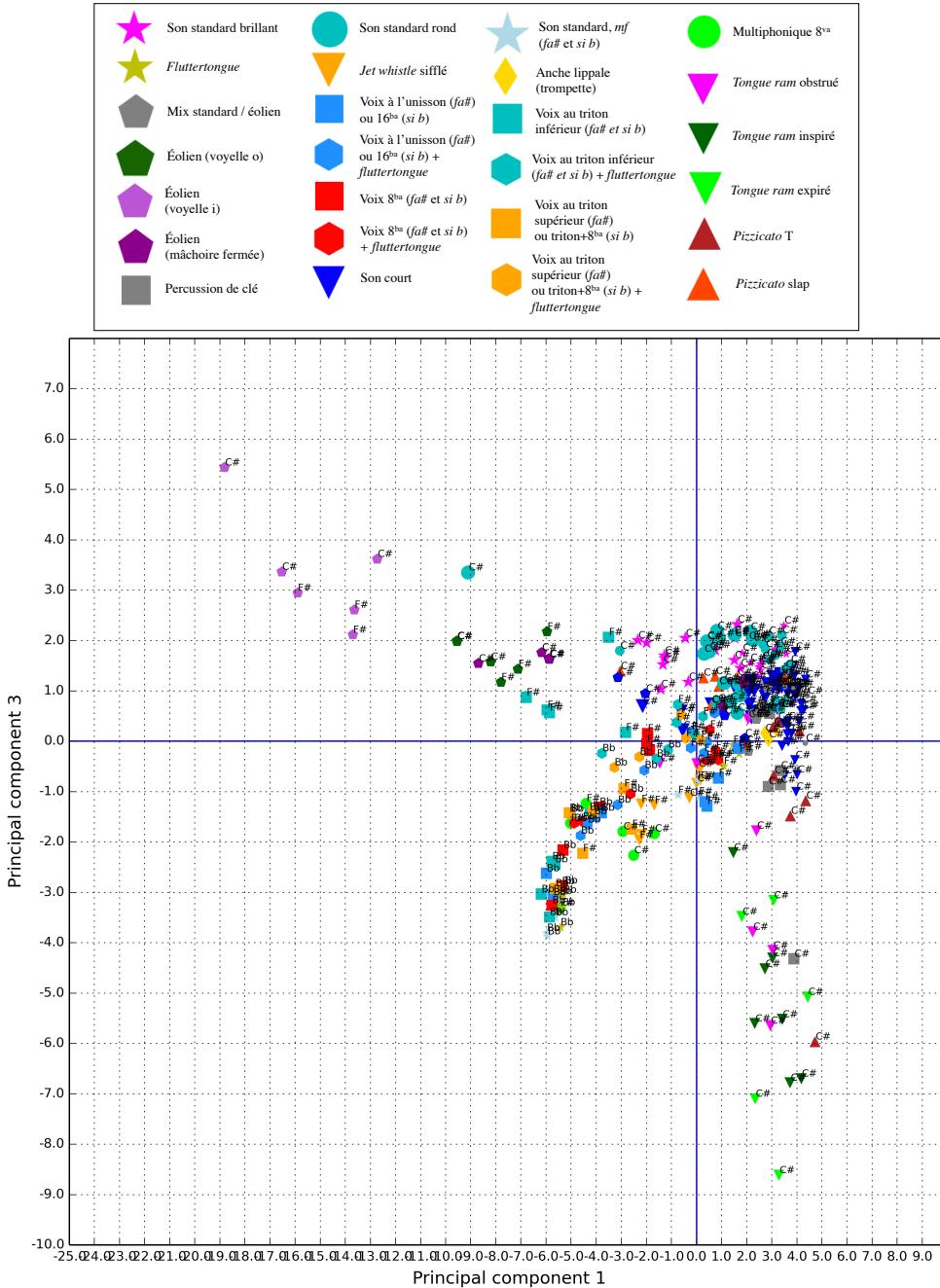


FIGURE 6.36 – Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 1-3 – L'ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 1 et 3 de l'analyse par composantes principales effectuée pour l'ensemble des sons. Ici, l'ensemble des instances de sons pour chaque type est représenté. Pour chacun des sons, la note est indiquée et correspond soit au *Do#* (278,44 Hz), au *Fa#* (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

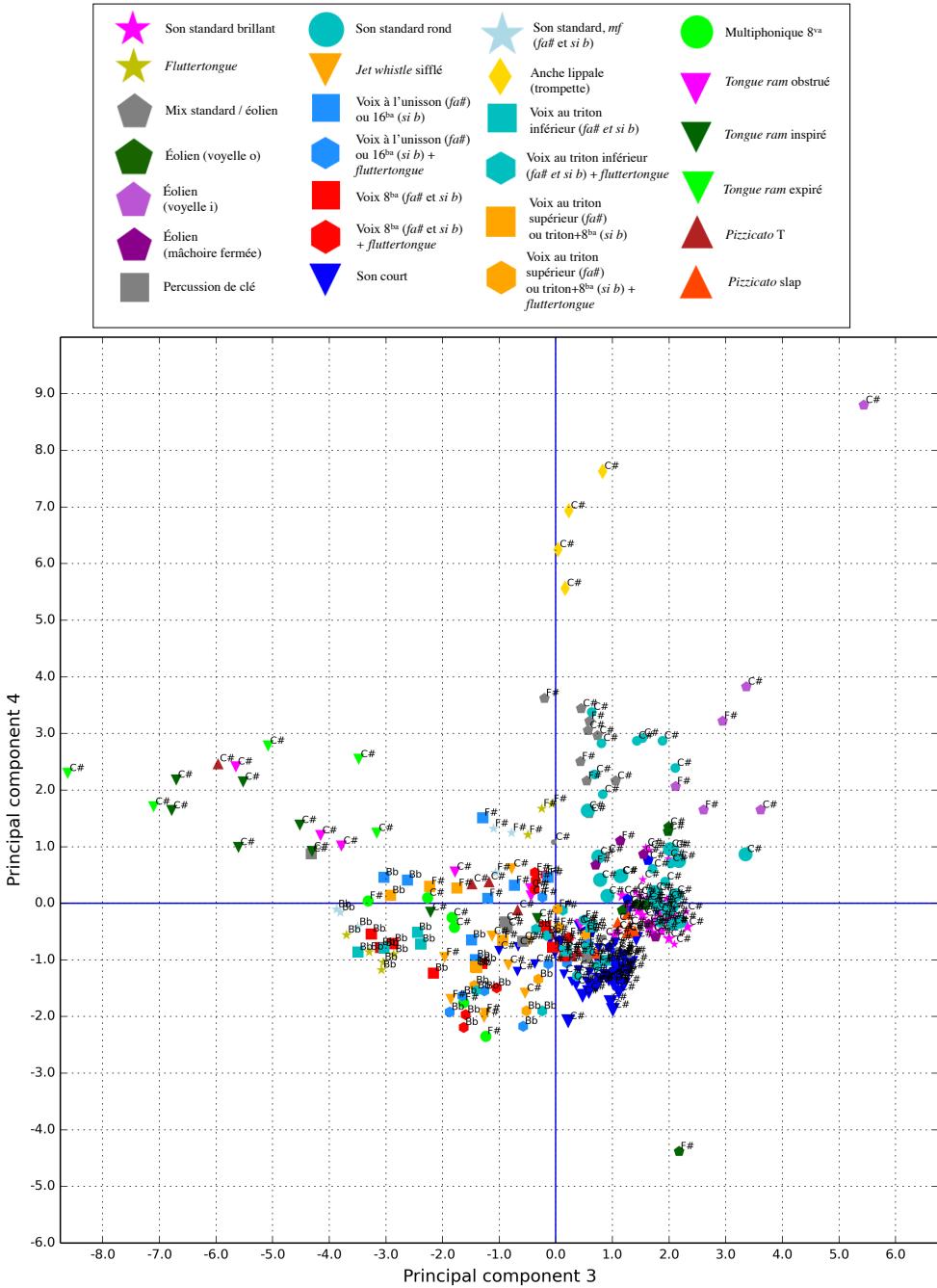


FIGURE 6.37 – Espace de timbres complet (tous) - PCA dim. 3-4 – L'ensemble des sons présentés dans ce chapitre (70 catégories) est représenté dans cet espace bidimensionnel formé des dimensions 3 et 4 de l'analyse par composantes principales effectuée pour l'ensemble des sons. Ici, l'ensemble des instances de sons pour chaque type est représenté. Pour chacun des sons, la note est indiquée et correspond soit au *Fa#* (278,44 Hz), au *Fa#* (371,68 Hz) ou au *Si b* (936,57 Hz). Retour au texte : cliquez [ici](#).

Chapitre 7

Aspects particuliers du timbre de la flûte traversière

Sommaire

1	Introduction	237
2	Méthodologie	238
3	Résultats des analyses particulières de descripteurs	242
4	Discussion	314
5	Conclusion	319

1 Introduction

Ce chapitre se veut un approfondissement de la réflexion amorcée à partir des résultats des expériences du chapitre précédent. Les analyses par composantes principales effectuées à partir des valeurs de descripteurs extraites pour chacun des groupes de sons ont fourni quelques indices concernant les dimensions acoustiques permettant de différencier les modes de jeu de la flûte. Ainsi, on pourra observer les caractéristiques propres aux descripteurs acoustiques de manière plus ciblée.

Ici, on a voulu examiner quatre aspects du timbre de la flûte de plus près. Il s'agit des propriétés de l'attaque, de la périodicité et de l'harmonicité du signal, des descripteurs spectraux

et du tristimulus, et enfin des descripteurs correspondant aux principales dimensions perceptives du timbre.

Champs d'expertise

- Acoustique musicale
- Informatique musicale
- *Music information retrieval*
- Psychoacoustique musicale

2 Méthodologie

2.1 Extraction et tri des descripteurs de timbre

Pour cette série d'expériences, nous avons utilisé les mêmes séries de sons que dans le chapitre précédent, étant donné que ces analyses ont pour but d'approfondir celles qui ont été effectuées précédemment. En guise de rappel, voici les groupes de sons qui seront réutilisés dans ce chapitre :

- **Groupe 1 : Sons à mode de production standard et à excitation continue (longs) sur *Do#*₄ (278,44 Hz).** Nuances dynamiques *forte* et *piano* et nuances de timbres *brillant* et *rond*.
- **Groupe 2 : Sons à mode de production standard et à excitation instantanée (courts) sur *Do#*₄.** Nuances dynamiques *forte* et *piano*, attaques sur les consonnes D, F, K, P et T.
- **Groupe 3 : Sons à mode de production standard, à excitation continue et instantanée (longs et courts) sur *Do#*₄.** Nuances dynamiques *forte* et *piano*, nuances de timbre *rond* et *brillant* (pour les sons longs seulement).
- **Groupe 4 : Sons à excitation continue (longs), tous modes de jeu.** Sons du groupe 1 (mode de production standard), aérophone à anche lippale (sons de trompette), *jet whistle* sifflé, sons mixtes standard/éoliens, multiphonique à l'octave (tous sur sur *Do#*₄), sons à mode de production sonore standard sur *Fa#*₄ (350,82 Hz) et *Si b*₅ (936,57 Hz), voix à

l'unisson (pour *Fa#*₄) ou à l'octave inférieure (pour *Si b*₅), sons éoliens sur *Do#*₄ et sur *Fa#*₄ avec voyelles I, O et avec la mâchoire fermée (en soufflant à travers les dents).

- **Groupe 5 :** Tous les sons du groupe 4 à l'exception des sons éoliens.
- **Groupe 6 : Sons à excitation instantanée (courts), tous modes de jeu.** Sons éoliens courts, sons mixtes standard/éoliens courts, sons du groupe 2 (sons à mode de production standard courts), percussions de clé, *pizzicati* en *slap* et attaque avec la consonne T, *tongue rams* avec inspiration, avec expiration et avec obstruction du trou de l'embouchure. Tous ces sons ont été joués sur le doigté du *Do#*₄ à l'exception des *tongue rams*. En raison du mode de jeu qui implique la fermeture du tube de l'instrument à une extrémité, la note résultante se situe environ une septième mineure plus bas que la note correspondant au doigté choisi. Les *tongue rams* ont donc été joués sur le doigté du *Si*₄.
- **Groupe 7 : Techniques percussives.** Les *pizzicati*, *tongue rams* et percussions de clé du groupe 6 ont été analysés séparément.
- **Groupe 10 : Techniques polyphoniques et de modulation, tous registres.** Sons des groupes 8 et 9, avec addition des sons brillants *forte* et des sons avec multiphonique à l'octave sur *Do#*₄.

2.2 Descripteurs acoustiques considérés dans l'analyse

Une série de descripteurs acoustiques – plus restreinte que pour les analyses par composantes principales – a ensuite été extraite de chacun des groupes de sons à l'aide de la Timbre Toolbox, dans l'environnement MATLAB.

Voici la liste des descripteurs extraits :

- Temps d'attaque (*Attack time*, TEE_Att)
- Temps de déclin (*Decay time*, TEE_Dec)
- Logarithme du temps d'attaque (TEE_LAT)
- Pente de l'attaque (*Attack slope*, TEE_AttSlope)
- Pente de décroissance (TEE_DecSlope)
- Valeur efficace (RMS) (TEE_RMSEnv)
- Taux de passage à zéro (*Zero-crossing rate*, AS_ZcrRate)
- Centroïde spectral (STFTpow_SpecCent)
- Étalement spectral (*Spectral spread*, STFTpow_SpecSpread)
- Asymétrie spectrale (*Spectral skewness*, STFTpow_SpecSkew)
- Aplatissement spectral (*Spectral kurtosis*, STFTpow_SpecKurt)

- Allure de la pente spectrale (*Spectral slope*, STFTpow_Slope)
- Décroissance spectrale (*Spectral decrease*, STFTpow_SpecDecr)
- Roulement spectral (*Spectral roll-off*, STFTpow_SpecRollOff)
- Flux spectral (*Spectral flux*, STFTpow_SpecVar)
- Aspect plat du spectre (*Spectral flatness*, STFTpow_SpecFlat)
- Rapport bruit/énergie totale (Harmonic_Noisiness)
- Inharmonicité (Harmonic_InHarm)
- Tristimulus (Harmonic_TriStim1, Harmonic_TriStim2, Harmonic_TriStim3)
- Déviation harmonique/irrégularité spectrale (Harmonic_HarmDev)

Puis, selon les besoins, ces descripteurs ont été mis en relation afin d'extraire des représentations graphiques spécifiques aux analyses de données souhaitées. Il est à noter que les valeurs obtenues lors de l'extraction des descripteurs ont été normalisées grâce à la fonction `zscore`, afin d'uniformiser les échelles et ainsi, de faciliter la compréhension des relations entre les différentes dimensions représentées.

2.3 Implémentation dans MATLAB

Les analyses ont été réalisées grâce à une implémentation en trois scripts des procédés mentionnés plus haut dans l'environnement MATLAB¹.

Le premier script, adapté de la fonction `Gtimbredescriptor.m` fournie avec la Timbre Toolbox, effectue l'extraction des descripteurs acoustiques. Le deuxième calcule le nombre de conditions différentes testées, identifie les descripteurs extraits, crée une matrice contenant les valeurs de descripteurs extraites pour chaque fichier son, puis effectue un tri des descripteurs pour ne garder que ceux qui sont mentionnés plus haut.

Le troisième script, enfin, convertit les variables de l'environnement MATLAB de manière à en sauvegarder le contenu dans des fichiers en format texte. Ces derniers seront utilisées pour obtenir les représentations graphiques permettant l'analyse, grâce à la librairie Matplotlib (Hunter 2007), version 2.0.2.

2.4 Mise en relation de descripteurs du timbre pour chaque condition d'analyse

Voici les descripteurs du timbre qui seront mis en relation pour chacune des expériences.

¹MATLAB R2015a, version 8.5.0.197613, sur Mac OS 10.11.6.

2.4.1 Évaluation des propriétés de l'attaque (2D)

- Temps d'attaque – Temps de déclin
- Temps d'attaque – Pente de l'attaque
- Temps d'attaque – Irrégularité spectrale
- Temps d'attaque – Flux spectral

2.4.2 Périodicité et harmonicité du signal (2D)

- Taux de passage à zéro – Rapport bruit/énergie totale
- Taux de passage à zéro – Inharmonicité

2.4.3 Mise en relation de descripteurs spectraux (2D) et tristimulus (3D)

- Centroïde - Étalement spectral
- Centroïde - Asymétrie spectrale
- Centroïde - Roulement spectral
- Centroïde - Aplatissement spectral
- Centroïde - Aspect plat du spectre
- Centroïde - Flux spectral
- Centroïde - Pente spectrale
- Aspect plat du spectre - Roulement spectral
- Pente spectrale - Irrégularité spectrale
- Pente spectrale - Décroissance spectrale
- Tristimulus 1 - Tristimulus 2 - Tristimulus 3 (espace tridimensionnel)

2.4.4 Dimensions perceptives du timbre (3D)

- Temps d'attaque - Centroïde spectral - Flux spectral
- Temps d'attaque - Centroïde spectral - Irrégularité spectrale

3 Résultats des analyses particulières de descripteurs

Dans la section précédente, on a pu constater que l'analyse par composantes principales a fourni une quantité importante d'informations sur le timbre de la flûte traversière et sur les dimensions qui permettent de faire la distinction entre plusieurs groupes de sons. Il nous a toutefois paru pertinent de nous attarder à certains aspects particuliers du timbre. On présentera donc dans cette section des observations en lien avec les propriétés de l'attaque, la périodicité et l'harmonicité du timbre, ainsi qu'avec les propriétés spectrales de celui-ci. La présentation des résultats se terminera par une mise en relation des descripteurs qui correspondent aux principales dimensions perceptives du timbre, soit le temps d'attaque, le centroïde spectral, le flux spectral et le degré d'irrégularité du spectre.

3.1 Évaluation des propriétés de l'attaque

Saldanha et Corso (1964²) ont démontré que l'identification de timbres instrumentaux diminuait significativement lorsque les transitoires d'attaque étaient coupés et ce, particulièrement dans le cas des sons joués sans vibrato. Il convient donc d'examiner le phénomène des transitoires d'attaque propres au timbre de la flûte traversière de plus près. Afin d'observer les caractéristiques de différents types d'attaques, on a isolé le temps d'attaque, le temps de déclin (*decay*) et la pente de l'attaque pour les mettre en relation les uns avec les autres. Les sons longs et courts obtenus grâce à un mode de production standard seront comparés, puis on se penchera sur l'ensemble des sons à excitation instantanée ainsi que sur les techniques percussives. Dans le cas de la comparaison entre les sons longs et les sons courts, on considérera également le rôle du flux spectral et du degré d'irrégularité du spectre (ou déviation harmonique).

3.1.1 Mode de production sonore standard

Sons standard longs : influence de la brillance et de la dynamique

Les sons brillants tendent à avoir un temps d'attaque plus long que les sons ronds, et c'est la pente de l'attaque qui distingue les sons brillants *forte* des sons brillants *piano* (la valeur est moins élevée pour les premiers que pour les seconds). Par contre, les sons brillants *piano* semblent avoir

²SALDANHA, E.L. et J.F. CORSO (1964). « Timbre cues and the identification of musical instruments. » *Journal of the Acoustical Society of America*, 36, p. 2021-2126, cité dans McAdams 2013, p. 47.

un temps de déclin plus réduit que les sons brillants *forte*. Dans le cas des deux descripteurs, il n'est pas possible de noter une différence significative entre les deux dynamiques du côté des sons ronds (Cf. figures 7.1 pour la mise en relation du temps d'attaque et de la pente de l'attaque, et 7.2 pour celle du temps d'attaque et du temps de déclin). Enfin, si on jette un coup d'œil du côté du flux spectral, on constate que les valeurs pour ce descripteur distribuent les sons en trois groupes et ce, de manière beaucoup plus claire que les autres descripteurs relatifs à l'attaque pourraient le faire. D'abord, les sons ronds *piano* se tiennent à l'extrême minimale de l'axe des ordonnées (déterminé par les valeurs du flux spectral), puis vient ensuite le groupe formé des sons ronds *forte* et des sons brillants *piano*. Finalement, les sons brillants *forte* forment un groupe plus diffus à l'extrême maximale de l'axe (Cf. figure 7.3 pour la mise en relation du temps d'attaque et du flux spectral).

Sons standard courts

On peut examiner les sons courts obtenus avec un mode de production standard dans le but de déterminer les propriétés d'une attaque avec différentes consonnes, en l'occurrence avec les consonnes *D*, *F*, *K*, *P* et *T*. Lorsqu'on considère le temps d'attaque, la première chose que l'on remarque est que celui-ci est systématiquement plus élevé pour la consonne *F*, étant donné l'absence d'occlusion dans l'émission du son. La consonne *K* en nuance *piano* semble aussi ralentir l'attaque.

Par contre, en nuance *forte*, la consonne *K* semble présenter le temps de déclin le plus court. Cela dit, le temps de déclin permet surtout de distinguer la nuance *forte* de la nuance *piano*, le temps étant plus court pour le *forte*. En ordre croissant, les consonnes apparaissent ainsi : *K*, *F*, *D*, *P* et *T*. Toutefois les sons joués en nuance *forte* obtiennent des valeurs plus élevées pour la pente de l'attaque, ce qui s'explique facilement par la plus grande variation d'amplitude que l'on observe. Pour la pente de l'attaque, les consonnes apparaissent dans l'ordre suivant : *P*, *F*, *D*, *T* et *K* (Cf. figures 7.4 pour la mise en relation du temps d'attaque et de la pente de l'attaque, et 7.5 pour celle du temps d'attaque et du temps de déclin).

Sons standard longs et courts

Lorsque l'on compare les sons longs et les sons courts, les résultats quant au temps d'attaque sont sensiblement les mêmes. Autrement dit, le fait de jouer long ou court ne semble pas influencer le temps d'attaque de façon significative. Par contre, les sons brillants en nuance *piano* semblent avoir un temps d'attaque moyen légèrement plus élevé que les autres groupes de sons. Ensuite, la nuance de timbre semble affecter le temps de déclin : les sons ronds en nuance *forte* obtiennent dans l'ensemble le temps de déclin le plus élevé, à l'exception des sons articulés avec la consonne *T*. Ici non plus, la longueur du son n'affecte pas ce descripteur de façon significative, dans une direction ou dans l'autre (Cf. figure 7.6 pour la mise en relation du temps d'attaque et du temps de déclin).

La pente de l'attaque est le descripteur qui permet de distinguer les sons longs des sons courts : ces derniers ont en général une pente d'attaque plus élevée que les sons longs. Parmi les sons courts, ceux articulés avec la consonne *K* en nuance *forte* se détachent des autres. De plus, les sons articulés avec les consonnes *F*, *P* et *K* obtiennent une valeur plus élevée pour la pente de l'attaque que ceux articulés avec *T* et *D* (Cf. figure 7.7 pour la mise en relation du temps d'attaque et de la pente de l'attaque).

Finalement, lorsque l'on s'attarde aux transitoires d'attaque, il est également pertinent de considérer le flux spectral et la déviation harmonique (ou degré d'irrégularité du spectre). Les sons brillants et courts (surtout en nuance *forte*) ont un flux spectral généralement plus élevé que les sons ronds, probablement à cause d'une plus grande quantité d'énergie dans les harmoniques de rang plus élevé. Les consonnes *K* et *F* ont un flux spectral relativement plus élevé que les autres ; pour ces dernières (*D*, *T*, *P*), l'occlusion se produit plus près de l'embouchure. Cela se traduit, dans le cas du *K* et du *F*, par plus de variation dans les intensités relatives des harmoniques au cours du temps (Cf. figure 7.8 pour la mise en relation du temps d'attaque et du flux spectral).

Quant au degré d'irrégularité du spectre, ce descripteur sépare les sons en trois groupes distincts : sons courts, sons longs brillants et sons longs ronds. La nuance de timbre influence donc ce descripteur ; toutefois, en ce qui le concerne, il n'est pas vraiment possible de se prononcer sur le rôle de la consonne dans l'attaque. L'irrégularité spectrale semble donc être plus liée à une qualité générale du timbre qu'à l'attaque en tant que telle (Cf. figure 7.9 pour la mise en relation

du temps d'attaque et de l'irrégularité spectrale).

3.1.2 Sons à excitation instantanée

Tous les sons courts

Comme on pouvait s'y attendre, le temps d'attaque des sons obtenus à partir de techniques percussives (*pizzicati*, *tongue rams* et percussions de clé) est moins élevé que pour les sons impliquant l'usage du souffle. Cela dit, en comparaison avec les sons obtenus avec un mode de production sonore standard et avec les mélanges entre sons éoliens et sons standard, les sons éoliens, même courts, ont un temps d'attaque relativement court. Dans le cas de cette analyse, la pente de l'attaque semble être plus ou moins inversement proportionnelle au temps d'attaque. Ce descripteur divise également les sons analysés en trois groupes : les techniques percussives génèrent la pente d'attaque la plus élevée ; viennent ensuite les sons éoliens avec une pente un peu moins élevée, et enfin le groupe formé par les sons standard et les sons mixtes éolien/standard, qui ont la pente d'attaque la moins élevée (Cf. figure 7.10 pour la mise en relation du temps d'attaque et de la pente de l'attaque).

À l'observation du temps de déclin (*decay*) mis en relation avec le temps d'attaque, on observe plutôt le contraire. Toutes proportions gardées, le temps de déclin suit le temps d'attaque. Le temps de déclin des sons appartenant au groupe des techniques percussives est le plus court ; le groupe des sons éoliens génère un temps de déclin médian, et enfin les sons standard et les mélanges standard-éoliens génèrent les temps de déclin les plus longs (Cf. figure 7.11 pour la mise en relation du temps d'attaque et du temps de déclin).

Si l'on considère le flux spectral, on constate d'une part que les *tongue rams* génèrent un flux spectral plus élevé que l'ensemble des autres modes de production sonore. Le flux spectral des *pizzicati* et des percussions de clé semble aussi être légèrement plus élevé que pour les sons produits avec du souffle (Cf. figure 7.12 pour la mise en relation du temps d'attaque et du flux spectral). Par ailleurs, ces derniers (sons standard, éoliens et intermédiaires) génèrent une irrégularité spectrale plus élevée que l'ensemble des techniques percussives (Cf. figure 7.13 pour la mise en relation du temps d'attaque et de l'irrégularité spectrale).

Techniques percussives seulement

En isolant les techniques percussives pour les examiner de plus près, on constate que le temps d'attaque de l'ensemble des *tongue rams* est plus élevé que celui des *pizzicati* et percussions de clés. La pente de l'attaque permet de distinguer les sous-groupes de sons : du côté des *pizzicati*, l'attaque en *T* génère une pente d'attaque plus réduite que la technique du *slap*, et le sous-groupe des percussions de clé occupe une position intermédiaire entre les deux. Du côté des *tongue rams*, la pente de l'attaque moyenne semble légèrement plus élevée pour le sous-groupe formé des *tongue rams* inspirés, par rapport aux deux autres types (expirés et avec obstruction du trou de l'embouchure) (Cf. figure 7.14 pour la mise en relation du temps d'attaque et de la pente de l'attaque).

Le temps de déclin inverse l'ordre entre les sous-groupes de sons. Les *pizzicati* avec *slap* obtiennent le temps de déclin le plus court, suivis par les percussions de clés et enfin par les *pizzicati* avec attaque en *T*. Du côté des *tongue rams*, l'obstruction du trou de l'embouchure génère un temps de déclin plus long que pour les deux autres sous-groupes (*tongue rams* inspirés et expirés). Ceux-ci sont malheureusement difficiles à comparer entre eux en ce qui concerne le temps de déclin, étant donné un manque de constance relatif entre les sons enregistrés (Cf. figure 7.15 pour la mise en relation du temps d'attaque et du temps de déclin).

Enfin, les valeurs obtenues pour le flux spectral et l'irrégularité spectrale sont en général plus élevées pour les *tongue ram* que pour les autres techniques percussives (Cf. figures 7.16 pour la mise en relation du temps d'attaque et du flux spectral, et 7.17 pour celle du temps d'attaque et de l'irrégularité spectrale).

3.2 Périodicité et harmonicité du signal

Lorsque l'on considère l'ensemble des techniques étendues de la flûte traversière, on peut s'attendre à se trouver devant un ensemble de sons s'éloignant de façon plus ou moins marquée de l'identité timbrale standard de la flûte. Les sons produits à l'aide de ces techniques peuvent être plus ou moins bruités et ils sont, la plupart du temps, aisément identifiables à l'écoute. Mais il peut être difficile de dire en quoi leur caractère bruité se définit. C'est pourquoi des descripteurs comme le taux de passage à zéro, le rapport bruit/énergie totale et l'inharmonicité seront mis

en relation dans cette section. Trois groupes de sons seront examinés : l'ensemble des timbres à excitation continue, l'ensemble des timbres à excitation instantanée et enfin, les techniques polyphoniques et de modulation.

3.2.1 Timbres à excitation continue

Pour les timbres à excitation continue, les sons éoliens se distinguent clairement par un taux de passage à zéro plus élevé que pour les autres groupes de sons. Leur rapport bruit/énergie totale est également beaucoup plus élevé que pour les autres sons, à l'exception du *jet whistle* sifflé, qui obtient le rapport bruit/énergie totale le plus élevé (sans toutefois avoir un taux de passage à zéro particulièrement élevé) (Cf. figure 7.18 ; la figure 7.19 montre l'ensemble des groupes sans les sons éoliens).

Ce sont également les sons éoliens qui ont l'inharmonicité la plus élevée (Cf. Figure 7.20). Ici, une représentation de l'ensemble des timbres à excitation continue sans les sons éoliens est utile afin d'y voir plus clair. Les sons standard sur *Fa*#₄ et *Si b*₅ ainsi que les sons produits à partir de ces notes avec usage de la voix à l'unisson ou à l'octave inférieure sont ceux dont le spectre se rapproche le plus d'un spectre harmonique parfait. Les sons les plus inharmoniques, selon ces résultats, sont les mélanges éoliens/standard et les sons brillants sur *Do*#₄. Viennent ensuite les sons ronds joués sur *Do*#₄, les multiphoniques à l'octave, les *jet whistle* et les sons de trompette, qui occupent une position intermédiaire dans le graphique et entre lesquels il n'y a pas de différence majeure en ce qui concerne ce descripteur (Cf. Figure 7.21 pour visualiser l'inharmonicité relative des sons, sans les sons éoliens).

3.2.2 Timbres à excitation instantanée

Du côté des sons courts, les sons éoliens obtiennent encore une fois un taux de passage à zéro plus élevé que les autres groupes de sons, mais ce sont les *tongue rams* (inspirés et expirés) qui obtiennent le rapport bruit/énergie totale le plus élevé, suivis des *tongue rams* avec obstruction, des percussions de clés, des *pizzicati* en *slap*, des *pizzicati* en *T*, des sons standard courts et enfin des sons mixtes standard/éoliens, en ordre décroissant (Cf. figure 7.22 pour la mise en rapport du taux de passage à zéro et du rapport bruit/énergie totale).

3.2.3 Techniques polyphoniques et de modulation

En ce qui concerne les techniques impliquant l'usage de la voix, du *fluttermouth* ou des multiphoniques à l'octave, ce sont les sons avec usage de la voix au triton inférieur sur *Fa#4* qui génèrent le taux de passage à zéro le plus élevé. Ensuite, en ordre décroissant, on retrouve la plupart des sons joués sur *Si b5*; il est logique que le registre médium/aigu produise un taux de passage à zéro plus élevé que le registre grave, en raison de la fréquence plus élevée. Cependant, les sons joués sur *Do#4*, plus graves que ceux joués sur *Fa#4*, obtiennent un taux de passage à zéro plus élevé que ces derniers.

De plus, la différence entre les différentes catégories de sons joués dans le registre grave est plus marquée que pour ceux joués dans le registre médium/aigu. Ainsi, parmi les sons joués sur *Fa#4*, l'usage de la voix au triton ou de la multiphonique à l'octave tend à faire augmenter le taux de passage à zéro par rapport à l'utilisation de la voix à l'octave et du *fluttermouth* seul (Cf. figure 7.23 pour la mise en rapport du taux de passage à zéro et du rapport bruit/énergie totale).

Lorsque l'on regarde du côté de l'inharmonicité, on constate que l'usage de la voix à distance d'une ou deux octaves de la fondamentale la fait en général augmenter par rapport aux autres groupes de sons. Cela s'explique par le fait que ce mode de jeu entraîne la juxtaposition deux spectres harmoniques (voix et flûte) qui ne sont jamais exactement réglés sur un rapport d'octave (2 :1) exact. La combinaison des partiels résultants augmente ainsi l'inharmonicité du spectre (Cf. figure 7.24 pour la mise en rapport du taux de passage à zéro et de l'inharmonicité).

3.3 Mise en relation de descripteurs spectraux et tristimulus

Cette partie des analyses sera consacrée à trois groupes de sons à excitation continue : les sons brillants et ronds longs (mode de production standard), l'ensemble des timbres à excitation continue, ainsi que les sons obtenus à partir de techniques polyphoniques ou de modulation. On s'attardera aux caractéristiques spectrales de ces groupes de sons.

3.3.1 Mode de production sonore standard, excitation continue

Il convient ici de rappeler que deux nuances de timbres distinctes – rond et brillant – ont été enregistrées pour ces analyses, en nuance *piano* et en nuance *forte*. On a pu constater dans les

résultats de l'analyse par composantes principales que la brillance du son jouait effectivement un rôle dans la distinction entre les différents groupes enregistrés. Cependant, qu'en est-il des corrélations entre les descripteurs spectraux individuels ?

Premièrement, on remarque à l'observation des trois coefficients du tristimulus que la répartition de l'énergie du spectre se déplace vers les aigus lorsqu'on augmente la nuance dynamique (passage de *piano* à *forte*), et lorsqu'on augmente la brillance (passage de rond à brillant) (Cf. figure 7.25). Ensuite, si l'on met le centroïde en relation avec le flux spectral, l'aspect plat du spectre, le roulement et l'étalement spectraux, on remarque une corrélation positive pour chacune des combinaisons résultantes. Sur les quatre graphiques générés, on remarque la présence de trois groupes distincts : les sons ronds en nuance *piano* à une extrémité, les sons brillants en nuance *forte* à l'autre extrémité et au centre, un groupe formé des sons ronds en nuance *forte* et des sons brillants en nuance *piano* (Cf. figures 7.26 pour la mise en relation du centroïde et du flux spectral, 7.27 pour le centroïde et l'aspect plat du spectre, 7.28 pour le centroïde et le roulement spectral, et 7.29 pour le centroïde et l'étalement spectral).

La corrélation entre le centroïde et l'aplatissement spectral d'une part et entre le centroïde et l'asymétrie spectrale d'autre part est, pour sa part, négative. Pour un centroïde bas, les valeurs d'aplatissement et d'asymétrie sont élevées pour les sons ronds en nuance *piano*, tandis que pour un centroïde élevé, les valeurs d'aplatissement et d'asymétrie sont relativement basses. Comme dans le cas des quatre descripteurs précédents, les sons ronds en nuance *forte* et les sons brillants en nuance *piano* se retrouvent regroupés au centre du graphique. Dans les deux cas, et contrairement à ce qui se passe dans le cas du flux spectral, de l'aspect plat du spectre, du roulement et de l'étalement spectral, on peut aisément séparer le groupe de sons intermédiaires en deux sous-groupes (sons brillants *piano* et sons ronds *forte*). C'est la dynamique (*piano* ou *forte*) plus que la nuance de timbre (rond ou brillant) qui permet de rapprocher chacun de ces deux sous-groupes des deux extrêmes. Les sons brillants en nuance *piano* tendent en effet à rejoindre les sons ronds en nuance *piano* vers le coin supérieur gauche du graphique, alors que les sons ronds en nuance *forte* se rapprochent davantage des sons brillants en nuance *forte*, vers le coin inférieur droit du graphique (Cf. figures 7.30 pour le centroïde et l'aplatissement spectral, et 7.31 pour le centroïde et l'asymétrie spectrale).

Par ailleurs, on observe aussi une corrélation positive entre l'aspect plat du spectre et le roulement spectral. La mise en relation de ces deux descripteurs permet de distinguer quatre groupes de sons bien définis correspondant aux quatre conditions testées. Les sons ronds en nuance *piano* correspondent à un roulement et à une valeur d'aspect plat relativement bas, et ce sont les sons brillants en nuance *forte* qui obtiennent les valeurs les plus élevées pour les deux descripteurs. Par contre, pour des valeurs de roulement spectral à peu près équivalentes, les sons brillants en nuance *piano* et les sons ronds en nuance *forte* se distinguent par leur valeur moyenne d'aspect plat du spectre. Les seconds obtiennent une valeur plus élevée que les premiers (Cf. figure 7.32 pour la mise en relation de l'aspect plat du spectre et du roulement spectral).

Finalement, la corrélation entre la pente générale du spectre et la décroissance spectrale est négative. Comme on l'a vu lors de l'observation des trois coefficients du tristimulus, ce sont les sons ronds en nuance *piano* qui ont proportionnellement le plus de contenu dans les basses fréquences. Leur valeur moyenne de décroissance spectrale est donc la plus élevée, alors qu'elle est relativement basse pour les sons brillants en nuance *forte*. Encore ici, les sons brillants en nuance *piano* et les sons ronds en nuance *forte* sont regroupés au centre du graphique ; les premiers tendent à avoir des valeurs légèrement plus basses pour les deux descripteurs que les seconds (Cf. figure 7.33 pour la mise en relation de la pente spectrale globale et de la décroissance spectrale).

3.3.2 Tous modes de production sonore à excitation continue

En incluant les sons éoliens

Pour l'ensemble des timbres à excitation continue, la corrélation entre le centroïde et le flux, le roulement, et l'aspect plat du spectre ne se retrouve pas aussi clairement qu'avec le groupe de sons précédent. Toutefois, les sons éoliens se distinguent nettement des autres par des valeurs plus élevées pour l'ensemble de ces descripteurs. Entre les différentes sortes de sons éoliens, ce sont ceux produits avec la voyelle [i] qui obtiennent les valeurs les plus élevées (Cf. figures 7.34 pour la mise en relation du centroïde et de l'aspect plat du spectre, 7.35 pour le centroïde et le flux spectral, 7.36 pour le centroïde et le roulement spectral, et 7.37 pour la mise en relation de l'aspect plat du spectre et le roulement spectral).

En mettant en relation le centroïde avec l'asymétrie et l'aplatissement spectraux, on remarque une corrélation négative entre le centroïde et chacun des deux autres descripteurs, et dans les deux cas, les différents groupes de sons sont disposés de manière semblable dans les deux représentations graphiques. Avec un centroïde relativement bas mais des valeurs d'asymétrie et d'aplatissement élevées, on retrouve les sons de trompette, les sons ronds en nuance *piano* et les mélanges standard/éoliens dans le coin supérieur gauche des graphiques ; avec un centroïde élevé mais des valeurs d'asymétrie et d'aplatissement relativement basses, les sons éoliens se retrouvent à l'autre extrémité de la courbe, dans le coin inférieur droit des graphiques (Cf. figures 7.38 pour la mise en relation du centroïde et de l'asymétrie spectrale, et 7.39 pour le centroïde et l'aplatissement spectral).

L'observation des résultats en ce qui concerne l'étalement spectral permet de distinguer les deux groupes de *jet whistles* sifflés (joués sur les doigtés du *Do#* et du *Fa#* graves), qui obtiennent des valeurs remarquablement élevées pour ce descripteur, pour un centroïde relativement bas (Cf. figure 7.40 pour le centroïde et l'étalement spectral).

Finalement, la représentation tridimensionnelle des trois coefficients du tristimulus montre que les différents groupes de sons s'échelonnent le long d'une droite traversant l'espace tridimensionnel, et qu'on peut ainsi les classifier selon leur contenu fréquentiel. Les mélanges éolien/standard, les sons éoliens avec mâchoire fermée et les sons de trompette sont ceux dont l'énergie se concentre le plus dans les premiers partiels ; suivent ensuite les *jet whistle* sifflés, les sons joués avec l'usage de la voix à l'unisson et les sons ronds en nuance *piano*. Ce sont les sons éoliens avec la voyelle [i] puis la voyelle [o] ainsi que les sons brillants en nuance *forte* qui ont le plus d'énergie dans les partiels d'ordre élevé (Cf. figure 7.41).

Les groupes ne suivent pas exactement le même ordre (inversé) que les représentations des mises en relation du centroïde avec l'asymétrie et l'aplatissement spectral. Pour cette raison, il convient maintenant d'examiner les résultats obtenus en excluant les sons éoliens de l'analyse.

Sans les sons éoliens

Lorsque l'on exclut les sons éoliens de l'analyse, les résultats diffèrent quelque peu. La corrélation entre le centroïde d'une part et l'asymétrie ou l'aplatissement spectraux d'autre part est encore

une fois négative, suggérant que les valeurs de ces deux descripteurs sont à peu près inversement proportionnelles à celles du centroïde (Cf. figures 7.42 pour la mise en relation du centroïde et de l’asymétrie spectrale, et 7.43 pour le centroïde et l’aplatissement spectral).

Les graphiques montrant la relation entre le centroïde et le roulement spectral ainsi qu’entre le centroïde et l’aspect plat du spectre se ressemblent beaucoup, et on constate qu’il n’y a aucune corrélation entre entre ces deux descripteurs et le centroïde. Pour le roulement spectral et l’aspect plat du spectre, ce sont les mélanges standard/éoliens et les sons de trompette qui obtiennent les valeurs les moins élevées, suivis de près par les sons ronds en nuance *piano* et les *jet whistle* sifflés, puis par le mode de production standard et les sons impliquant l’usage de la voix à l’unisson ou à l’octave inférieure. Pour les deux descripteurs, ce sont les sons brillants (nuances *forte* et *piano*), les sons ronds en nuance *forte* et les sons avec multiphonique à l’octave qui génèrent les valeurs les plus élevées.

Le registre a un effet sur la valeur du centroïde, les sons joués sur *Si b₅* se retrouvant à l’extrême maximale de la dimension, mais ce n’est pas le seul facteur qui l’influence. En effet, ceux-ci sont suivis de près par les multiphoniques à l’octave sur *Fa#₄* et les sons brillants en nuance *forte* sur *Do#₄*. Ensuite, les *jet whistle* sifflés ont un centroïde plus élevé que tous les autres sons joués sur *Do#* ou *Fa#₄*, et ce sont les sons ronds en nuance *piano*, les sons de trompette et les mélanges éolien/standard qui obtiennent les valeurs de centroïde les moins élevées (Cf. figures 7.44 pour la mise en relation du centroïde et du roulement spectral, et 7.45 pour le centroïde et l’aspect plat du spectre).

Il n’y a pas non plus de corrélation claire entre le centroïde et le flux spectral, ni entre l’aspect plat du spectre et le roulement spectral. Les *jet whistle* sifflés, les sons produits avec la voix à l’octave ou à l’unisson et, dans une moindre mesure, les sons standard brillants en nuance *forte* ont des valeurs de flux spectral relativement plus élevées par rapport aux autres sons (Cf. figure 7.46 pour la mise en relation du centroïde et du flux spectral). Quant au roulement spectral, il permet de distinguer deux grands groupes de sons. Les sons générant les valeurs de roulement les moins élevées sont les sons de trompette, les mélanges éolien/standard, les *jet whistle* sifflés et les sons ronds en nuance *piano*. Dans l’autre groupe, où les valeurs de roulement sont plus élevées, on retrouve les sons avec usage de la voix à l’octave ou à l’unisson, les autres sons standard (sur

Fa#₄ et *Si b₅*), et les sons ronds en nuance *forte* et les sons brillants (*piano* et *forte*) sur *Do#₄* (Cf. figure 7.47 pour la mise en relation de l'aspect plat du spectre et du roulement spectral).

La représentation tridimensionnelle des coefficients du tristimulus est également fournie ; l'exclusion des sons éoliens de cette analyse permet de mieux distinguer les différentes catégories sonores le long de la droite qui se déploie dans cet espace à trois dimensions. Pour les sons obtenus avec un mode de production standard, il semble que le fait de produire une multiphonique à l'octave ou de jouer en nuance *forte* augmente la quantité d'énergie présente dans les partiels d'ordre plus élevé (Cf. figure 7.48).

3.3.3 Techniques polyphoniques et de modulation

En ce qui concerne les techniques polyphoniques et de modulation, les corrélations entre descripteurs spectraux sont moins claires que celles observées plus tôt (par exemple avec les sons en mode de production standard). Par exemple, il n'y a pas de corrélation directe entre le centroïde et le flux spectral. Le centroïde distingue surtout les sons d'après le registre dans lequel ils sont joués, et l'usage de la multiphonique à l'octave ou de la voix au triton supérieur tend à faire augmenter sa valeur. Quant au flux spectral, l'usage combiné de la voix et du *fluttermouth* fait aussi augmenter sa valeur. Toutefois, les sons obtenant la valeur la plus élevée pour le flux spectral sont ceux joués sur *Fa#₄* avec l'usage de la voix au triton inférieur (sans *fluttermouth*) (Cf. figure 7.49 pour la mise en relation du centroïde et du flux spectral).

Cependant, on observe une corrélation positive entre le centroïde et l'étalement spectral. Ce sont encore les sons joués sur *Fa#₄* avec l'usage de la voix au triton inférieur (et sans *fluttermouth*) qui obtiennent les valeurs les plus élevées pour les deux descripteurs. Ici aussi, on remarque une influence du registre sur la valeur obtenue. En général, les sons avec multiphonique à l'octave génèrent des valeurs d'étalement plus élevées que les autres sons (mais moins que les *Fa#₄* avec voix au triton inférieur). Les sons sur *Fa#₄* avec *fluttermouth* sont ceux qui génèrent les valeurs les moins élevées. Mis à part ces quelques groupes particuliers, aucun autre ne se distingue réellement grâce aux valeurs d'étalement spectral (Cf. figure 7.50 pour la mise en relation du centroïde et de l'étalement spectral).

Un troisième graphique montre la mise en relation de l'aspect plat du spectre et du roulement spectral. Les valeurs les plus élevées pour l'aspect plat sont obtenues avec la multiphonique à

l'octave et l'ensemble des sons en mode de production standard. L'usage de la voix à l'unisson ou à l'octave, que ce soit avec ou sans *fluttermouth*, donne une valeur d'aspect plat généralement plus basse que l'usage de la voix au triton (inférieur ou supérieur). La fréquence de roulement spectral la plus basse est obtenue avec les sons sur *Fa#4* avec *fluttermouth* et avec les sons sur *Si b5* (avec ou sans *fluttermouth*). Les sons joués sur *Si b5* génèrent d'ailleurs presque tous des valeurs de roulement spectral équivalentes, à l'exception de ceux impliquant l'usage de la voix au triton (à la même octave ou à l'octave inférieure). Le *Do#4* en mode de production standard et le *Fa#4* avec voix au triton inférieur génèrent pour leur part les valeurs les plus hautes (Cf. figure 7.51 pour la mise en relation de l'aspect plat du spectre et du roulement spectral).

D'après la représentation des valeurs des trois coefficients du tristimulus, on constate que l'usage du *fluttermouth* sur *Fa#4* semble diminuer le contenu en hautes fréquences du son, ce qui ne se vérifie pas dans le cas du *Si b5*. Par contre l'usage de la voix à l'octave ou au triton inférieur sur *Fa#4* produit plus d'énergie dans les partiels élevés, et cette tendance est beaucoup plus accentuée dans cet exemple précis que pour les autres groupes de sons. Par ailleurs, on observe surtout des distinctions dues au registre (grave avec *Fa#4* par rapport à médium/aigu avec *Si b5*), mais c'est l'usage de la voix au triton qui est le plus susceptible de changer la répartition de l'énergie entre les partiels, et qui empêche par conséquent la division de l'ensemble des sons en deux groupes clairs (Cf. figure 7.52 pour le tristimulus).

Une corrélation négative s'observe toutefois lorsqu'on met le centroïde en relation avec l'aplatissement ou avec l'asymétrie spectraux. Dans le cas de l'aplatissement spectral, les sons avec multiphonique à l'octave se détachent de la courbe générale avec des valeurs légèrement plus élevées par rapport à la tendance du centroïde. Le même phénomène s'observe avec l'asymétrie spectrale. Ici, la corrélation semble un peu plus élevée qu'avec l'aplatissement, et en plus des sons avec multiphonique, l'usage de la voix au triton inférieur sur *Fa#4* fait aussi augmenter la valeur d'asymétrie par rapport à la tendance du centroïde (Cf. figures 7.53 pour la mise en relation du centroïde et de l'aplatissement spectral, et 7.54 pour le centroïde et l'asymétrie spectrale).

3.4 Dimensions perceptives du timbre

En terminant cette série d'observations particulières sur les descripteurs acoustiques du timbre, les descripteurs correspondant aux principales dimensions perceptives du timbre identifiées par les chercheur.se.s en psychoacoustique³ ont été mis en relation, afin de voir dans quel mesure ces dimensions permettaient d'effectuer des distinctions entre les groupes de sons. Ainsi, les graphiques montrent deux représentations tridimensionnelles mettant en relation d'une part le temps d'attaque, le centroïde et le flux spectral, et d'autre part le temps d'attaque, le centroïde spectral et l'irrégularité spectrale. Les observations notées ici concernent deux groupes de sons : les timbres à excitation continue, et les timbres à excitation instantanée.

Au chapitre 4 (Cf. section 2.4), il a été mentionné, d'après une revue de la littérature, que le paramètre du logarithme du temps d'attaque était plus corrélé à la dimension perceptive correspondante que le temps d'attaque lui-même (voir, entre autres, Caclin et al. 2005, p. 473). Toutefois, dans le cas présent, on a constaté que c'était plutôt le temps d'attaque (Att) qui donnait les indications les plus claires quant à la différenciation des sons de flûte, et c'est pourquoi ce descripteur a été utilisé au lieu du logarithme du temps d'attaque (LAT).

3.4.1 Tous modes de production sonore à excitation continue

La représentation graphique à partir de laquelle les analyses ont été effectuées exclut ici les sons éoliens, qui se distinguent nettement des autres groupes de sons à cause des valeurs très élevées qu'ils obtiennent pour le centroïde et le flux spectraux. Le temps d'attaque (ou son logarithme), qui joue habituellement un rôle primordial dans la reconnaissance des sons instrumentaux, a une influence plutôt limitée sur les résultats obtenus ici, les sons à excitation continue de la flûte se distinguant aisément d'après la partie soutenue du son.

La combinaison centroïde/flux spectral est donc déterminante dans la distinction des timbres à excitation continue. Comme dans la représentation tridimensionnelle des coefficients du tristimulus, les sons générant les valeurs les moins élevées pour ces descripteurs sont les sons de trompette, les mélanges éolien/standard ainsi que les sons ronds en nuance *piano*. Parmi les sons générant les valeurs les plus élevées, on retrouve les sons brillants et les *jet whistles* sifflés. Il est

³La première section du chapitre 4 est consacrée à cette question. On pourra se référer notamment aux études menées par Grey (1975 et 1977), Krumhansl (1989), McAdams et al. (1995) et Caclin et al. (2005), entre autres.

à noter que les *jet whistles* se distinguent des autres sons par leur flux spectral élevé, et non par leur contenu élevé en hautes fréquences (ou par un centroïde élevé) (Cf. figure 7.55 pour la mise en relation du temps d'attaque, du centroïde et du flux spectral).

Si on remplace le flux par l'irrégularité spectrale à la troisième dimension, on constate que les sons avec multiphonique à l'octave (sur *Do#4* et *Fa#4*) ainsi que les sons avec usage de la voix à l'octave inférieure se distinguent par une valeur élevée pour ce descripteur (Cf. figure 7.56 pour la mise en relation du temps d'attaque, du centroïde et de l'irrégularité spectrale). Ce sont en effet deux techniques qui génèrent une certaine instabilité dans le déploiement de l'enveloppe spectrale.

3.4.2 Tous modes de production sonore à excitation instantanée

Le portrait est différent lorsque l'on compare des timbres à excitation instantanée. En effet, les sons étant courts, le temps d'attaque joue un rôle primordial dans les distinctions que l'on pourrait faire entre les catégories de sons. En ordre croissant, du temps d'attaque le plus court au plus long, on retrouve les *pizzicati* et percussions de clé, les *tongue rams*, et enfin les sons produits avec du souffle.

Par rapport au temps d'attaque, le centroïde joue un rôle assez limité. Par contre, le flux spectral contribue, lui, à la possibilité de différencier les groupes de sons. En ordre croissant, les valeurs de flux spectral se répartissent entre les sons standards et mixtes, puis les *pizzicati*, les percussions de clés et les sons éoliens, et enfin les *tongue rams* (Cf. figure 7.57 pour la mise en relation du temps d'attaque, du centroïde et du flux spectral). Par contre, les distinctions sont moins claires quand on remplace le flux par l'irrégularité spectrale à la troisième dimension. Par rapport aux autres groupes de sons, l'irrégularité spectrale tend à être un peu plus élevée pour les sons éoliens et mixtes, ainsi que pour les *tongue rams* expirés (Cf. figure 7.58 pour la mise en relation du temps d'attaque, du centroïde et de l'irrégularité spectrale).

Pour passer directement à la section discussion du chapitre, cliquez [ici](#).

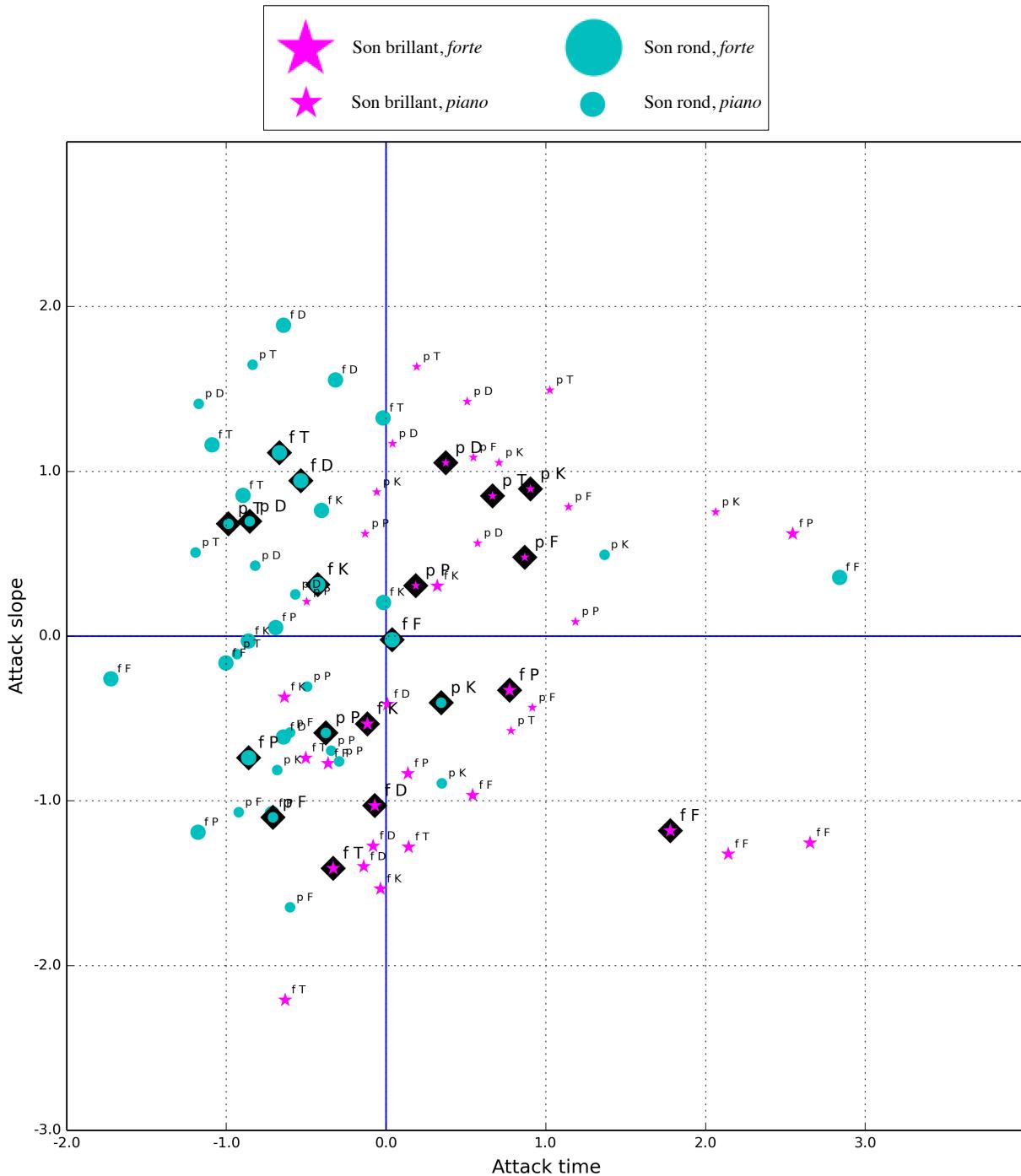


FIGURE 7.1 – Sons standard longs - Temps et pente de l'attaque – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le temps et la pente de l'attaque sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

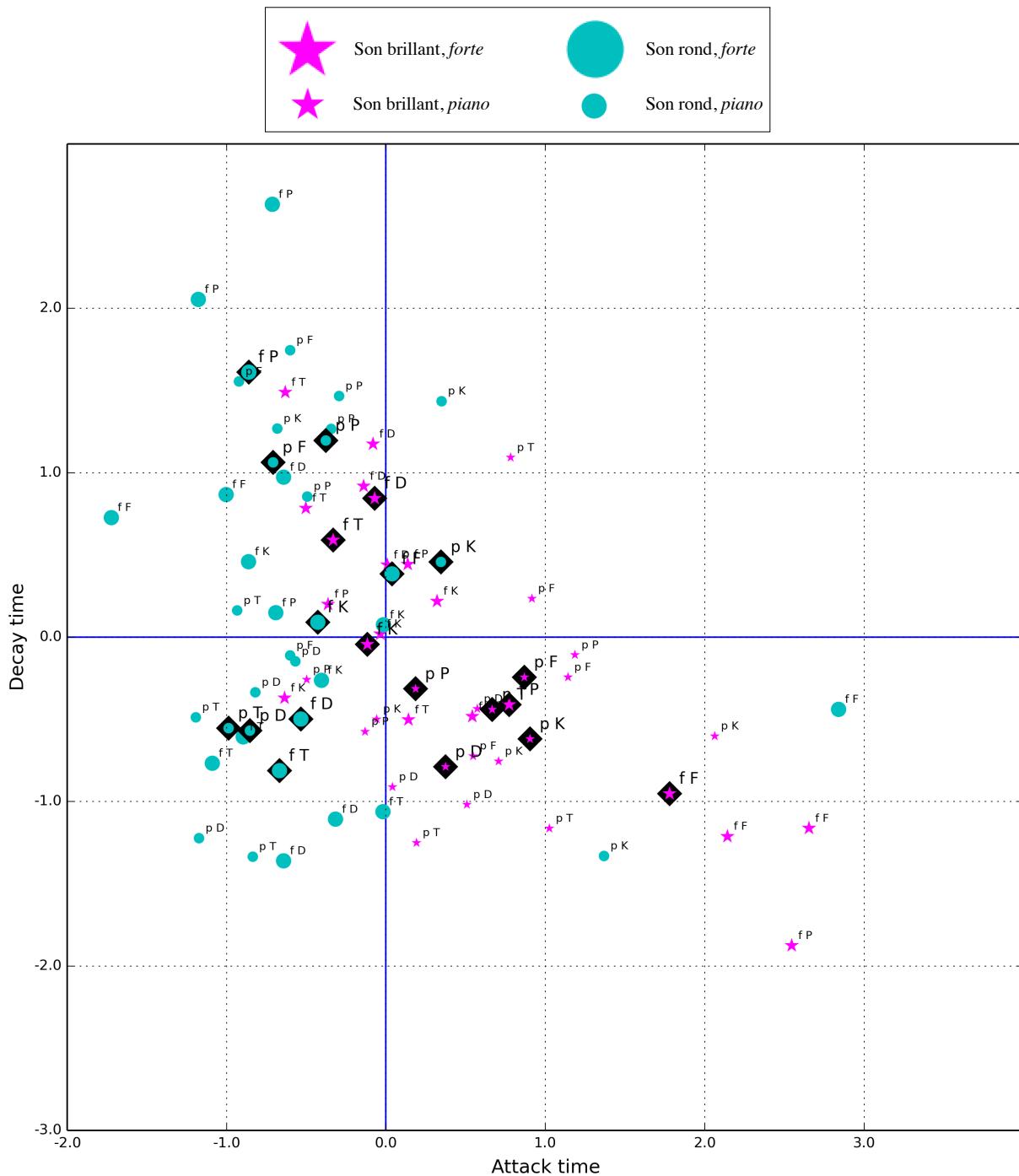


FIGURE 7.2 – Sons standard longs - Temps d'attaque / de déclin – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le temps d'attaque et le temps de déclin (*decay*) sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées.

Retour au texte : cliquez [ici](#).

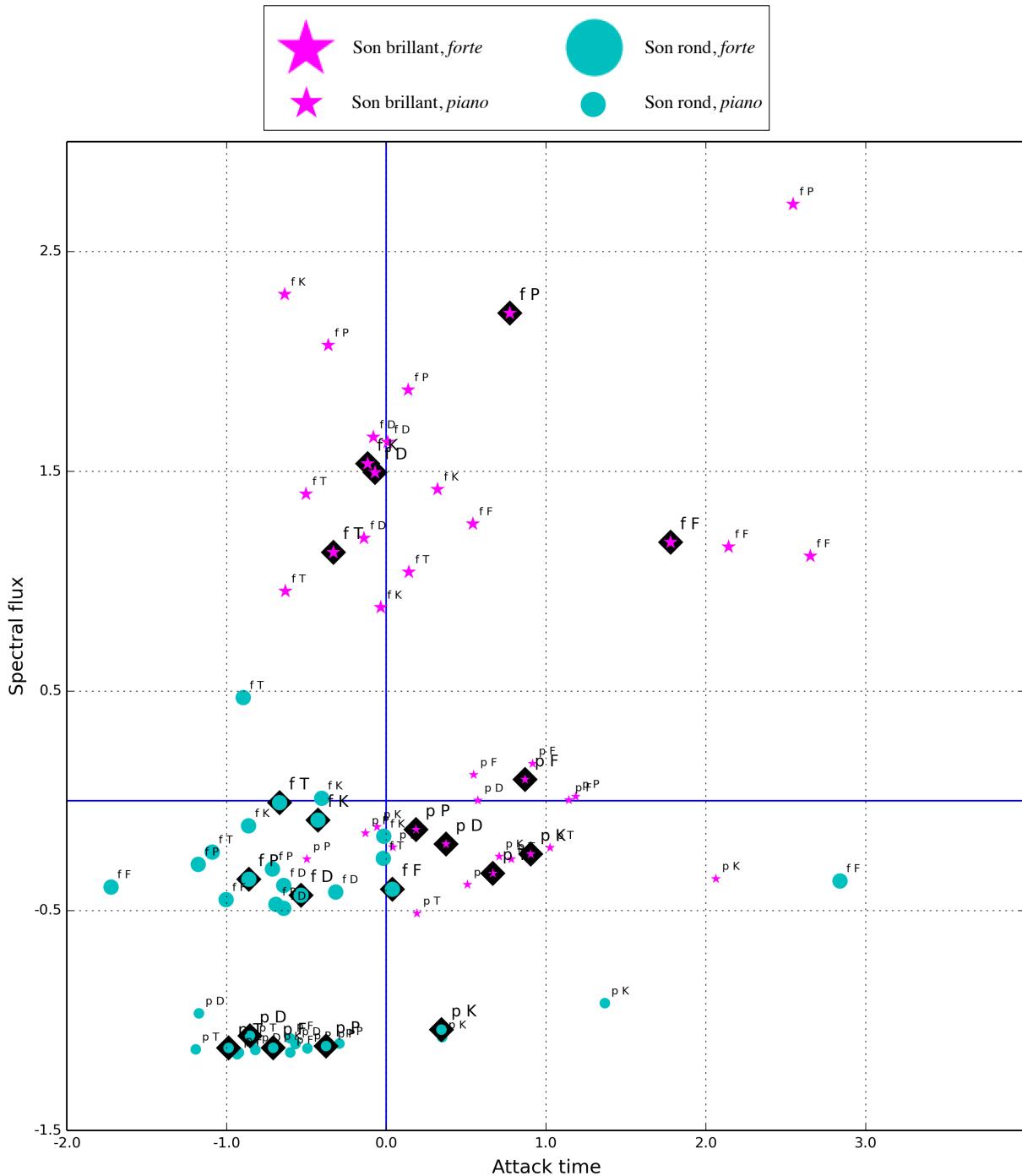


FIGURE 7.3 – Sons standard longs - Temps d'attaque / Flux spectral – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant forte, brillant piano, rond forte et rond piano), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le temps d'attaque et le flux spectral sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

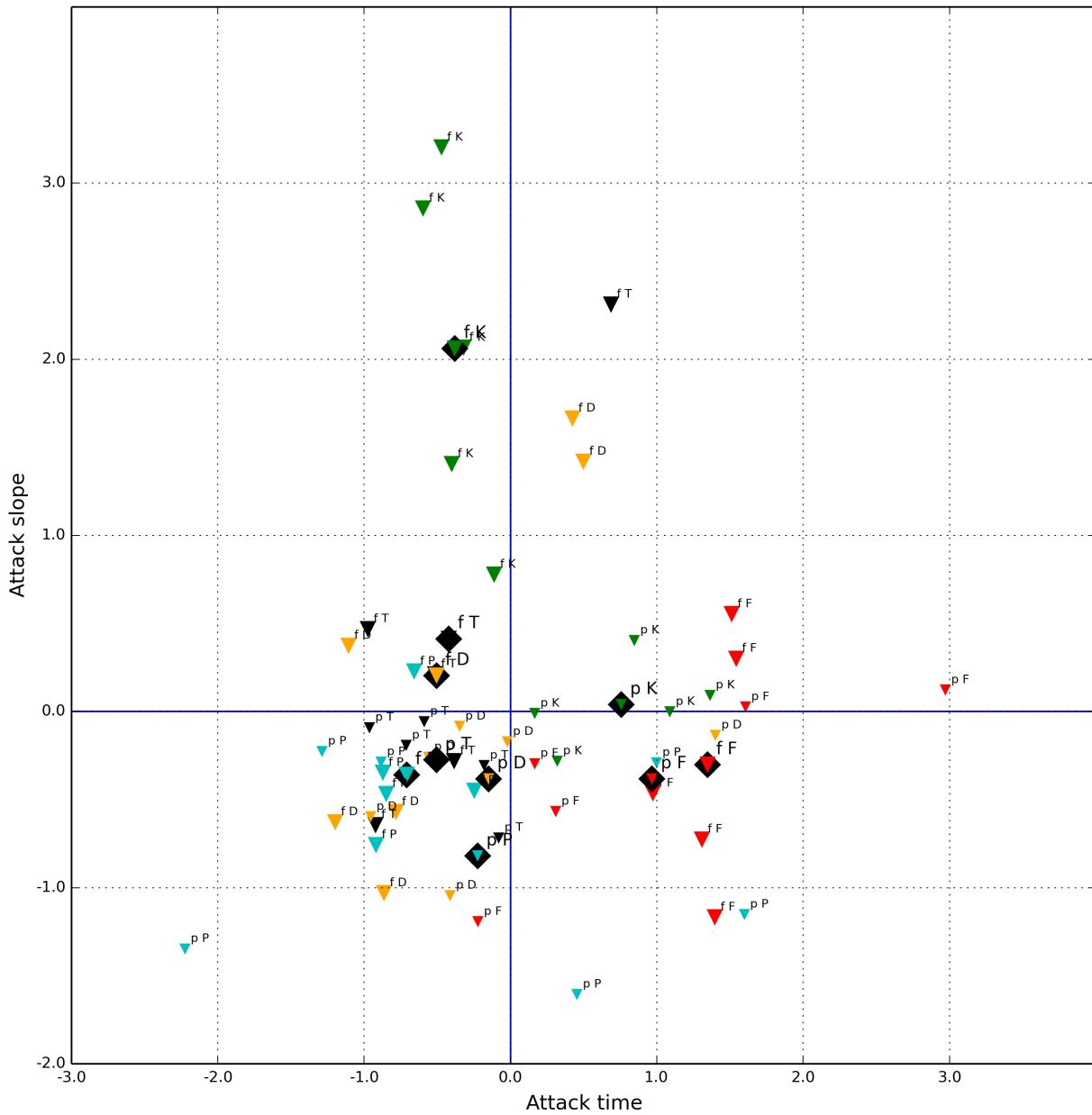


FIGURE 7.4 – Sons standard courts - Temps et pente de l'attaque – Des sons courts, en nuance *piano* et *f* et obtenus avec un mode de production sonore standard, ont été enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz). Pour chaque nuance dynamique, cinq types d'attaque ont été testées. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. De plus, pour plus de clarté, des couleurs distinctes ont été associées à chacun des types d'attaques : jaune pour D, orange pour F, vert pour K, cyan pour P et noir pour T. Sur ce graphique, les sons sont placés dans un espace bidimensionnel où le temps et la pente de l'attaque sont mis en relation. **Retour au texte : cliquez ici.**

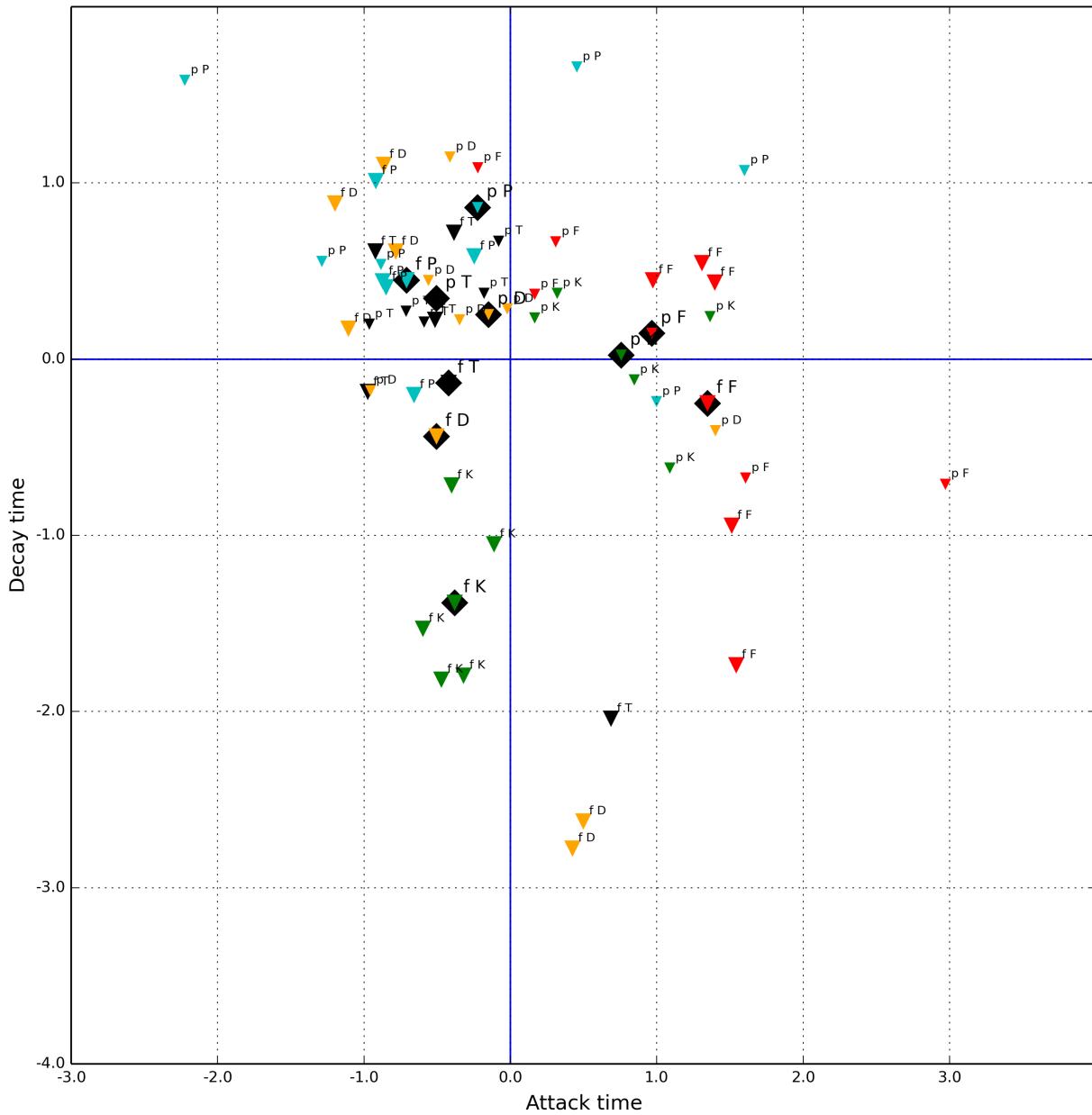


FIGURE 7.5 – Sons standard courts - Temps d'attaque / de déclin – Des sons courts, en nuance *piano* et *f* et obtenus avec un mode de production sonore standard, ont été enregistrés sur *Do#* (278,44 Hz). Pour chaque nuance dynamique, cinq types d'attaque ont été testées. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. De plus, pour plus de clarté, des couleurs distinctes ont été associées à chacun des types d'attaques : jaune pour D, orange pour F, vert pour K, cyan pour P et noir pour T. Sur ce graphique, les sons sont placés dans un espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le temps de déclin (*decay*) sont mis en relation. **Retour au texte : cliquez ici.**

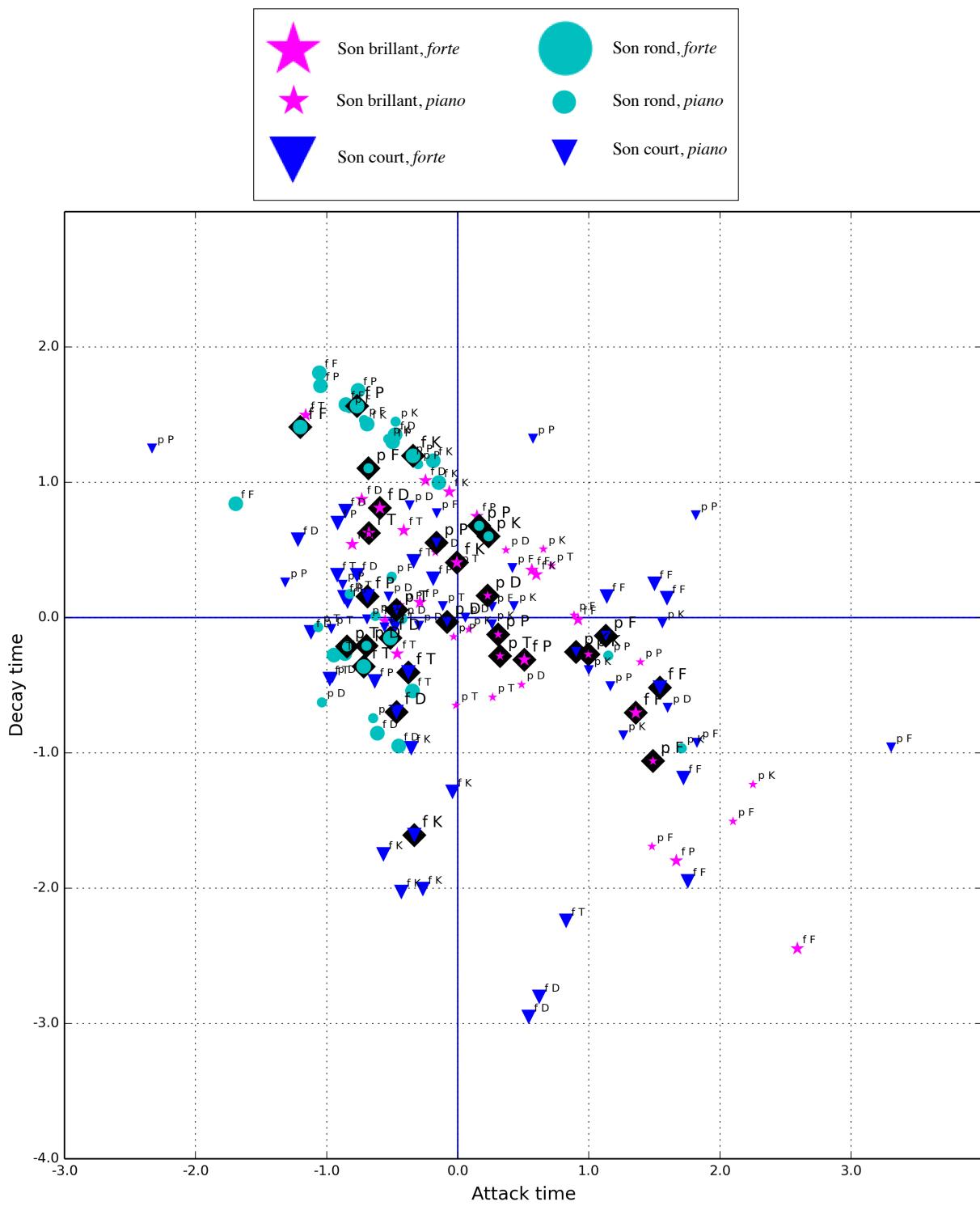


FIGURE 7.6 – Sons standard longs et courts - Temps d'attaque / de déclin – Quatre types de sons longs d'une durée de 2 secondes (ronds et piano, brillants et piano, ronds et forte), et enfin, les sons brillants et forte) et des sons courts en nuance forte et piano, tous enregistrés sur Do# (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le temps de déclin (decay) sont mis en relation. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d'attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d'attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées.
Retour au texte : cliquez ici.

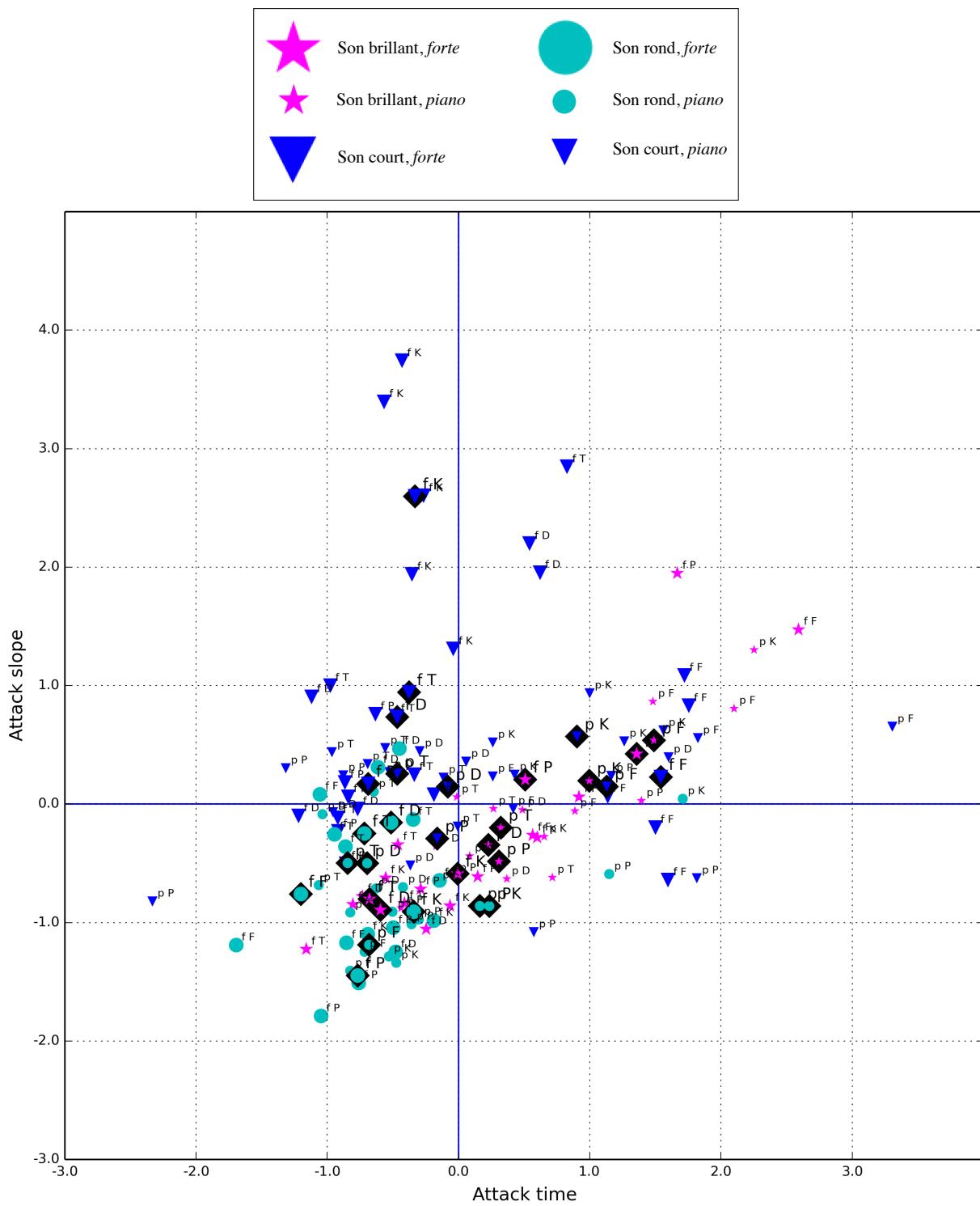


FIGURE 7.7 – Sons standard longs et courts - Temps et pente de l’attaque – Quatre types de sons longs d’une durée de 2 secondes (ronds et piano, brillants et piano, ronds et forte, et enfin, les sons brillants et forte) et des sons courts en nuance forte et piano, tous enregistrés sur Do# (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel où le temps et la pente de l’attaque sont mis en relation. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d’attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d’attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. [Retour au texte : cliquez ici](#).

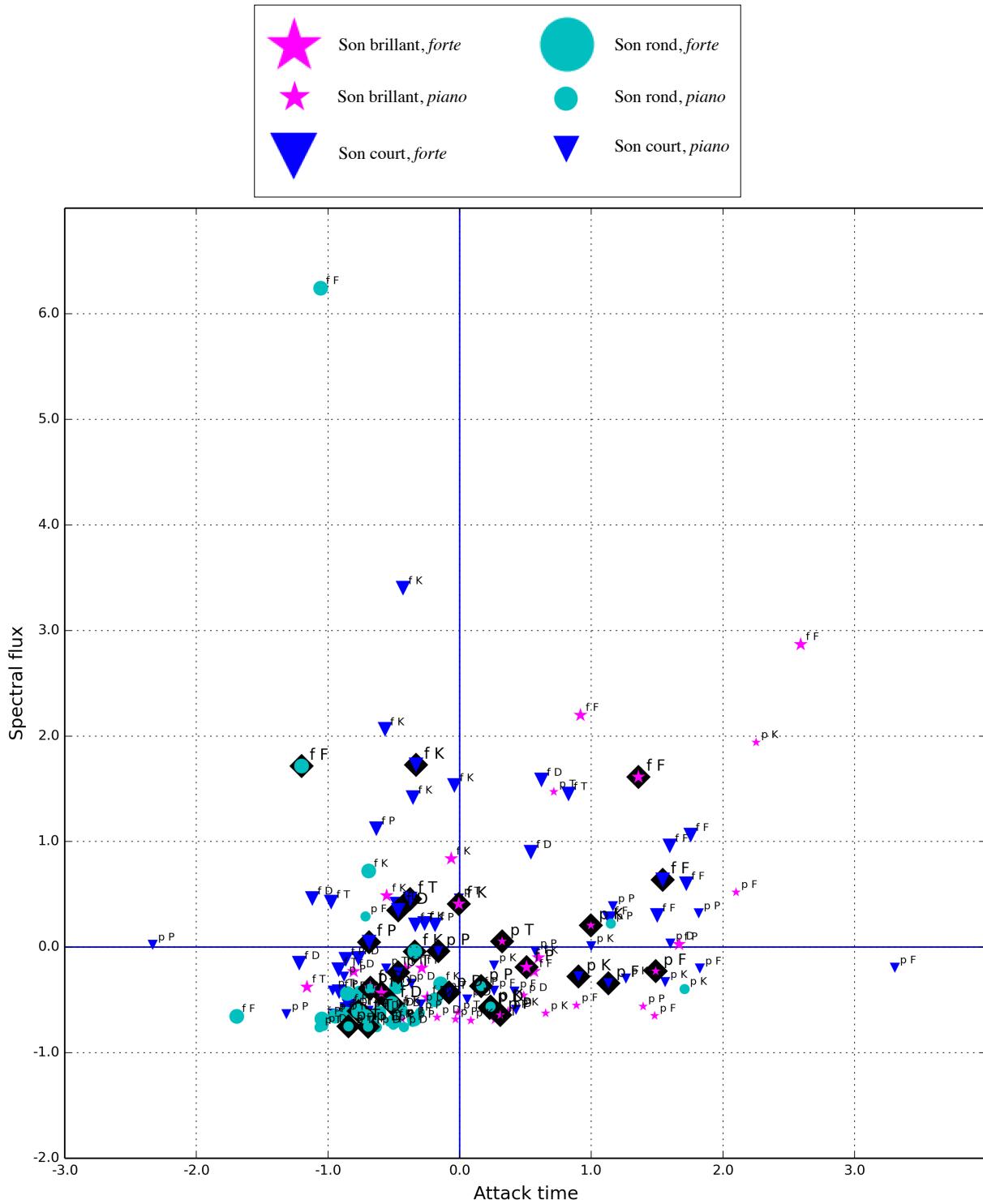


FIGURE 7.8 – Sons standard longs et courts - Temps d’attaque/Flux spectral – Quatre types de sons longs d’une durée de 2 secondes (ronds et piano, brillants et piano, ronds et forte, et enfin, les sons brillants et forte) et des sons courts en nuance forte et piano, tous enregistrés sur Do# (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel où le temps d’attaque et le flux spectral sont mis en relation. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d’attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d’attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

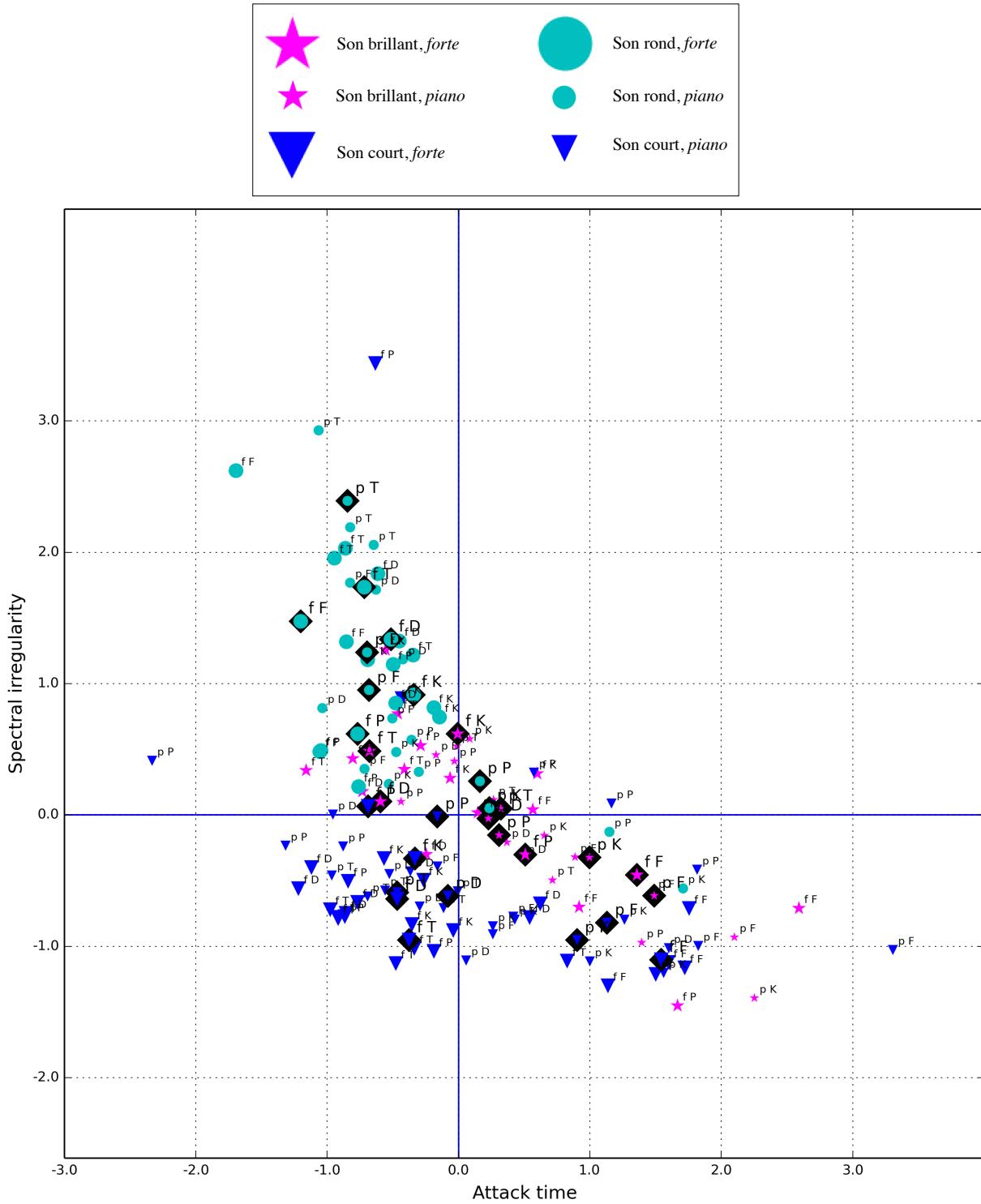


FIGURE 7.9 – Sons standard longs et courts - Temps d'attaque / Déviation harmonique (irrégularité spectrale) – Quatre types de sons longs d'une durée de 2 secondes (ronds et *piano*, brillants et *piano*, ronds et *forte*, et enfin, les sons brillants et *forte*) et des sons courts en nuance *forte* et *piano*, tous enregistrés sur Do# (278,44 Hz), sont représentés dans un espace bidimensionnel où le temps d'attaque et l'irrégularité spectrale (déviation harmonique) sont mis en relation. Pour chacune des six variantes représentées, cinq types d'attaques ont été testées (D,F,K,P et T). Les lettres majuscules désignent le type d'attaque, les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

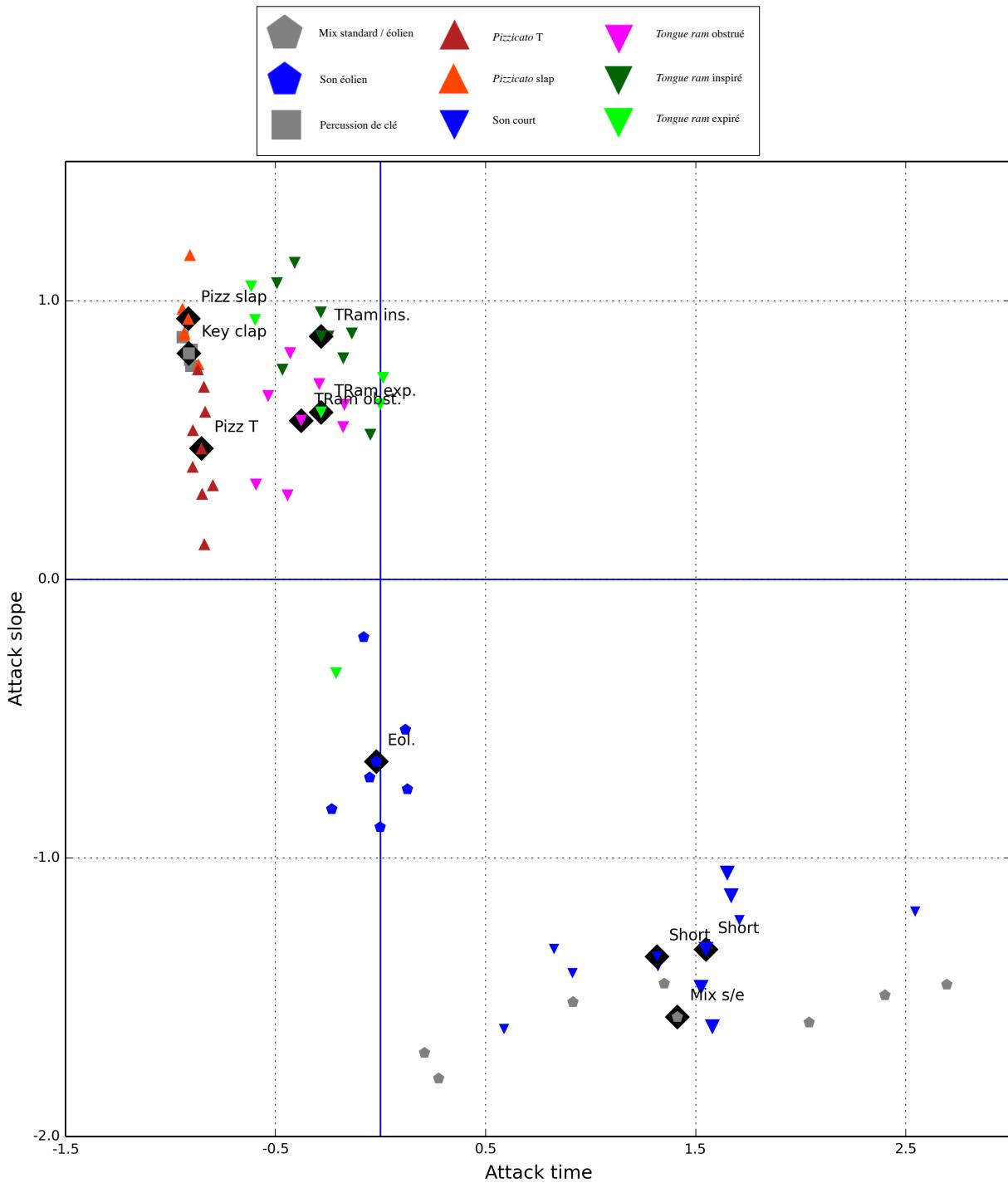


FIGURE 7.10 – Sons courts - Temps et pente de l'attaque – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps et la pente de l'attaque sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

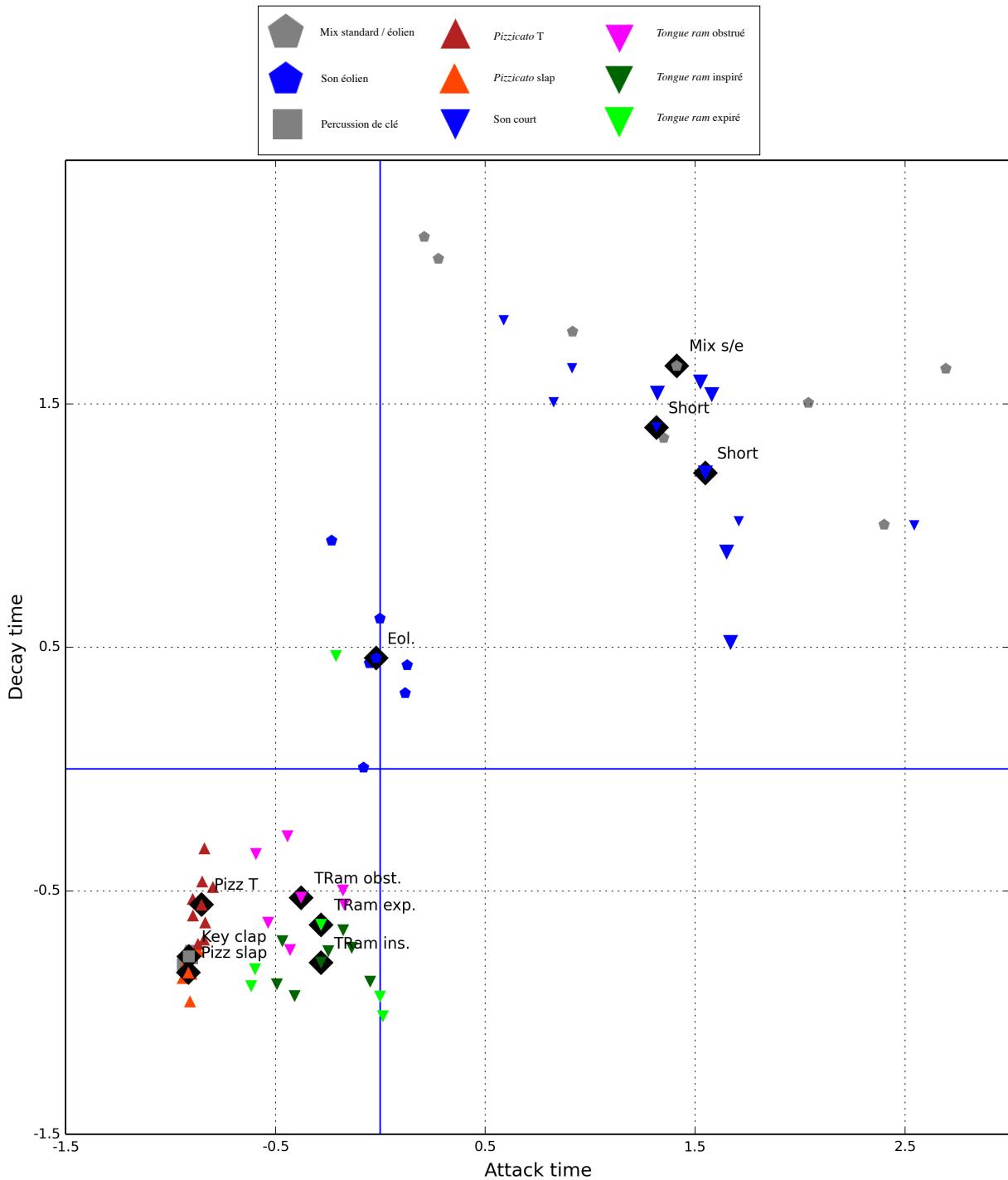


FIGURE 7.11 – Sons courts - Temps d'attaque / de déclin – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur Do# (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le temps de déclin (decay) sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances piano et forte, percussion de clé, pizzicati avec attaques en T et en slap, et tongue rams inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

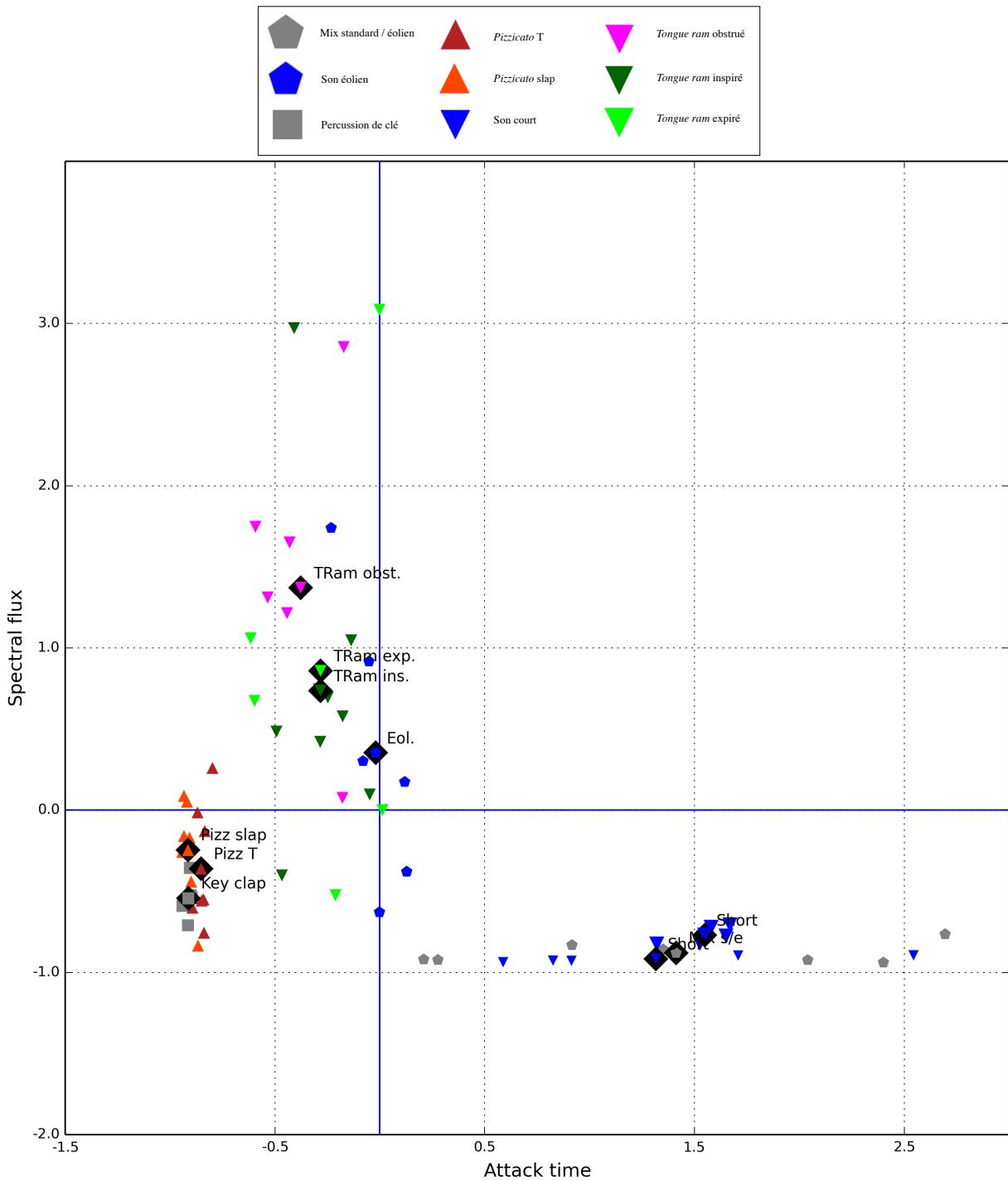


FIGURE 7.12 – Sons courts - Temps d'attaque et flux spectral – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur Do# (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le flux spectral sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances piano et forte, percussion de clé, pizzicati avec attaques en T et en slap, et tongue rams inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. Retour au texte : cliquez [ici](#).

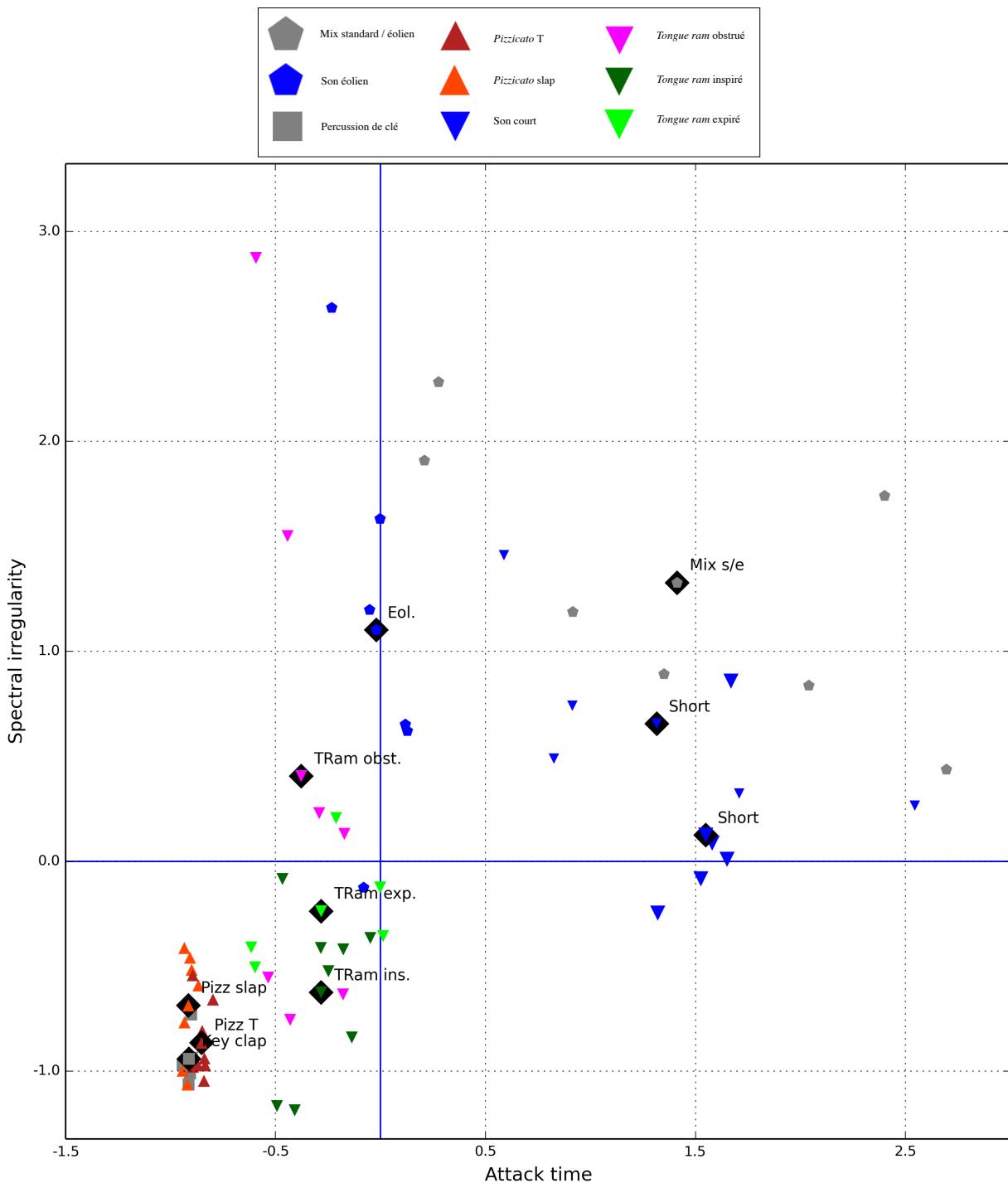


FIGURE 7.13 – Sons courts - Temps d'attaque et irrégularité spectrale – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et l'irrégularité spectrale (déviation harmonique) sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

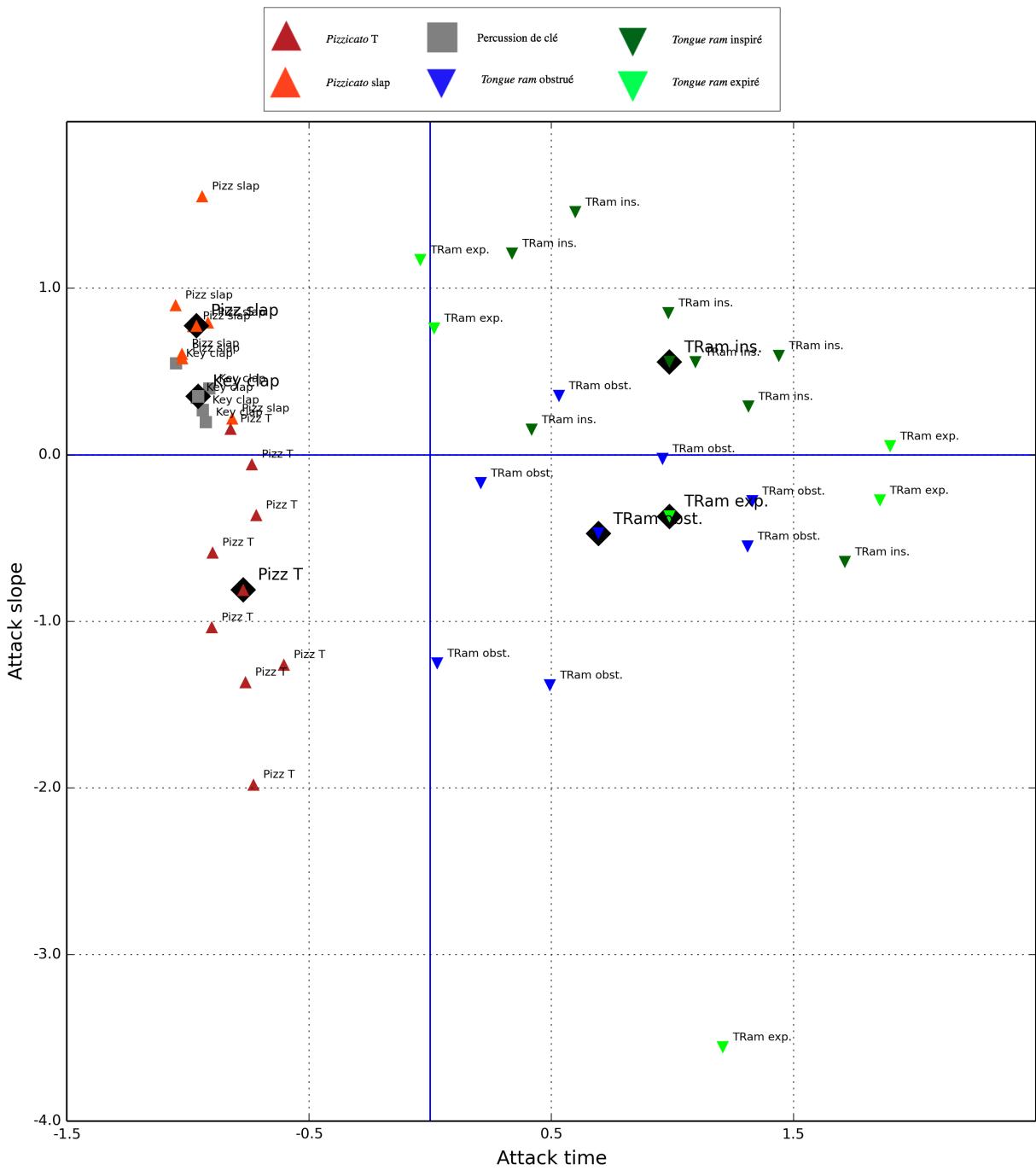


FIGURE 7.14 – Techniques percussives - Temps et pente de l’attaque – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps et la pente de l’attaque sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte :** cliquez [ici](#).

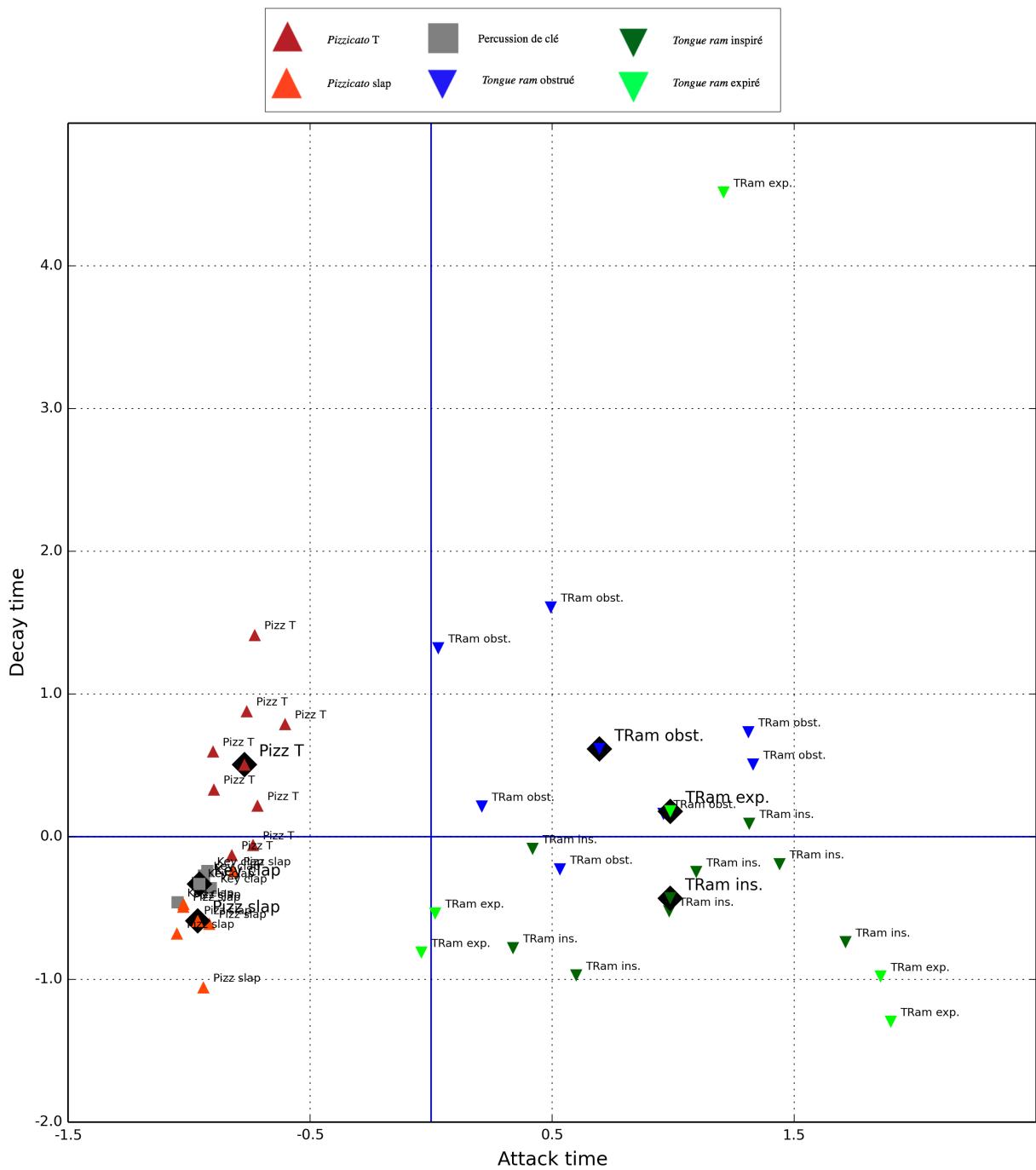


FIGURE 7.15 – Techniques percussives - Temps d'attaque / de déclin – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le temps de déclin (*decay*) sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons.
Retour au texte : cliquez [ici](#).

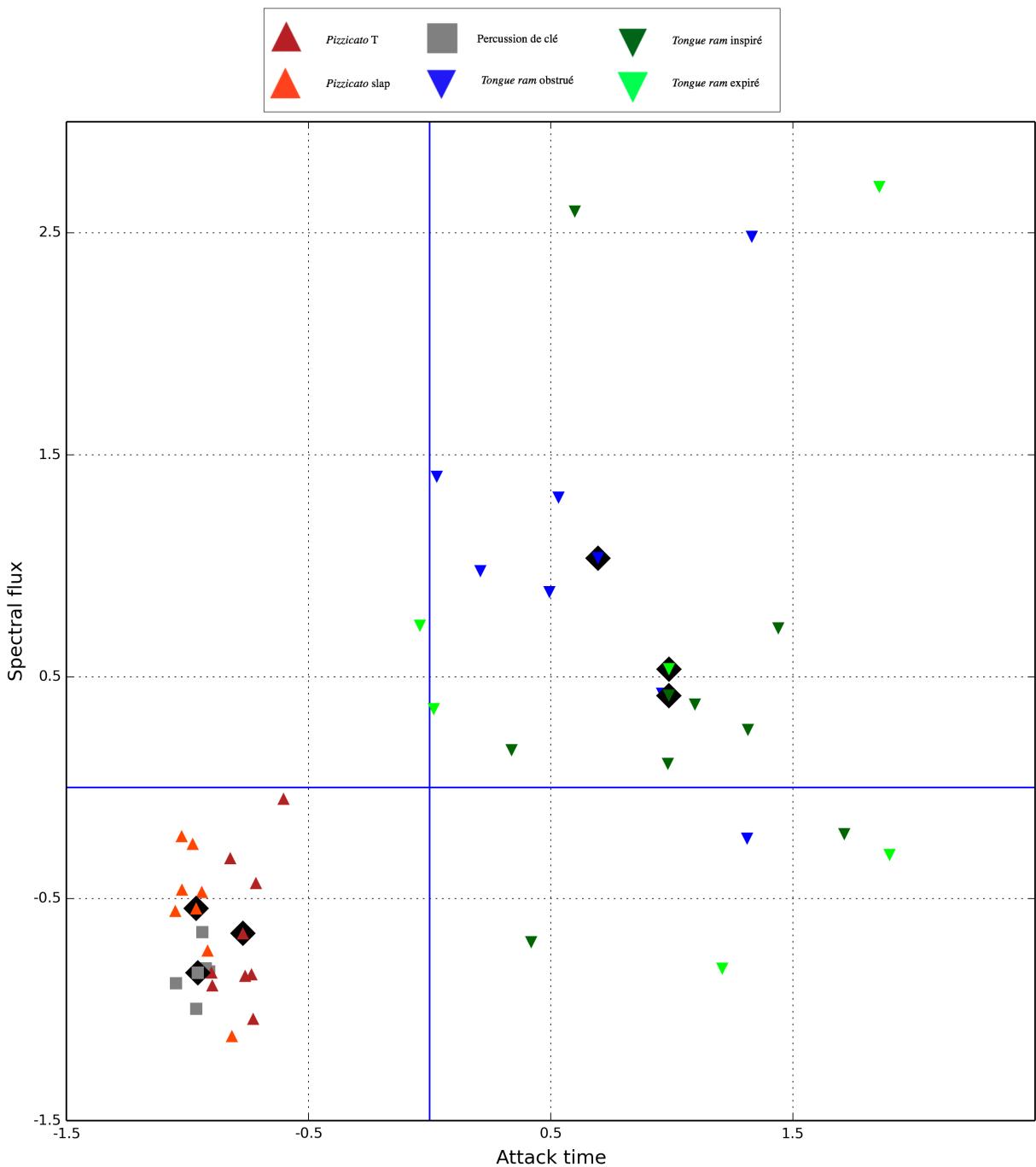


FIGURE 7.16 – Techniques percussives - Temps d'attaque et flux spectral – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et le flux spectral sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

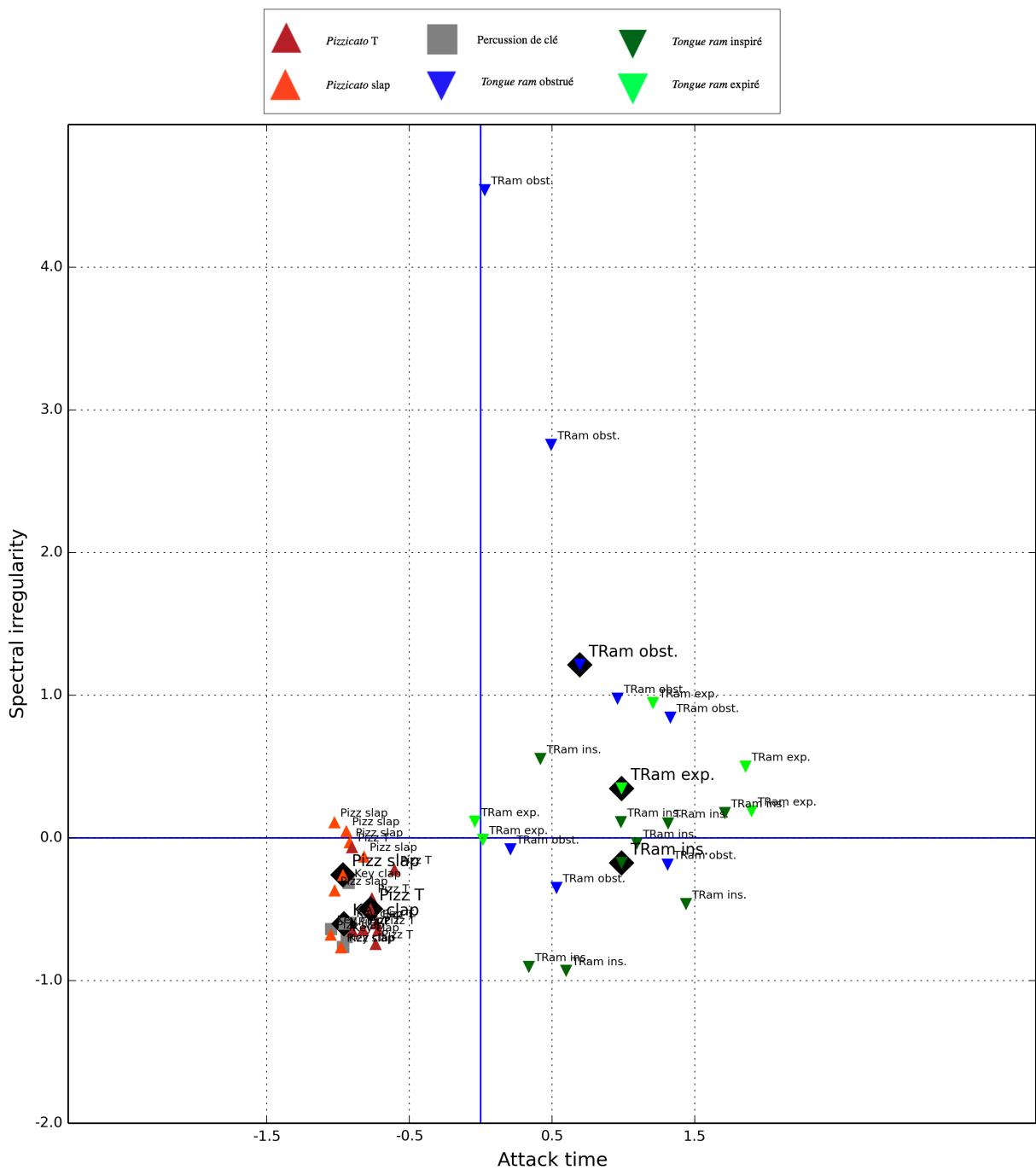


FIGURE 7.17 – Techniques percussives - Temps d'attaque et irrégularité spectrale – Un groupe de 6 types de techniques percussives, jouées sur Do# (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le temps d'attaque et l'irrégularité spectrale (déviation harmonique) sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

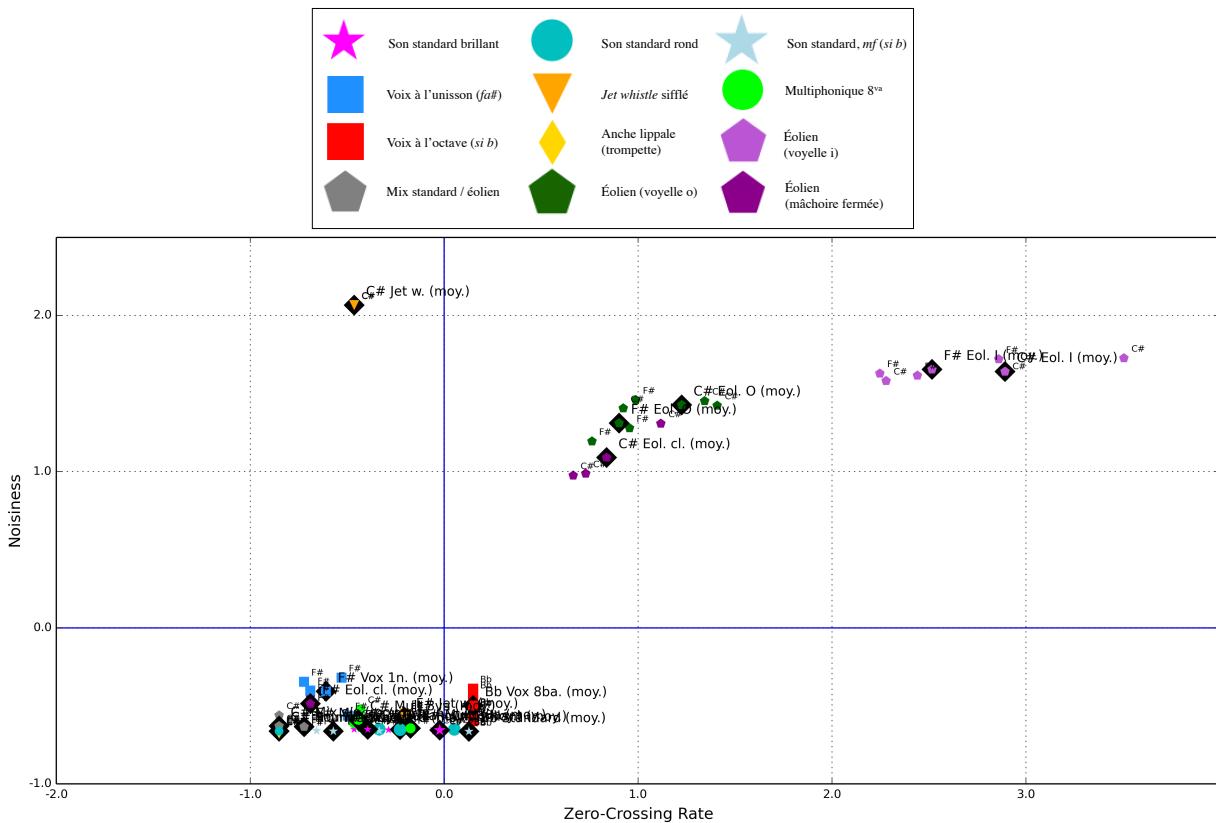


FIGURE 7.18 – Timbres à excitation continue - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et le rapport bruit/énergie totale (*noisiness*) sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

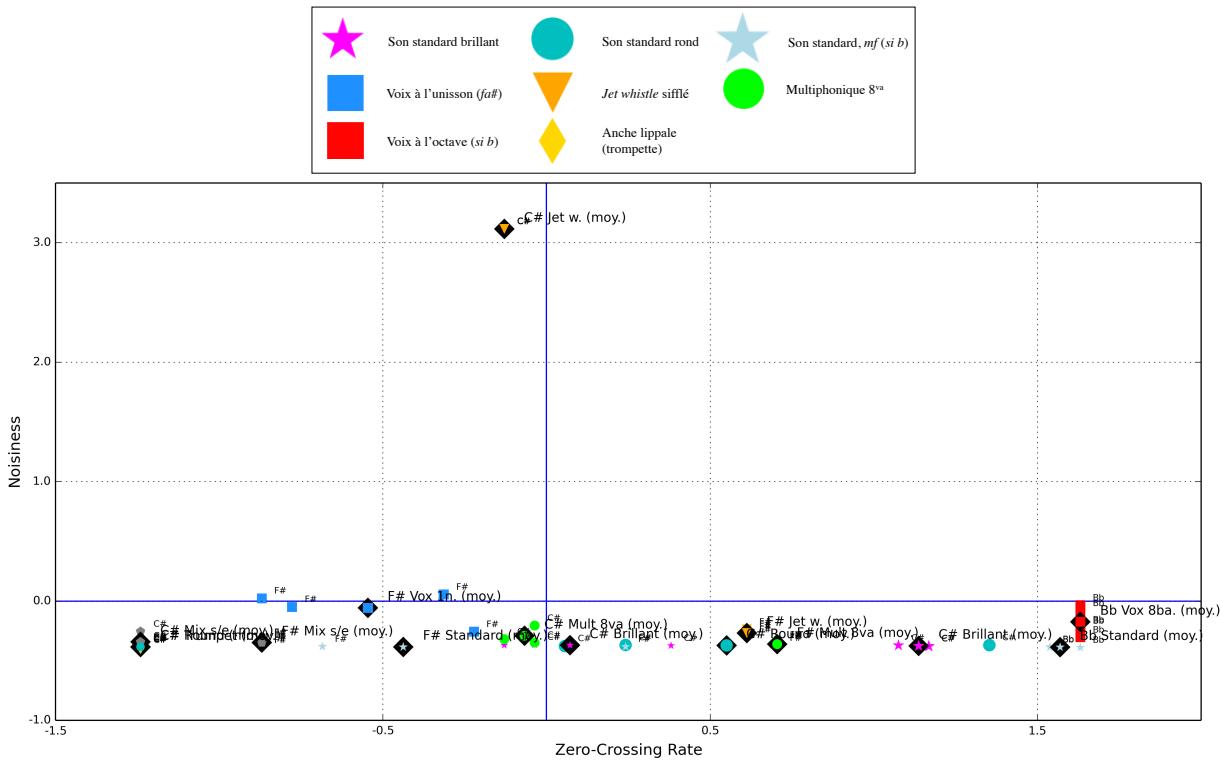


FIGURE 7.19 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz) est représenté dans un espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et le rapport bruit/énergie totale (*noisiness*) sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

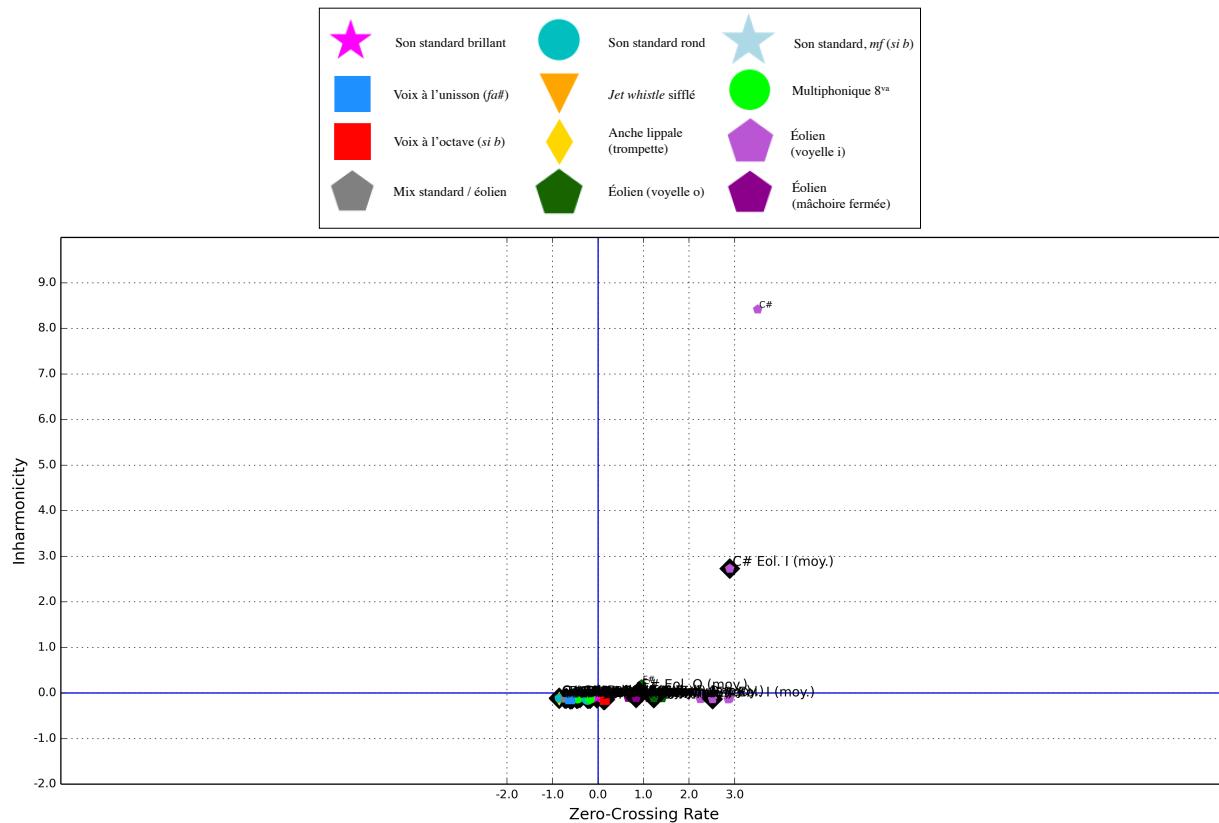


FIGURE 7.20 – Timbres à excitation continue - Passage à zéro et inharmonicité – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et l'inharmonicité sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

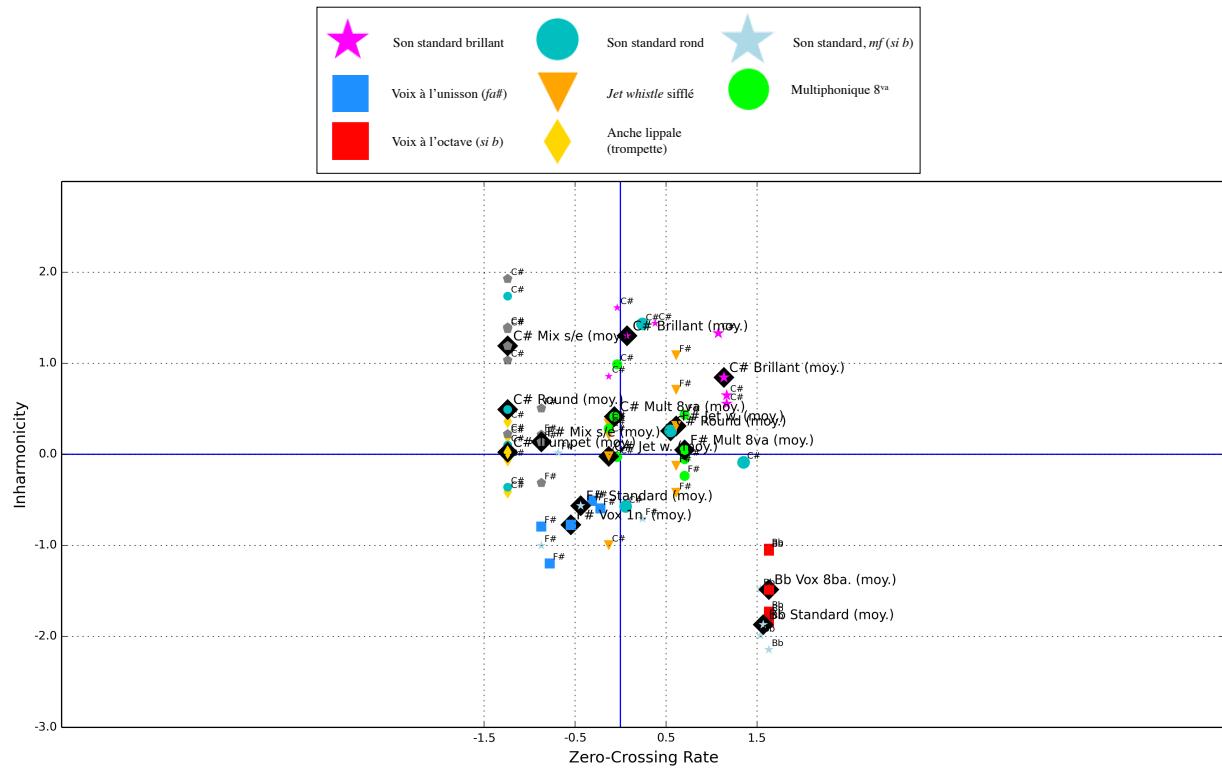


FIGURE 7.21 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Passage à zéro et inharmonicité – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et l'inharmonicité sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

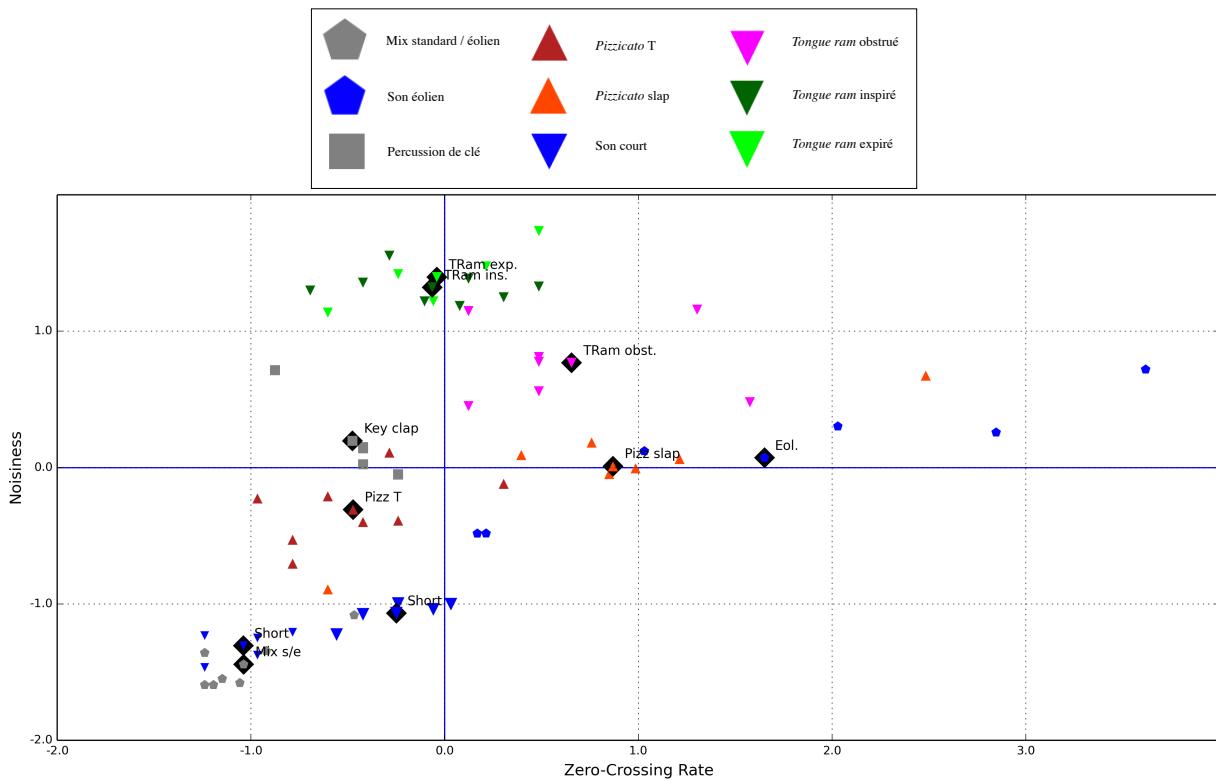


FIGURE 7.22 – Timbres à excitation instantanée - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et le rapport bruit/énergie totale (*noisiness*) sont mis en relation. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en *slap*, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l’embouchure. Les pictogrammes situés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

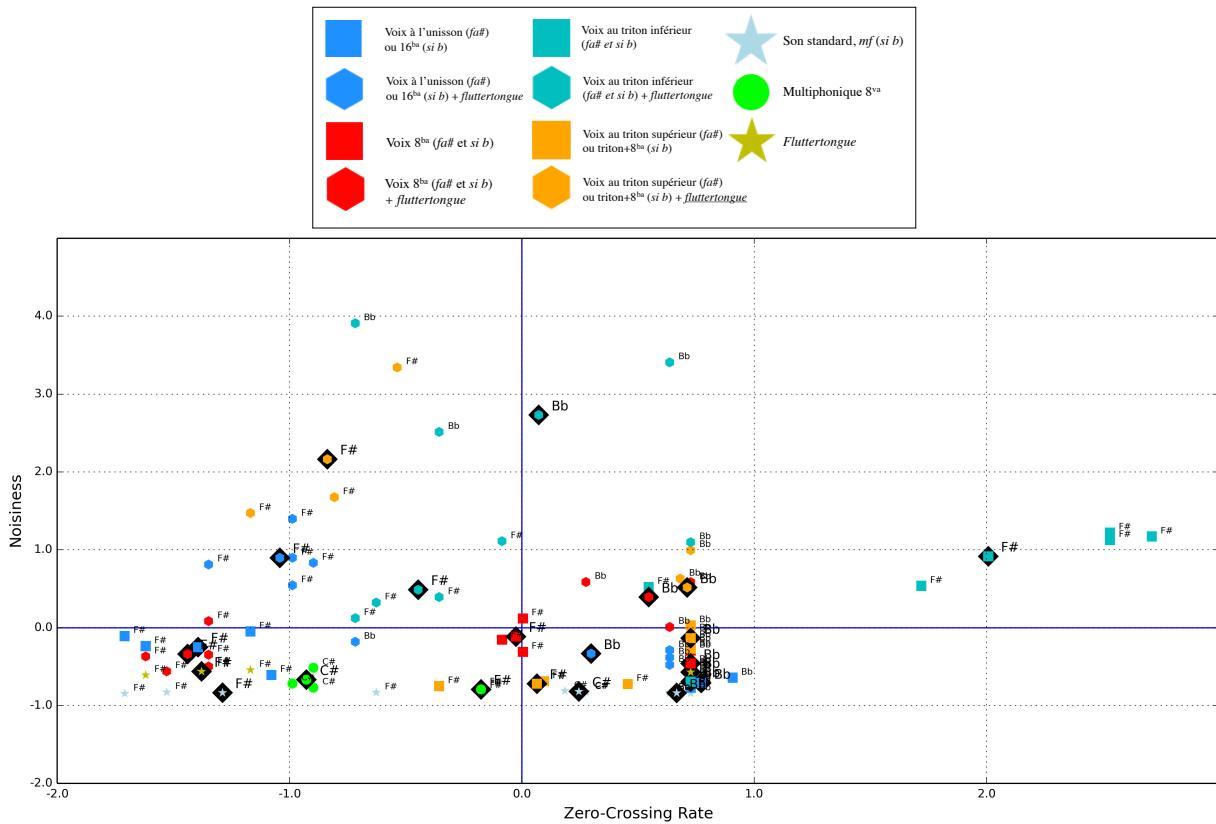


FIGURE 7.23 – Techniques polyphoniques et de modulation - Passage à zéro et rapport bruit/énergie totale – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et le rapport bruit/énergie totale (*noisiness*) sont mis en relation. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. Retour au texte : cliquez [ici](#).

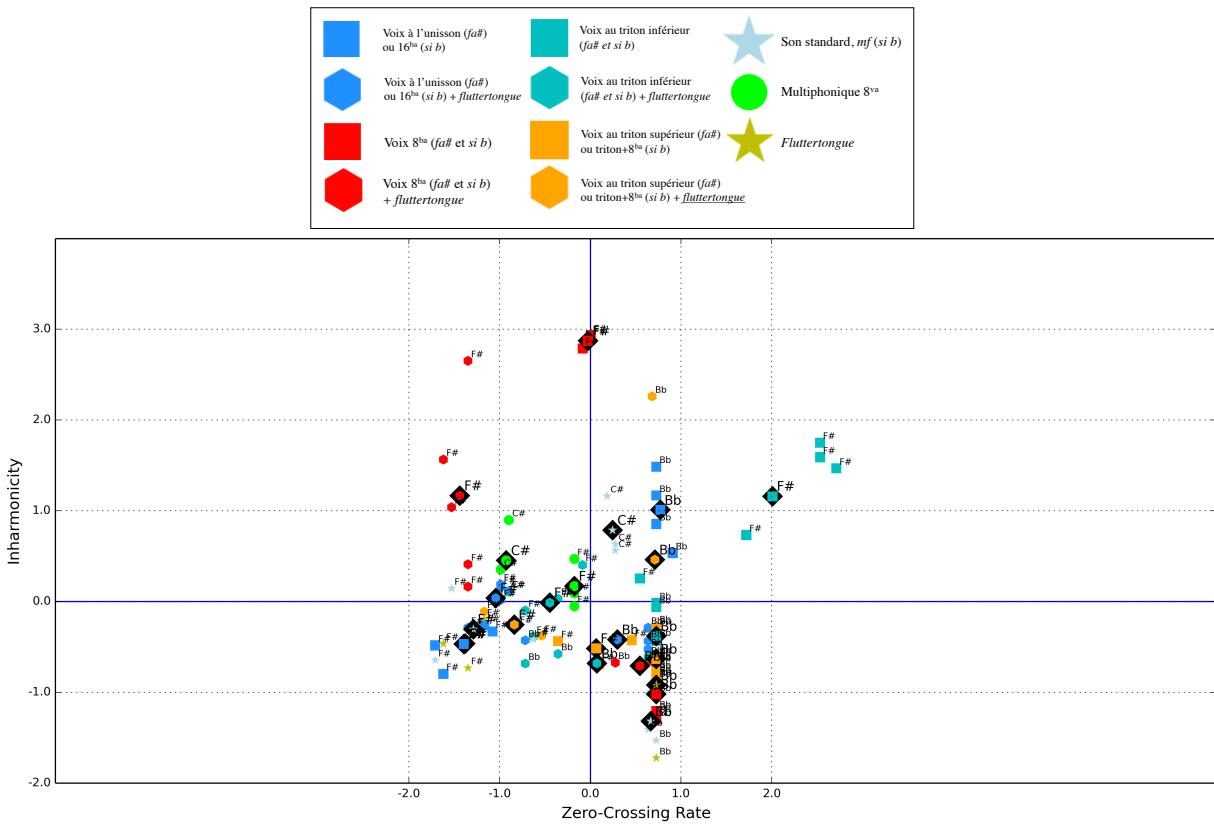


FIGURE 7.24 – Techniques polyphoniques et de modulation - Passage à zéro et inharmonicité – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le taux de passage à zéro et l'inharmonicité sont mis en relation. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

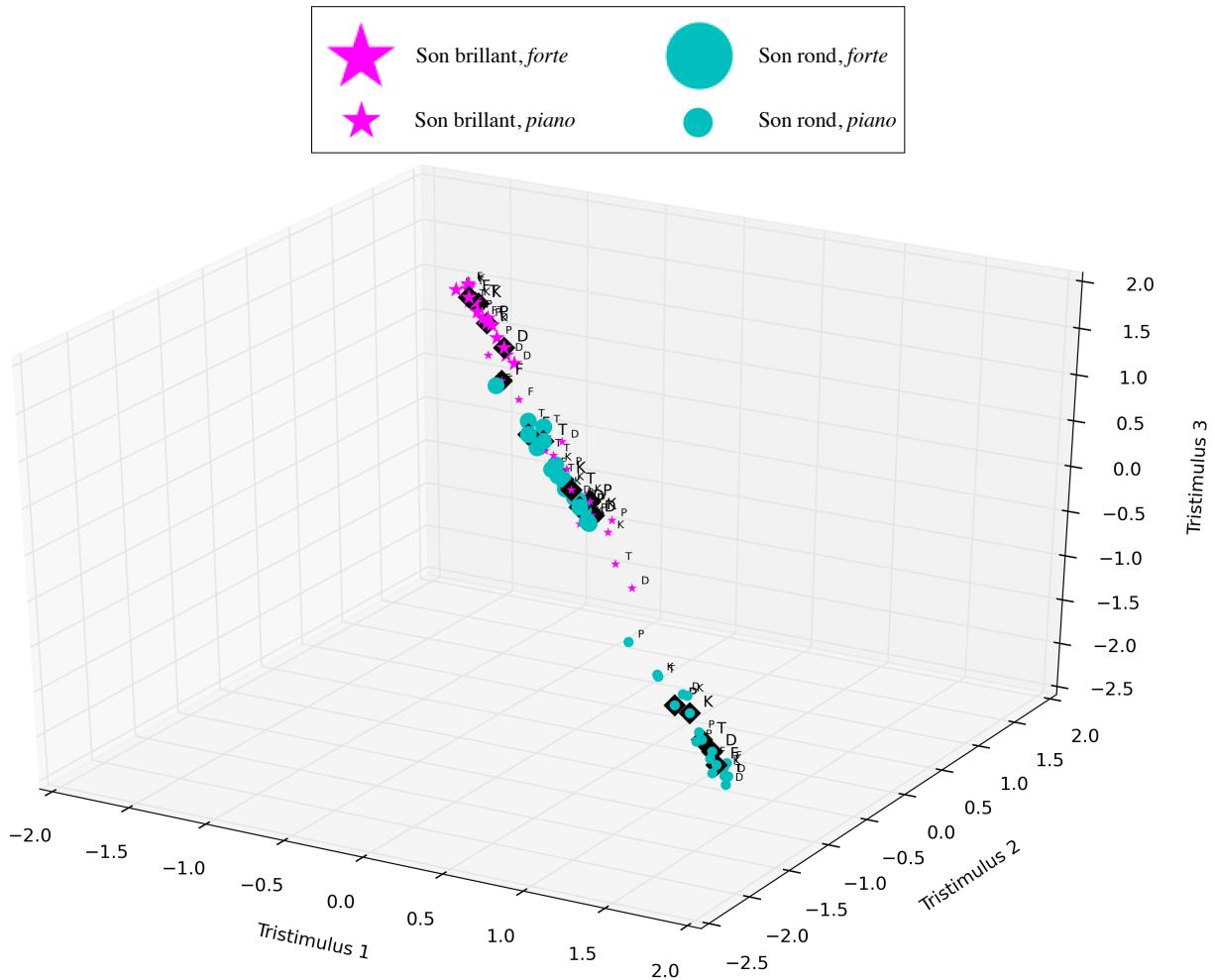


FIGURE 7.25 – Sons standard longs - Tristimulus 1-2-3 – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Dof#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace tridimensionnel où les trois coefficients du tristimulus sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

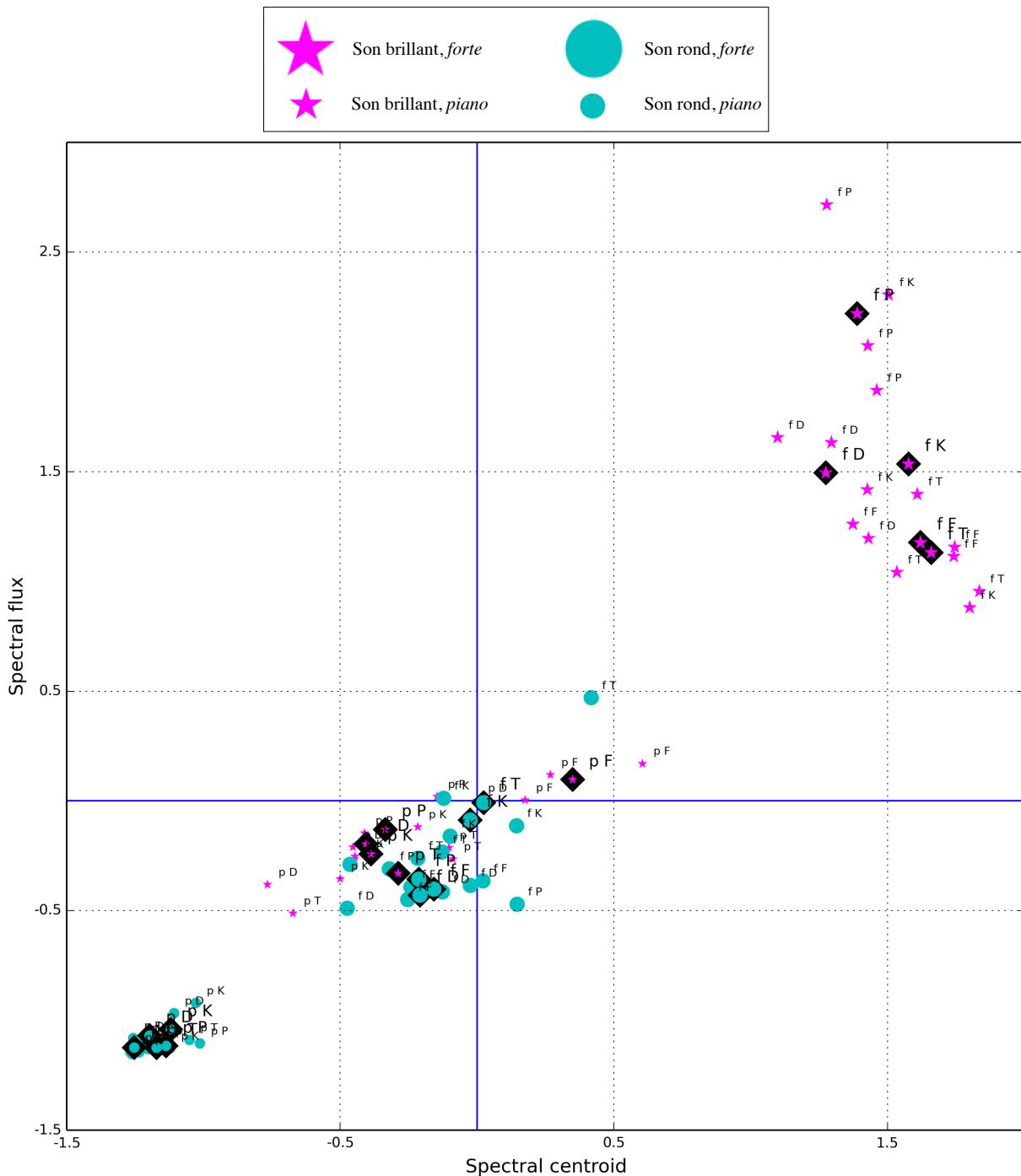


FIGURE 7.26 – Sons standard longs - Centroïde et flux – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde et le flux spectraux sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

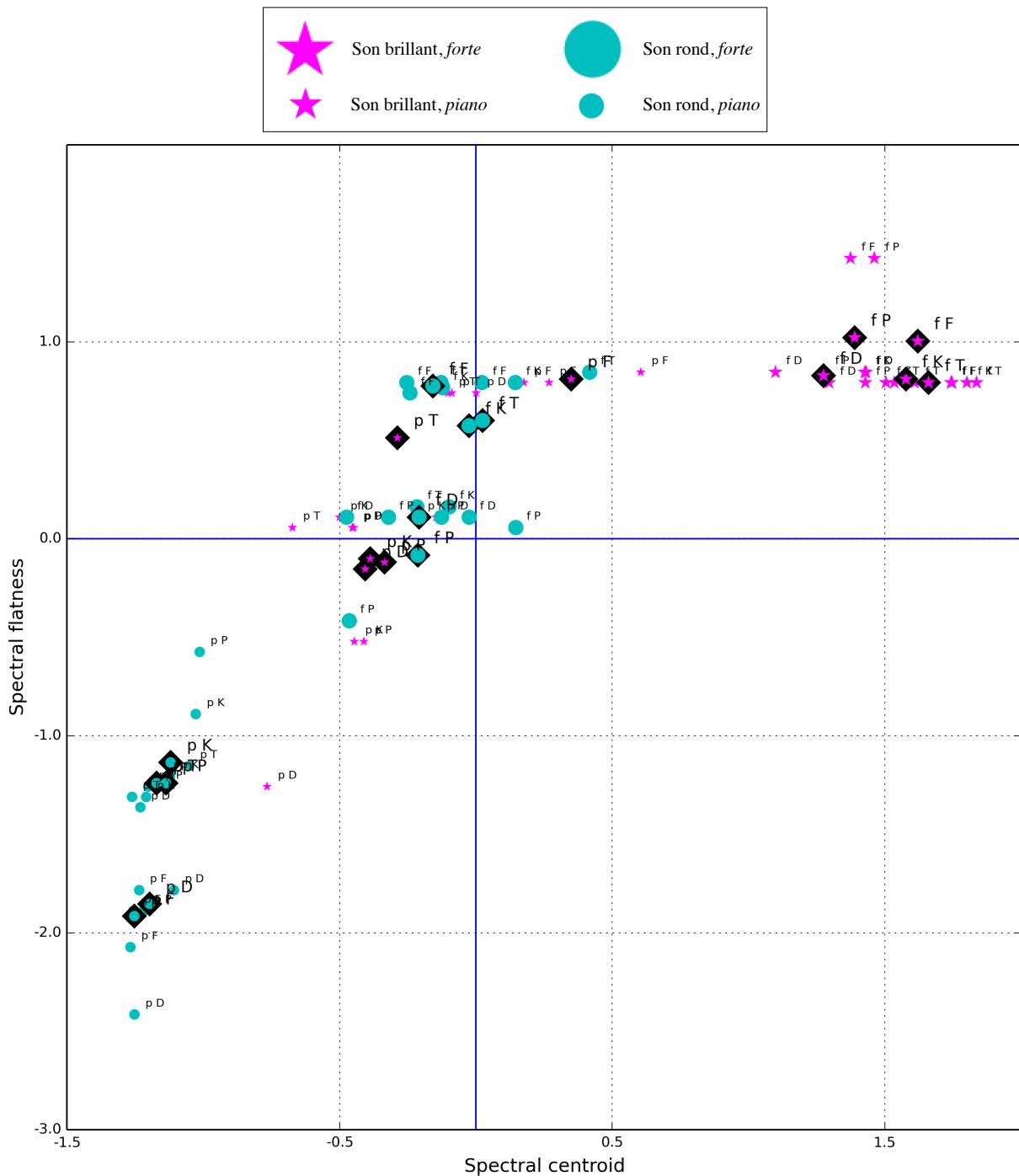


FIGURE 7.27 – Sons standard longs - Centroïde et aspect plat – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur Do# (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde spectral et l'aspect plat du spectre sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. [Retour au texte : cliquez ici.](#)

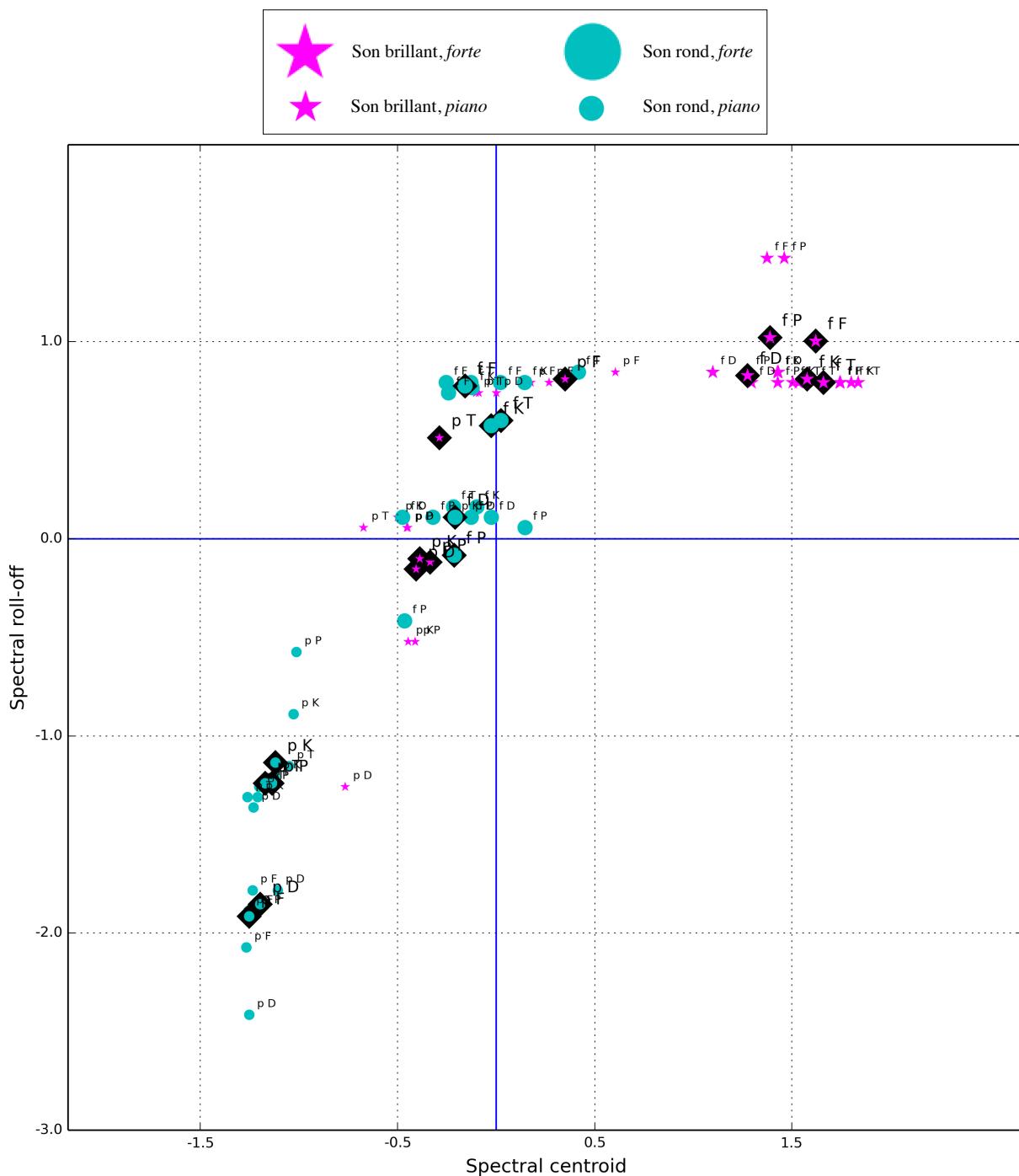


FIGURE 7.28 – Sons standard longs - Centroïde et roulement – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant forte, brillant piano, rond forte et rond piano), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde et le roulement spectraux sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte :** [cliquez ici](#).

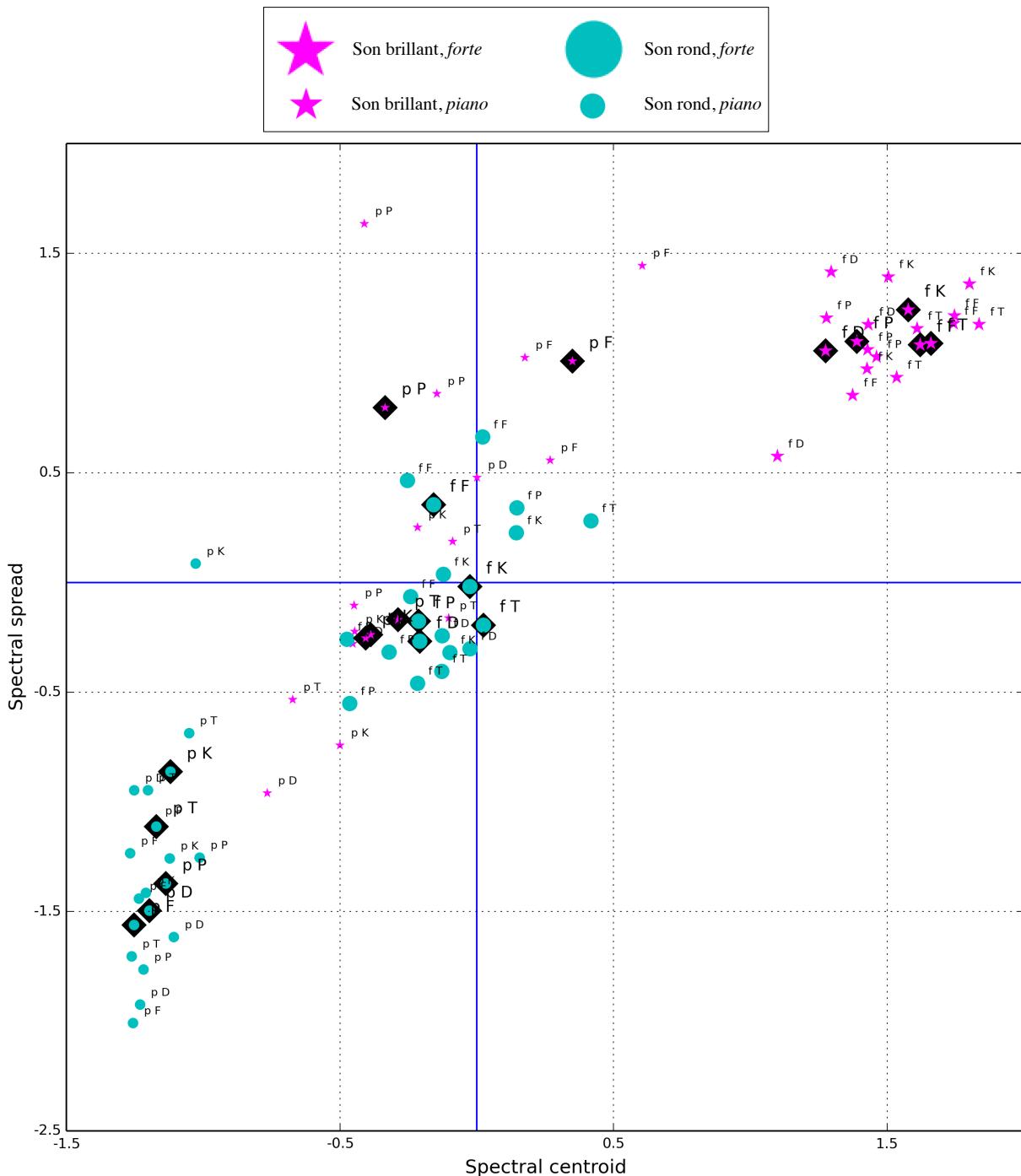


FIGURE 7.29 – Sons standard longs - Centroïde et étalement – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde et l'étalement spectraux sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte :** [cliquez ici](#).

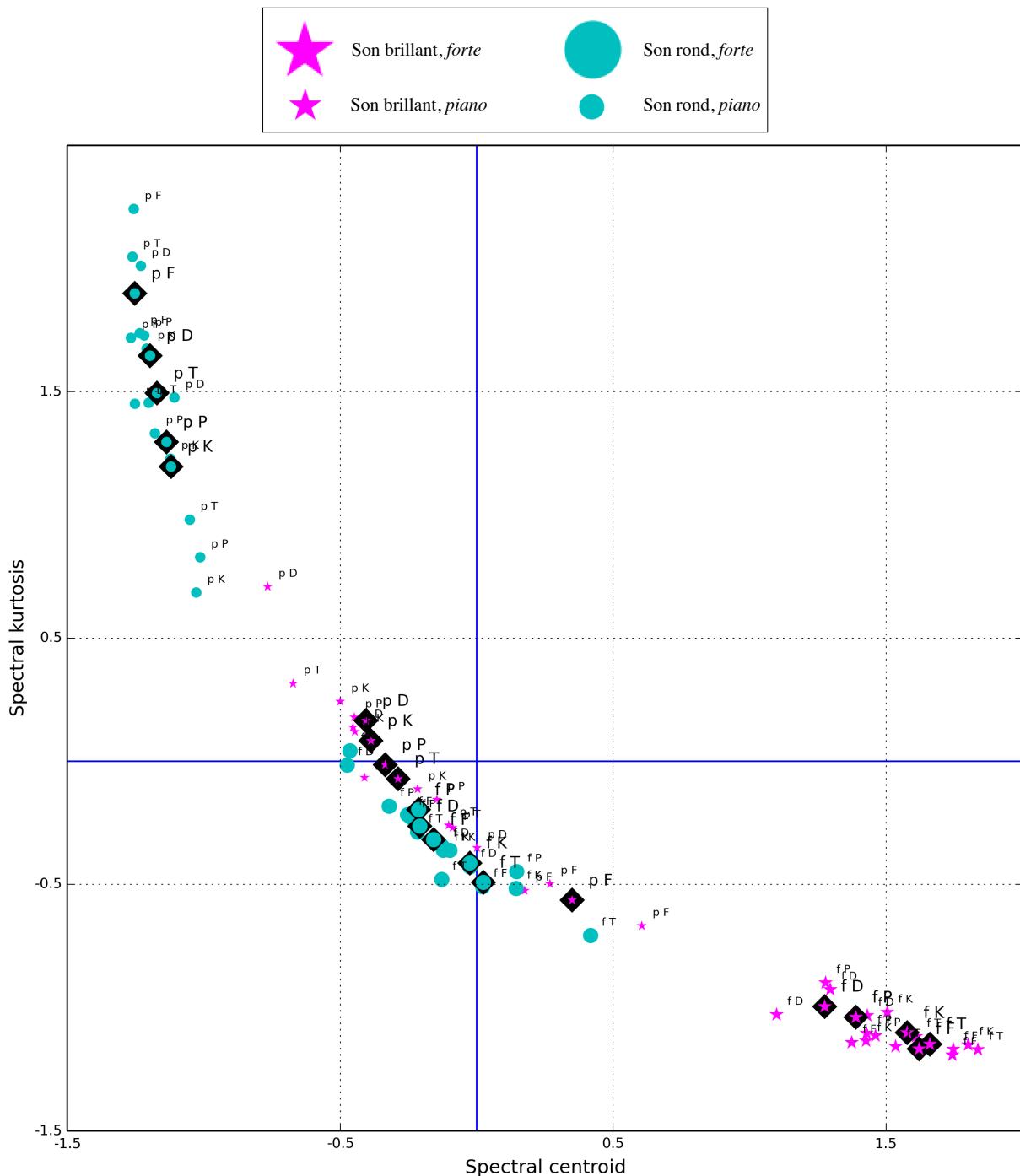


FIGURE 7.30 – Sons standard longs - Centroïde et aplatissement – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde et l'aplatissement spectraux sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

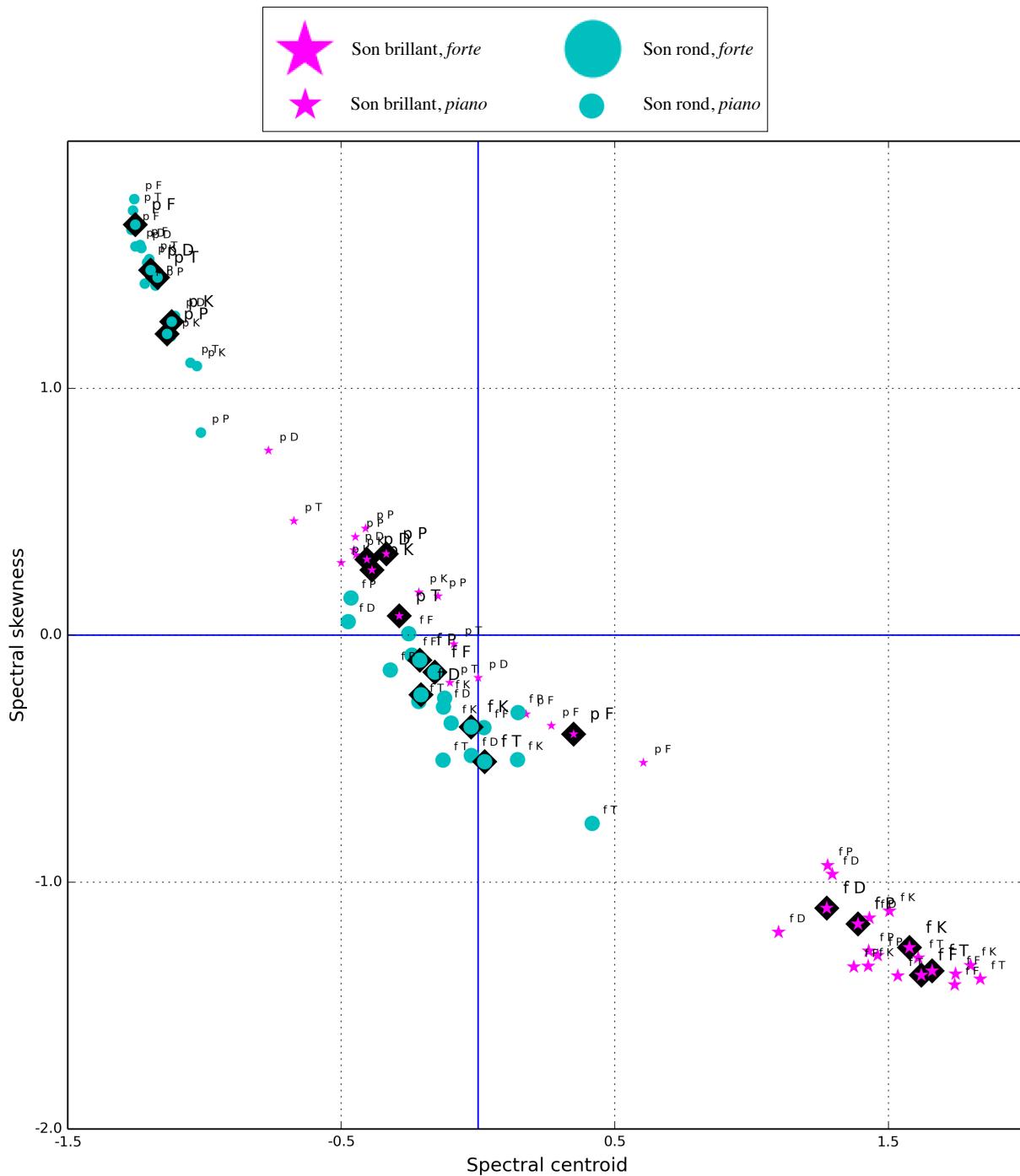


FIGURE 7.31 – Sons standard longs - Centroïde et asymétrie – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où le centroïde et l'asymétrie spectraux sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte :** [cliquez ici](#).

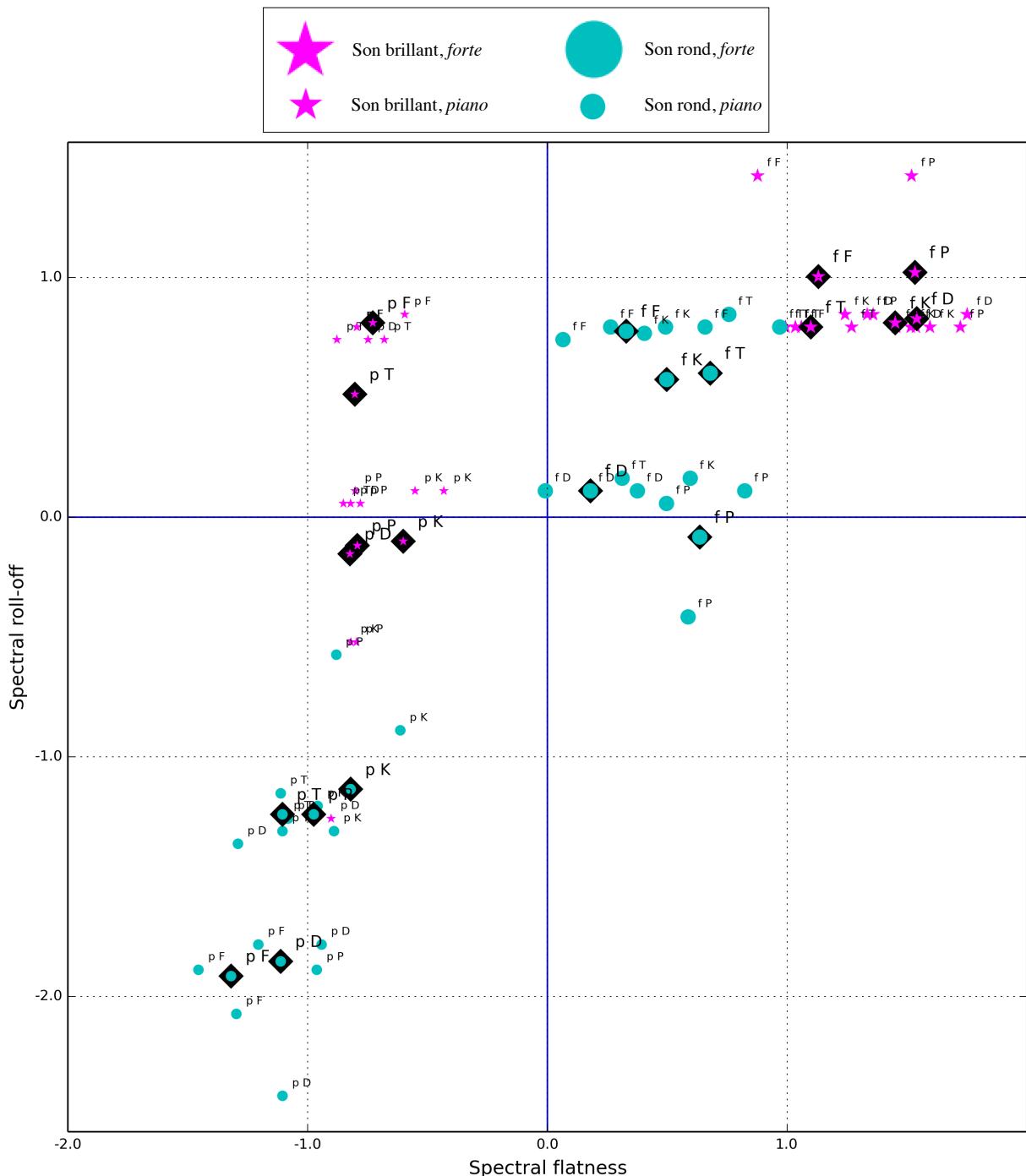


FIGURE 7.32 – Sons standard longs - Aspect plat et roulement – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant forte, brillant piano, rond forte et rond piano), d'une durée de 2 secondes et joués sur Do# (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où l'aspect plat du spectre et le roulement spectral sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. [Retour au texte : cliquez ici.](#)

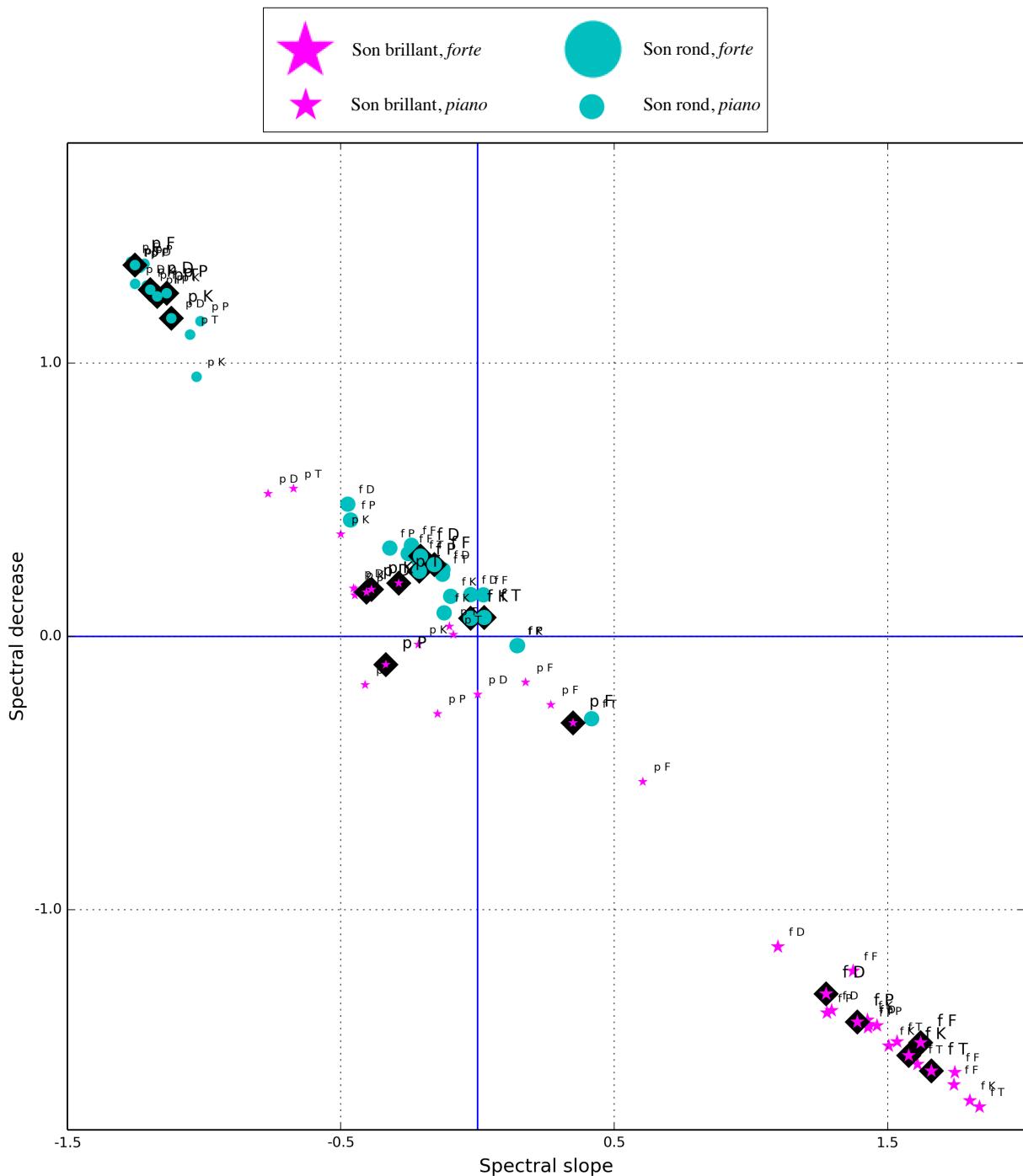


FIGURE 7.33 – Sons standard longs - Pente globale et décroissance – Quatre types de sons obtenus avec un mode de production standard (brillant *forte*, brillant *piano*, rond *forte* et rond *piano*), d'une durée de 2 secondes et joués sur *Do#* (278,44 Hz) sont représentés dans un espace 2D où la pente globale du spectre et la décroissance spectrale sont mis en relation. Les lettres majuscules désignent le type d'attaque (D,F,K,P et T), les lettres minuscules la nuance dynamique et les pictogrammes situés dans un losange noir, la moyenne pour chacune des catégories analysées. **Retour au texte : cliquez ici.**

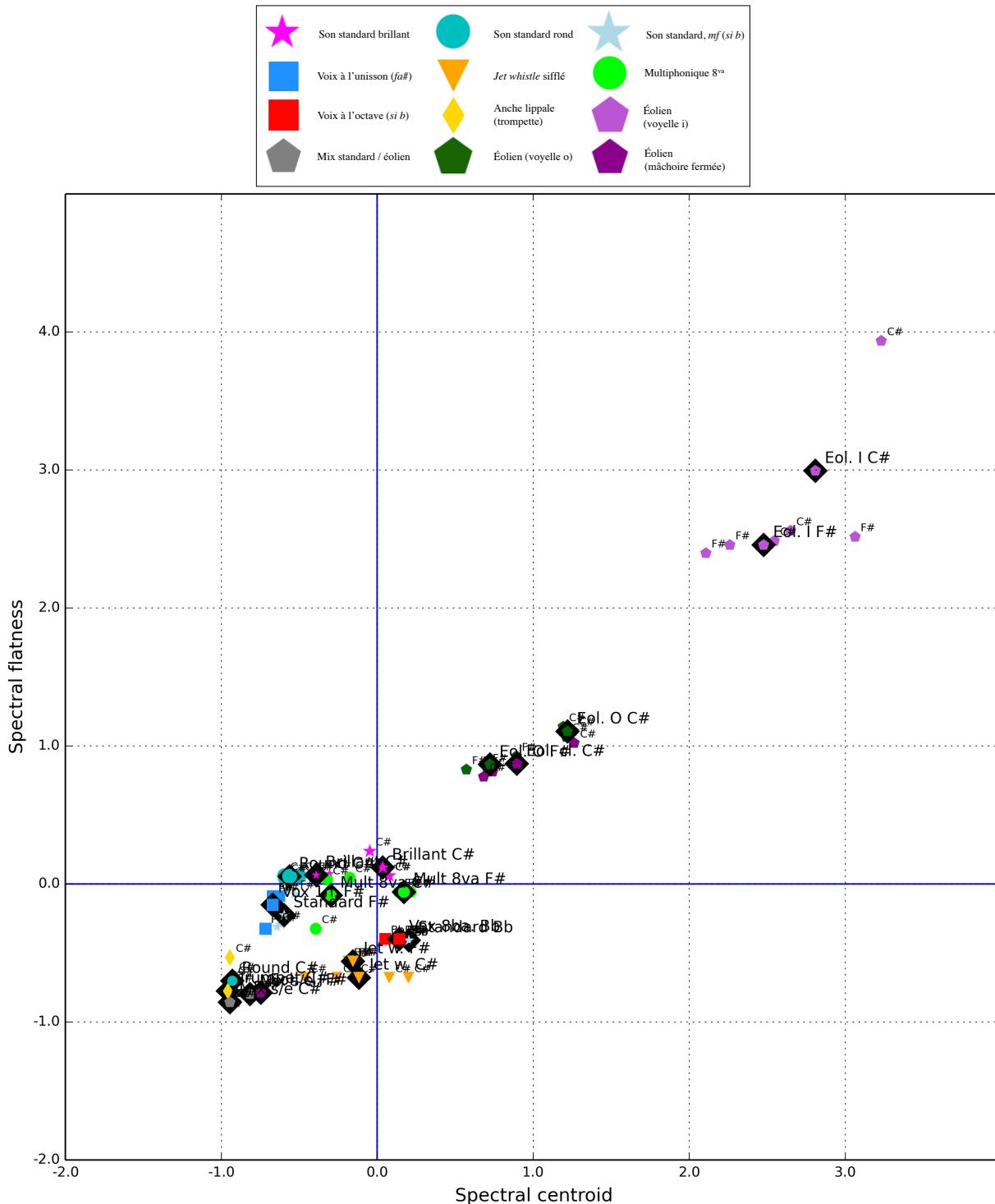


FIGURE 7.34 – Timbres à excitation continue - Centroïde et aspect plat – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde spectral et l'aspect plat du spectre sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

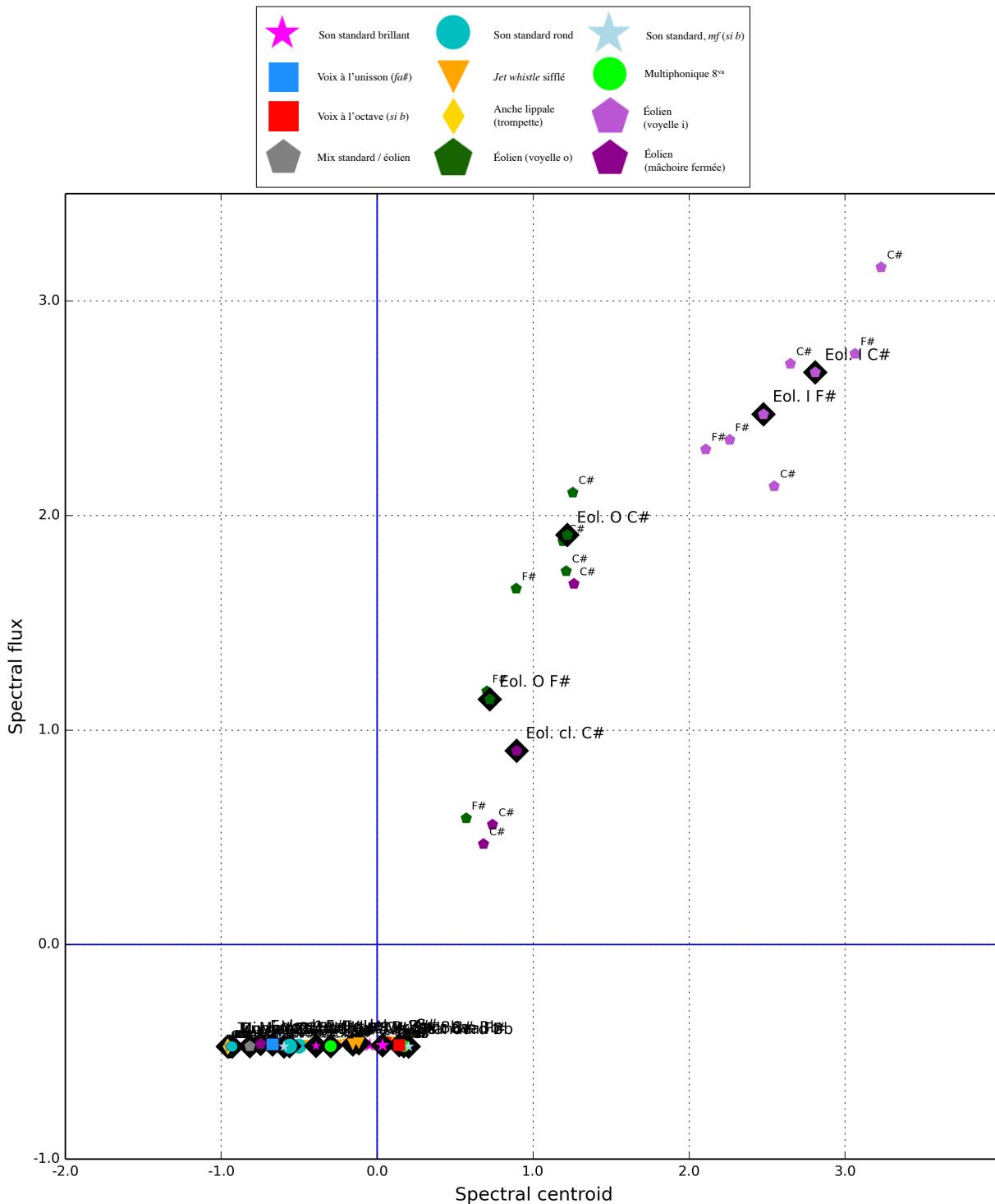


FIGURE 7.35 – Timbres à excitation continue - Centroïde et flux – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et le flux spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

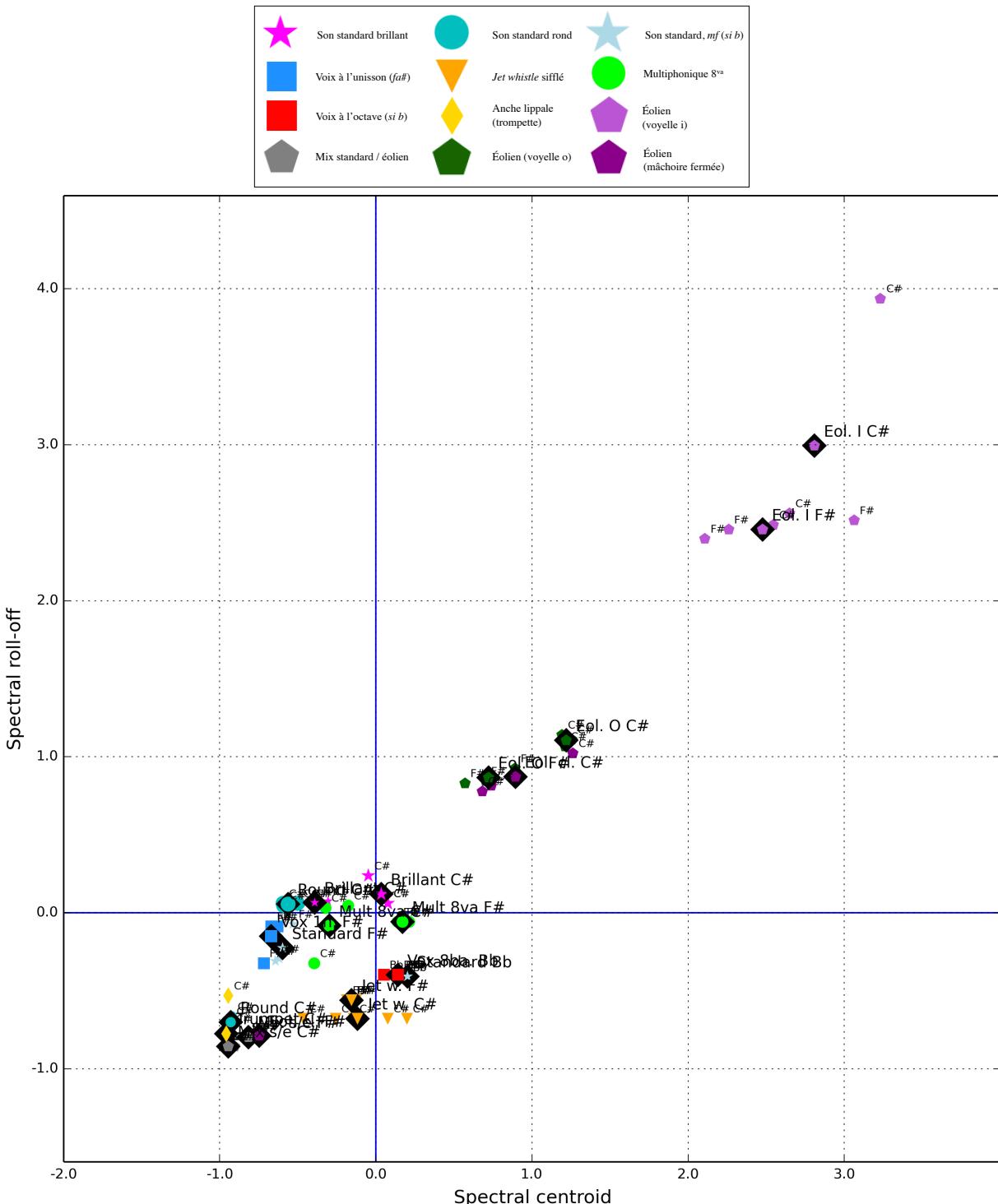


FIGURE 7.36 – Timbres à excitation continue - Centroïde et roulement – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et le roulement spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

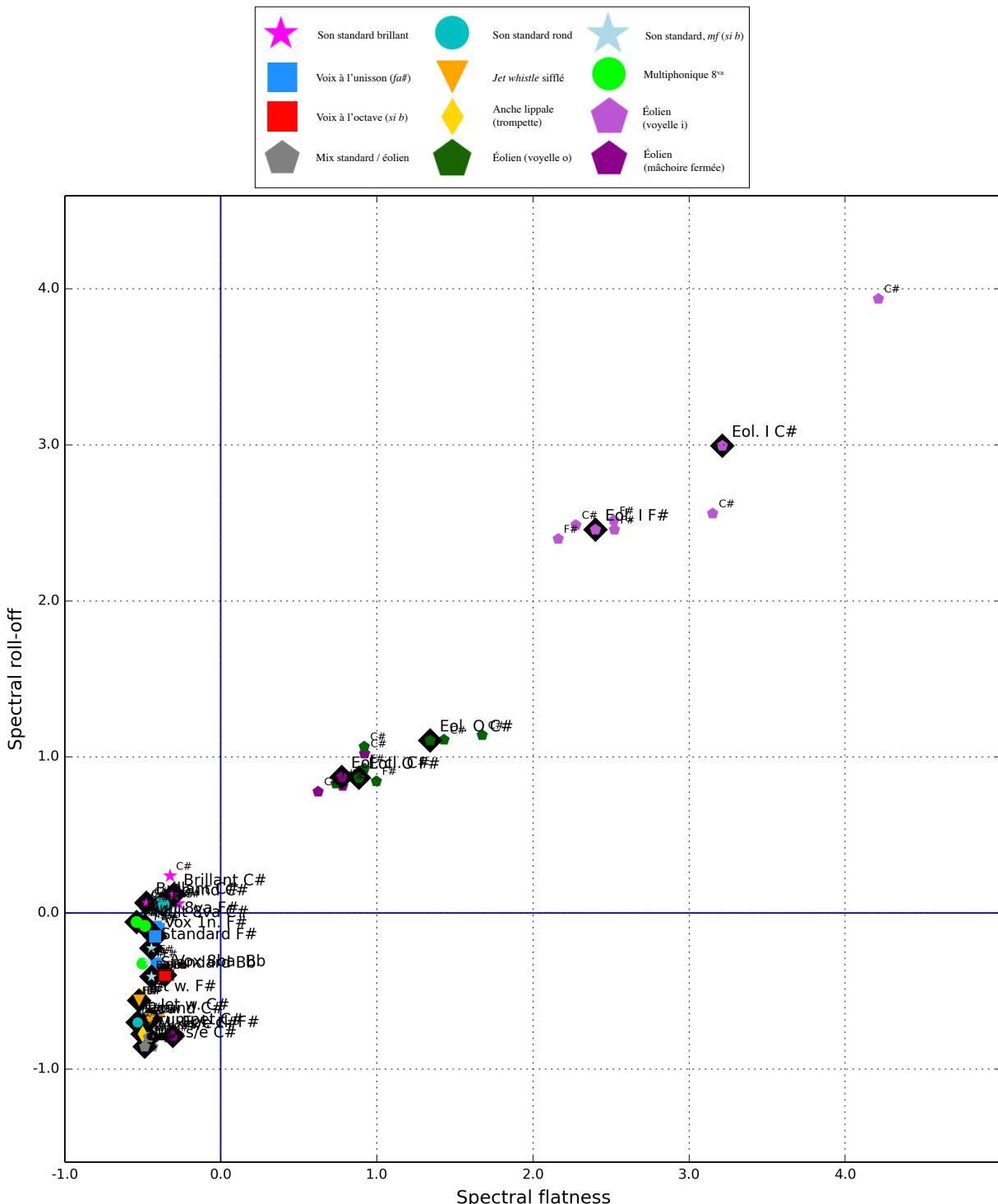


FIGURE 7.37 – Timbres à excitation continue - Aspect plat et roulement – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où l'aspect plat du spectre et le roulement spectral sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici**.

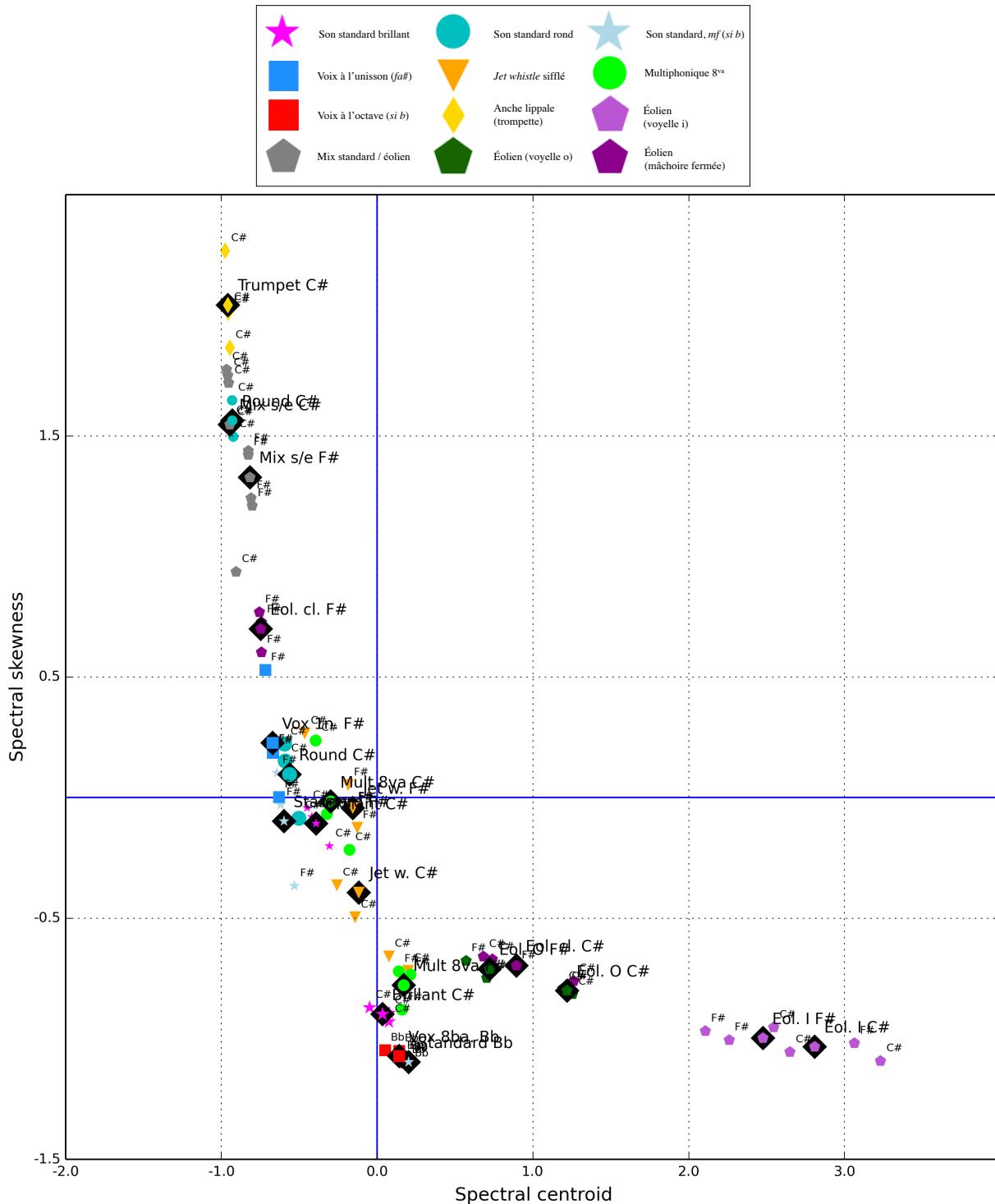


FIGURE 7.38 – Timbres à excitation continue - Centroïde et asymétrie – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et l'asymétrie spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

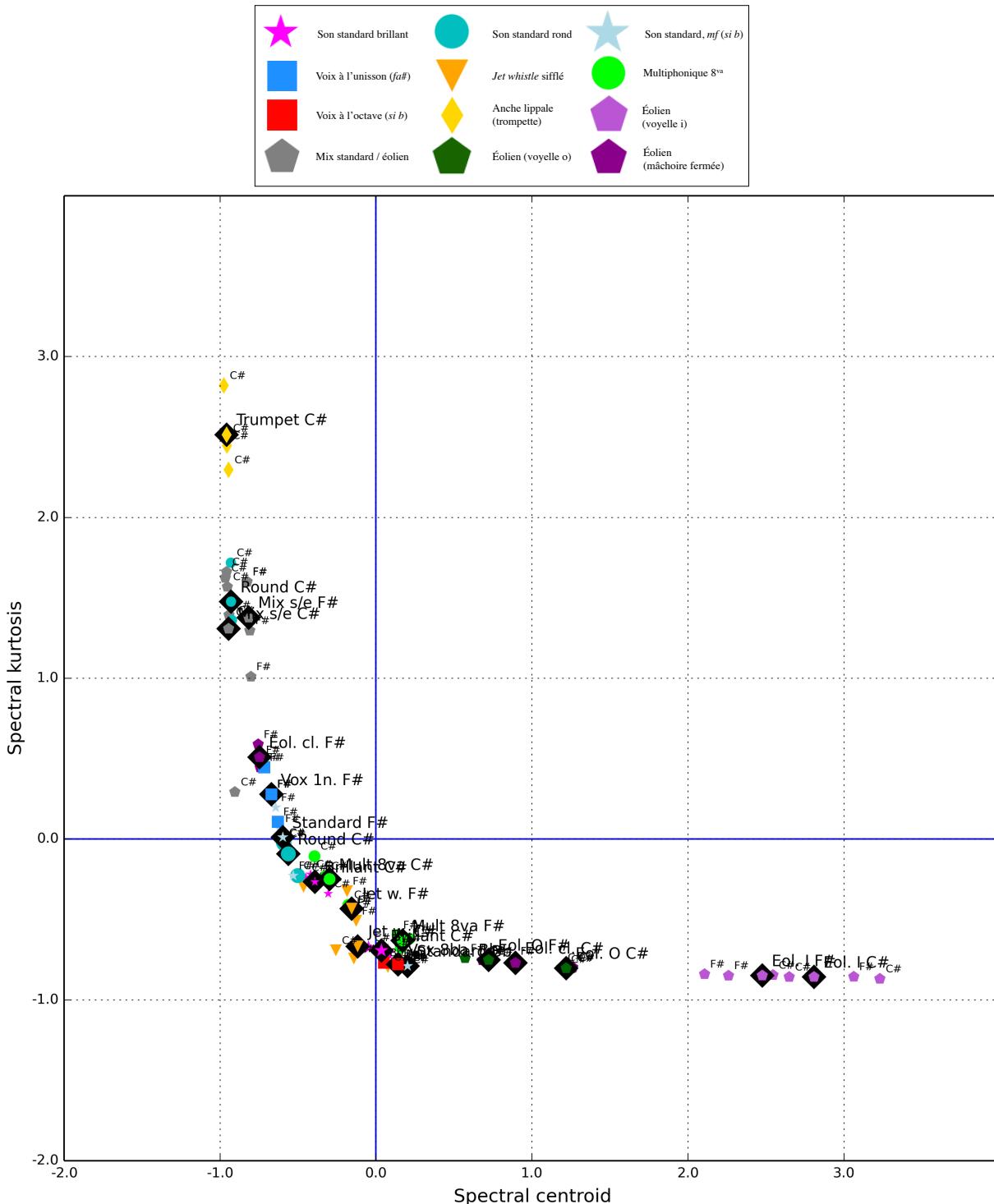


FIGURE 7.39 – Timbres à excitation continue - Centroïde et aplatissement – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et l'aplatissement spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

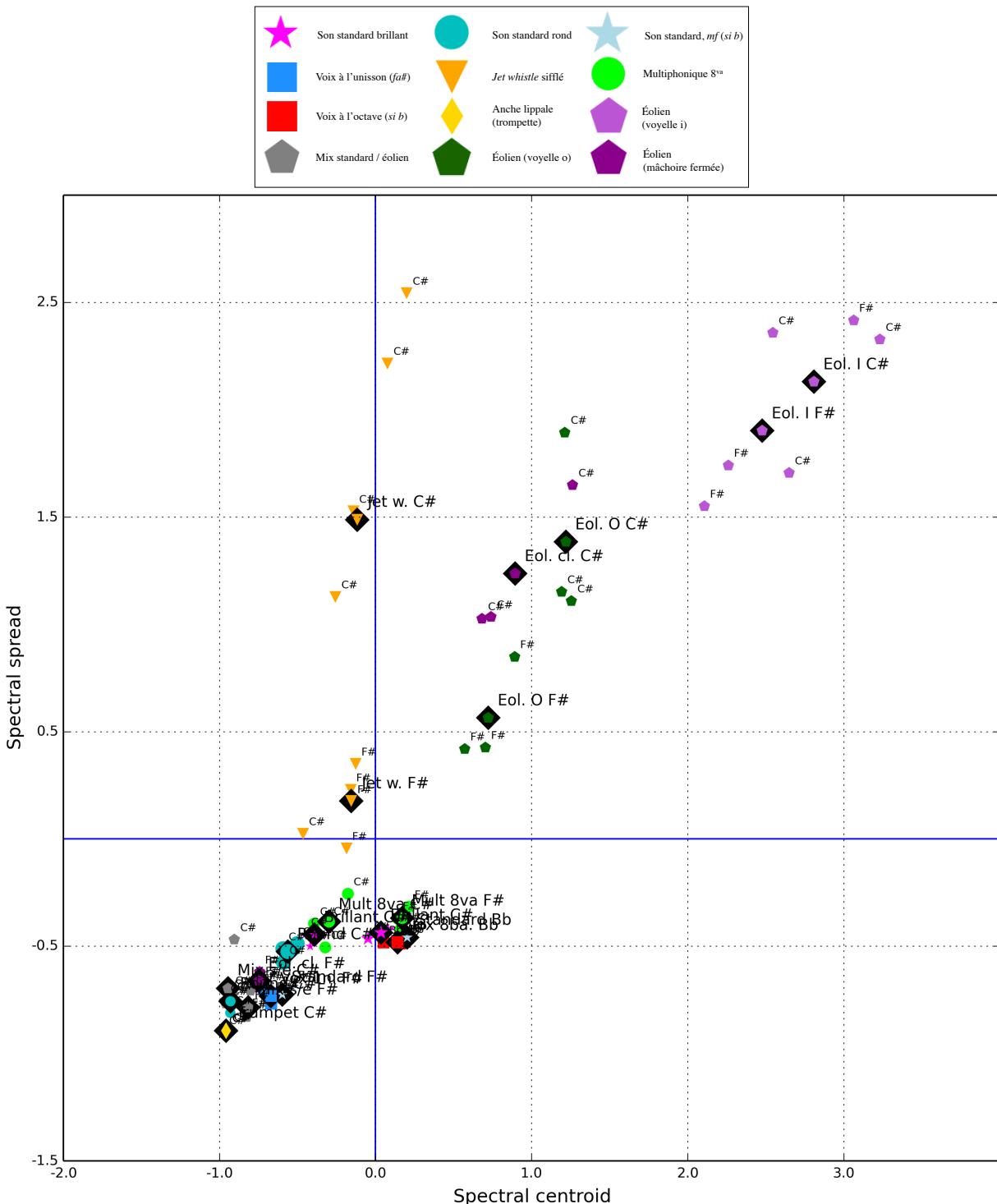


FIGURE 7.40 – Timbres à excitation continue - Centroïde et étalement – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et l'étalement spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici**.

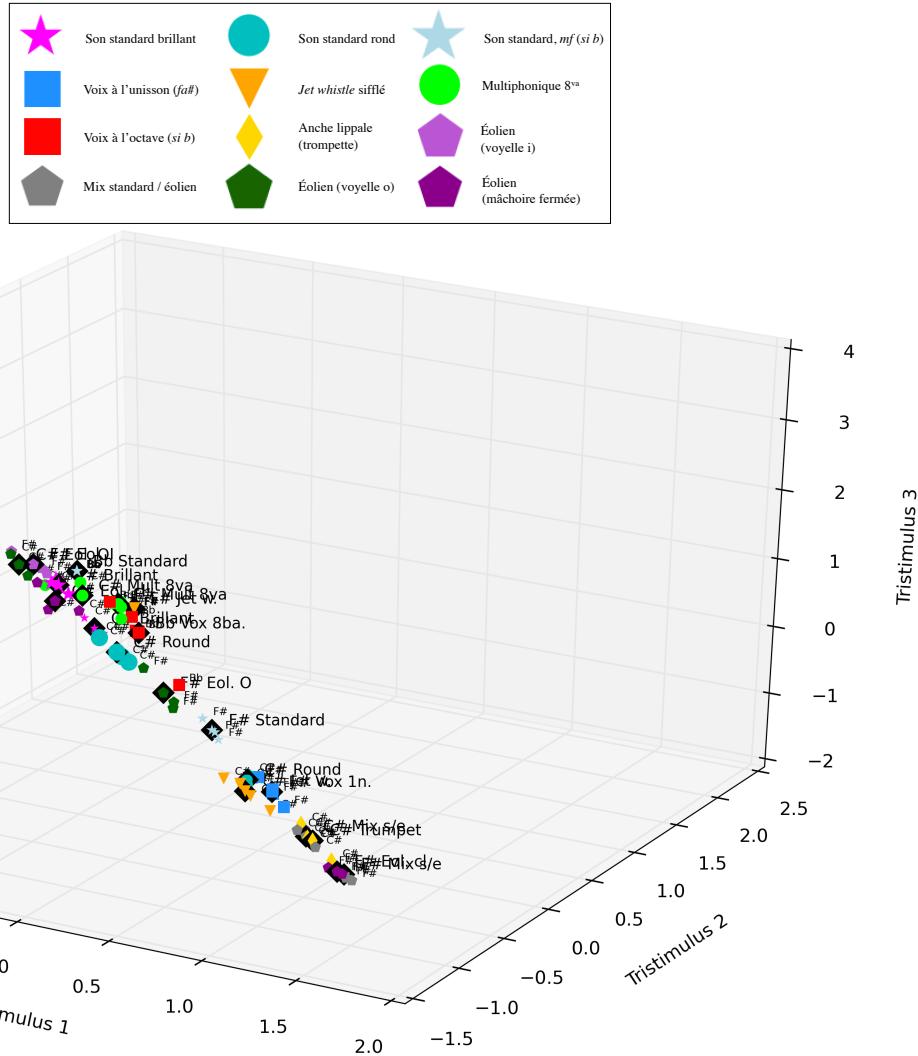


FIGURE 7.41 – Timbres à excitation continue - Tristimulus 1-2-3 – Un groupe de 21 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons éoliens sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz) avec les voyelles [i], [o] et avec la mâchoire fermée, *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace tridimensionnel où les trois coefficients du tristimulus sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

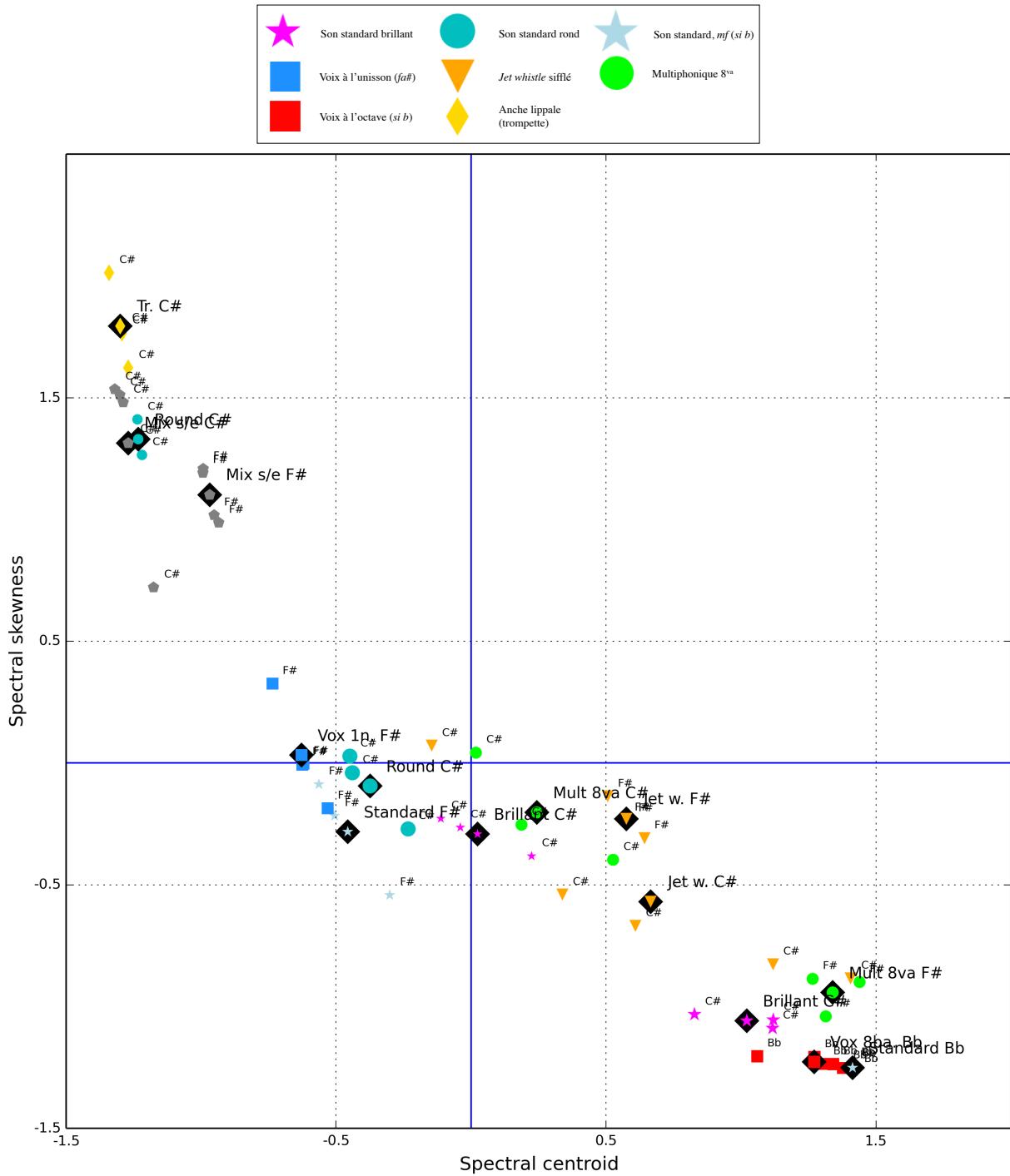


FIGURE 7.42 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et asymétrie – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et l'asymétrie spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. Retour au texte : [cliquez ici](#).

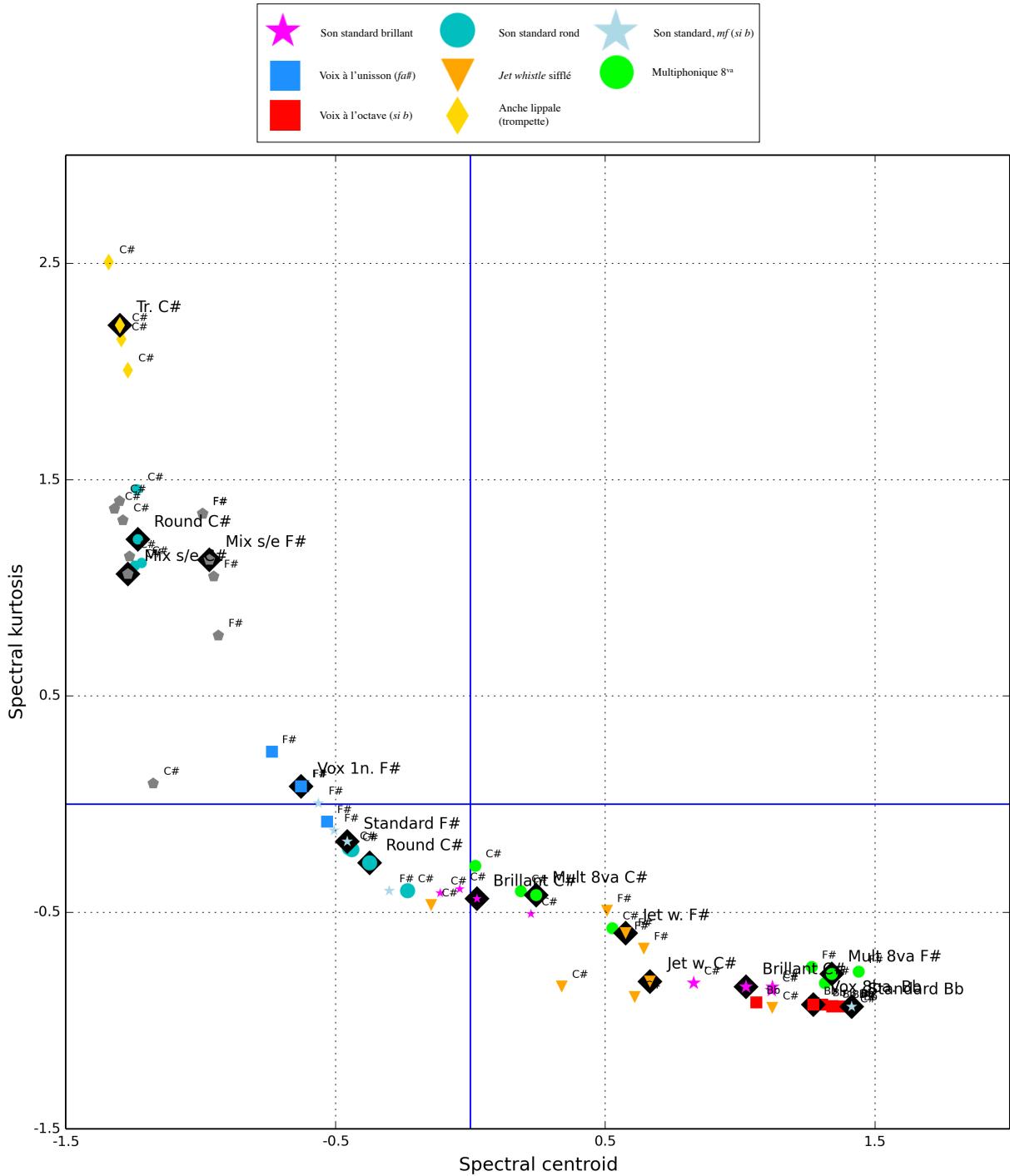


FIGURE 7.43 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et aplatissement – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *D*o# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *D*o# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *D*o# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *D*o# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *D*o# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *D*o# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et l'aplatissement spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

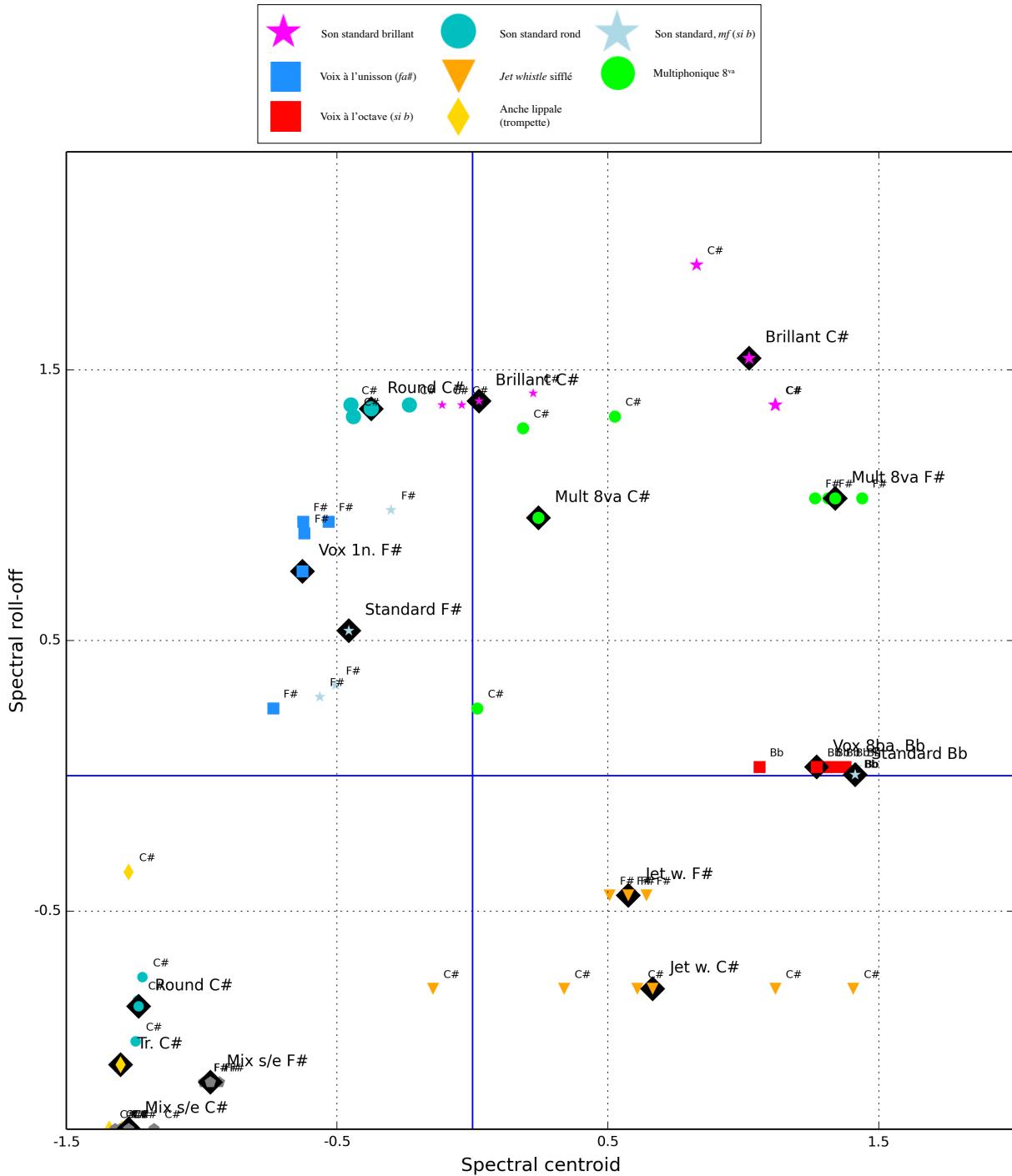


FIGURE 7.44 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et roulement – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et le roulement spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. Retour au texte : [cliquez ici](#).

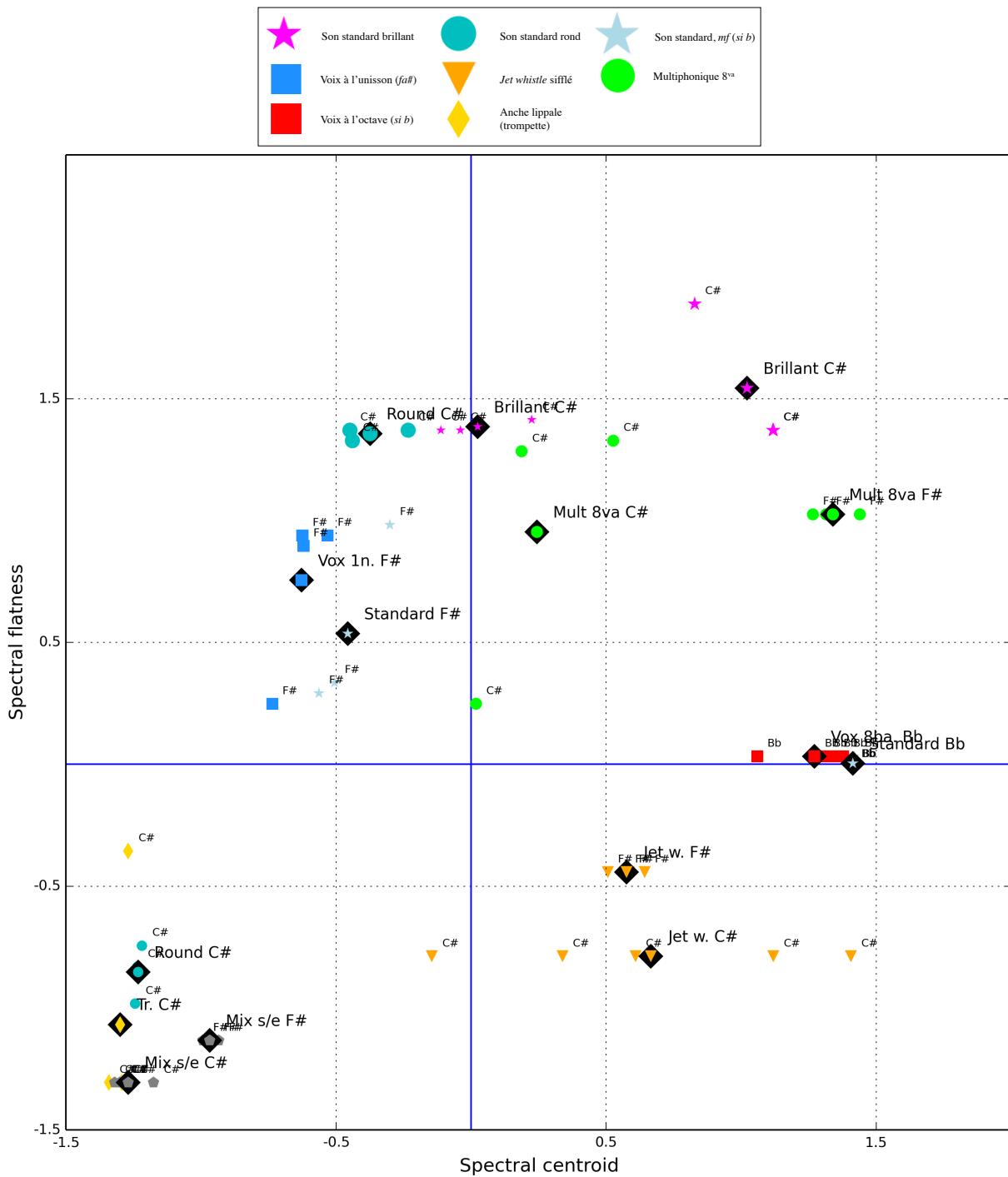


FIGURE 7.45 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et aspect plat – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolian sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde spectral et l'aspect plat du spectre sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. Retour au texte : [cliquez ici](#).

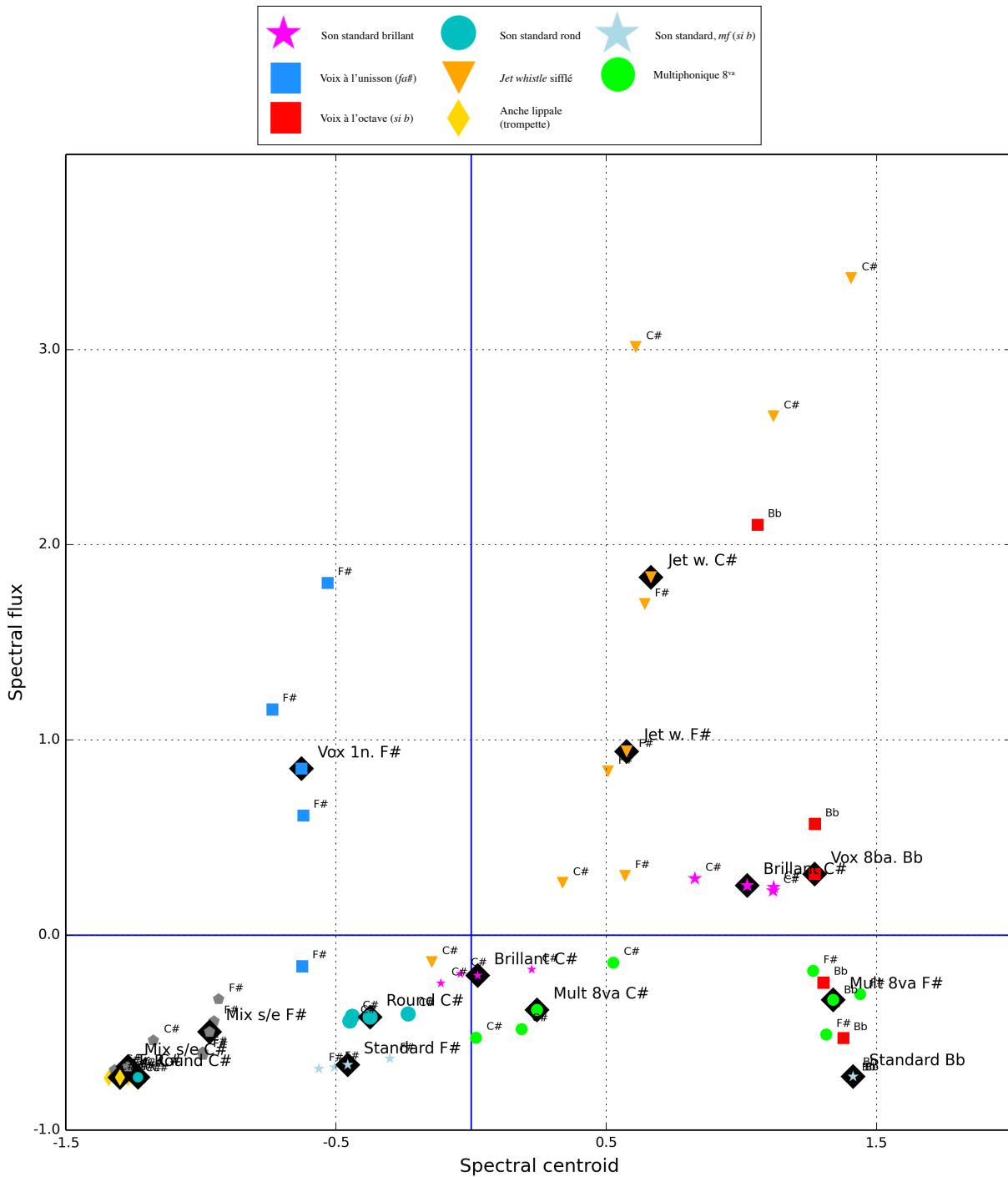


FIGURE 7.46 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Centroïde et flux – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où le centroïde et le flux spectraux sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. Retour au texte : [cliquez ici](#).

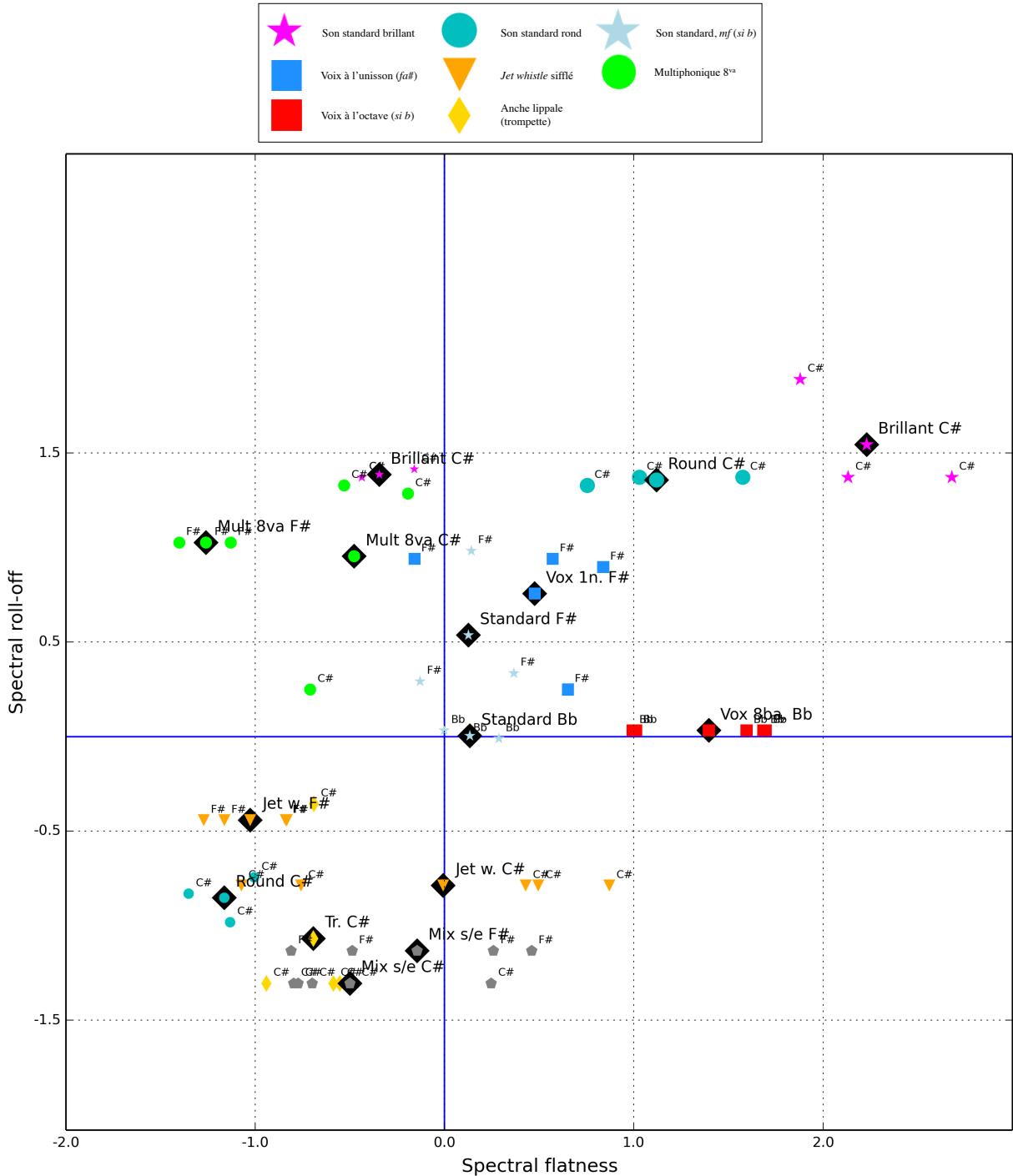


FIGURE 7.47 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Aspect plat et roulement – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolian sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace bidimensionnel où l'aspect plat du spectre et le roulement spectral sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

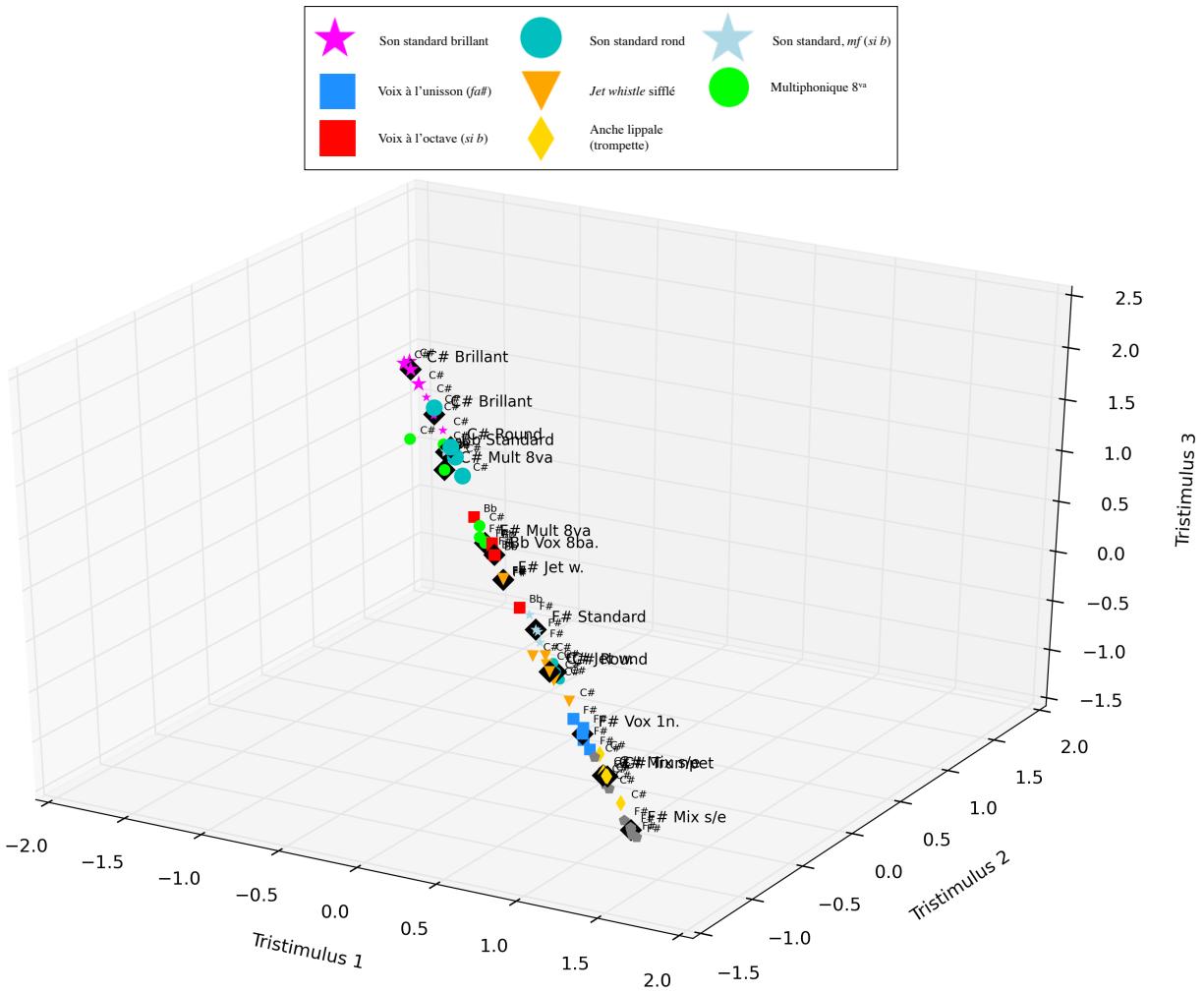


FIGURE 7.48 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Tristimulus 1-2-3 – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do#* (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do#* (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do#* (278,44 Hz) et sur *Fa#* (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa#* (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa#* (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace tridimensionnel où les trois coefficients du tristimulus sont mis en relation. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

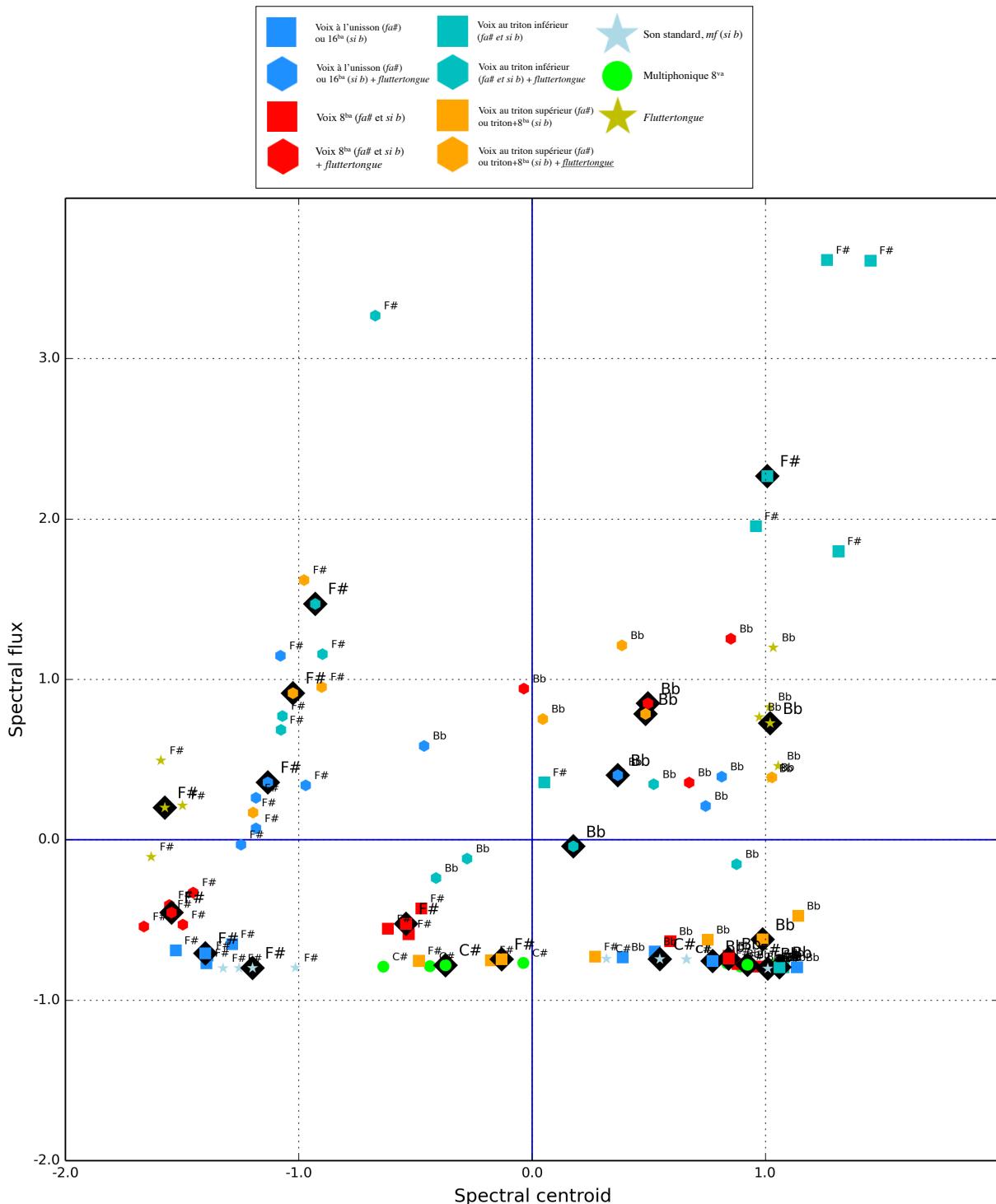


FIGURE 7.49 – Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et flux spectral – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le centroïde et le flux spectraux sont mis en relation. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

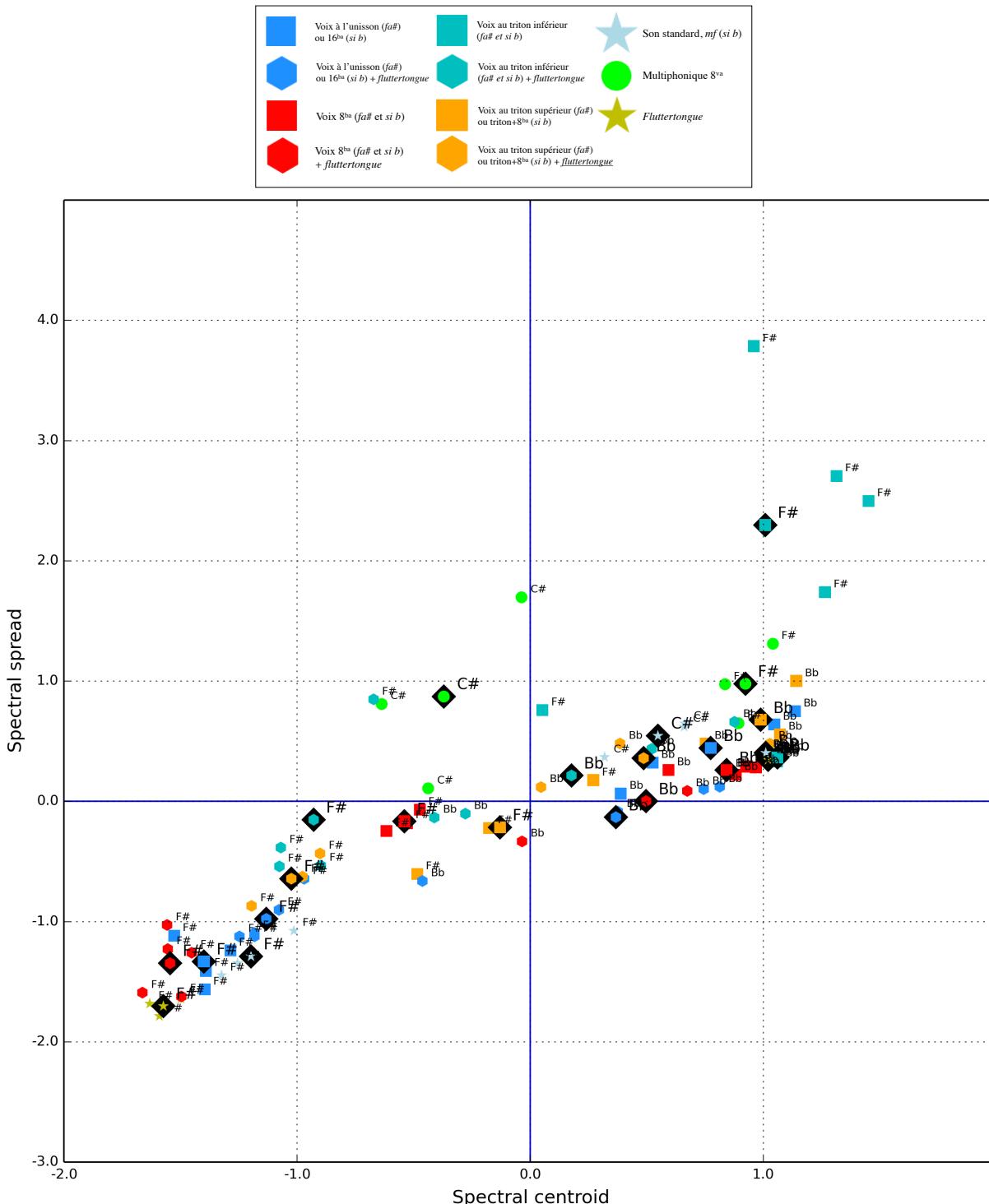


FIGURE 7.50 – Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et étalement – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le centroïde et l'étalement spectraux sont mis en relation. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *flutter tongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *flutter tongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *flutter tongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *flutter tongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

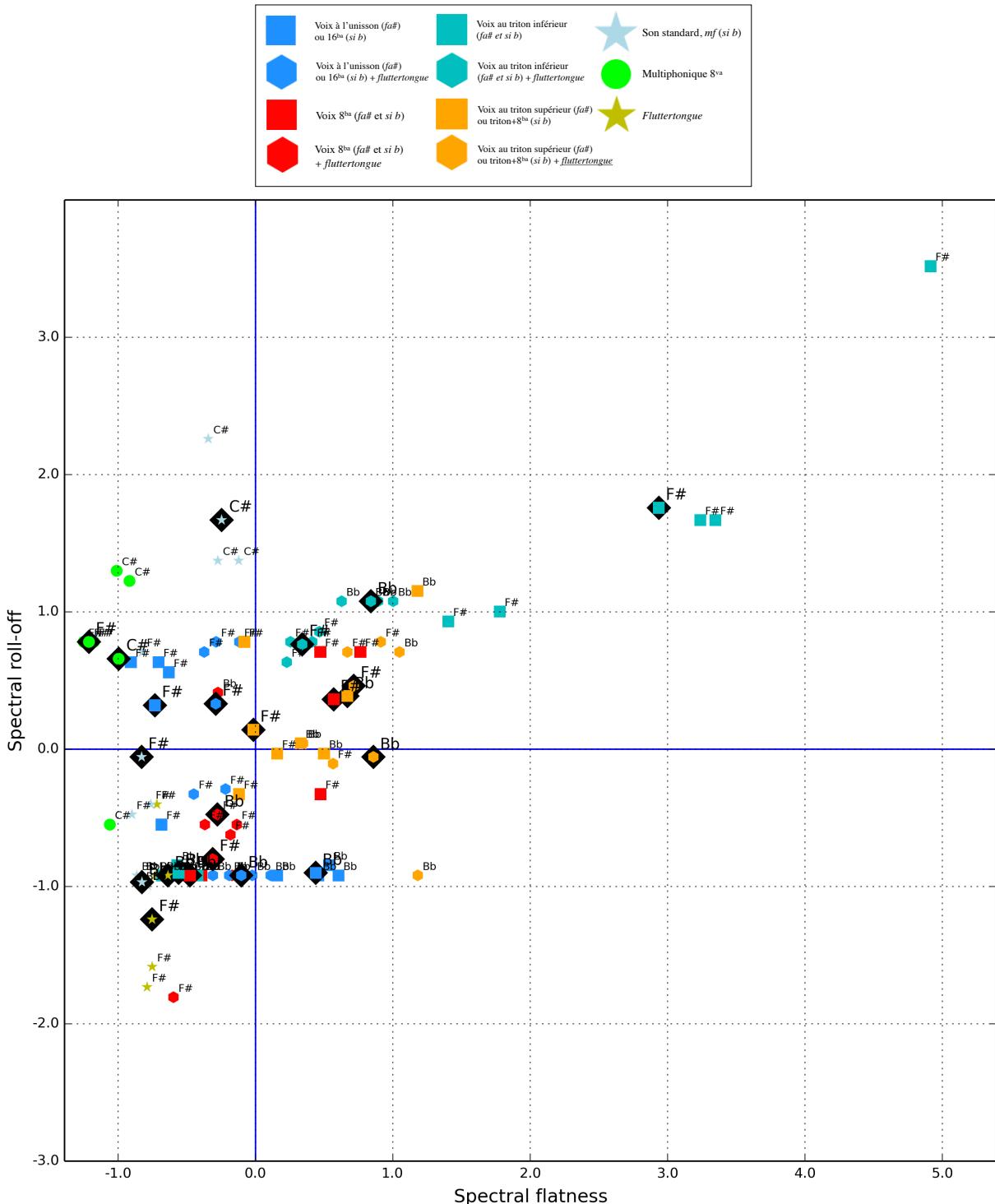


FIGURE 7.51 – Techniques de modulation et polyphonie - Aspect plat et roulement – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où l'aspect plat du spectre et le roulement spectral sont mis en relation. Sur *Dō*# (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa*# (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

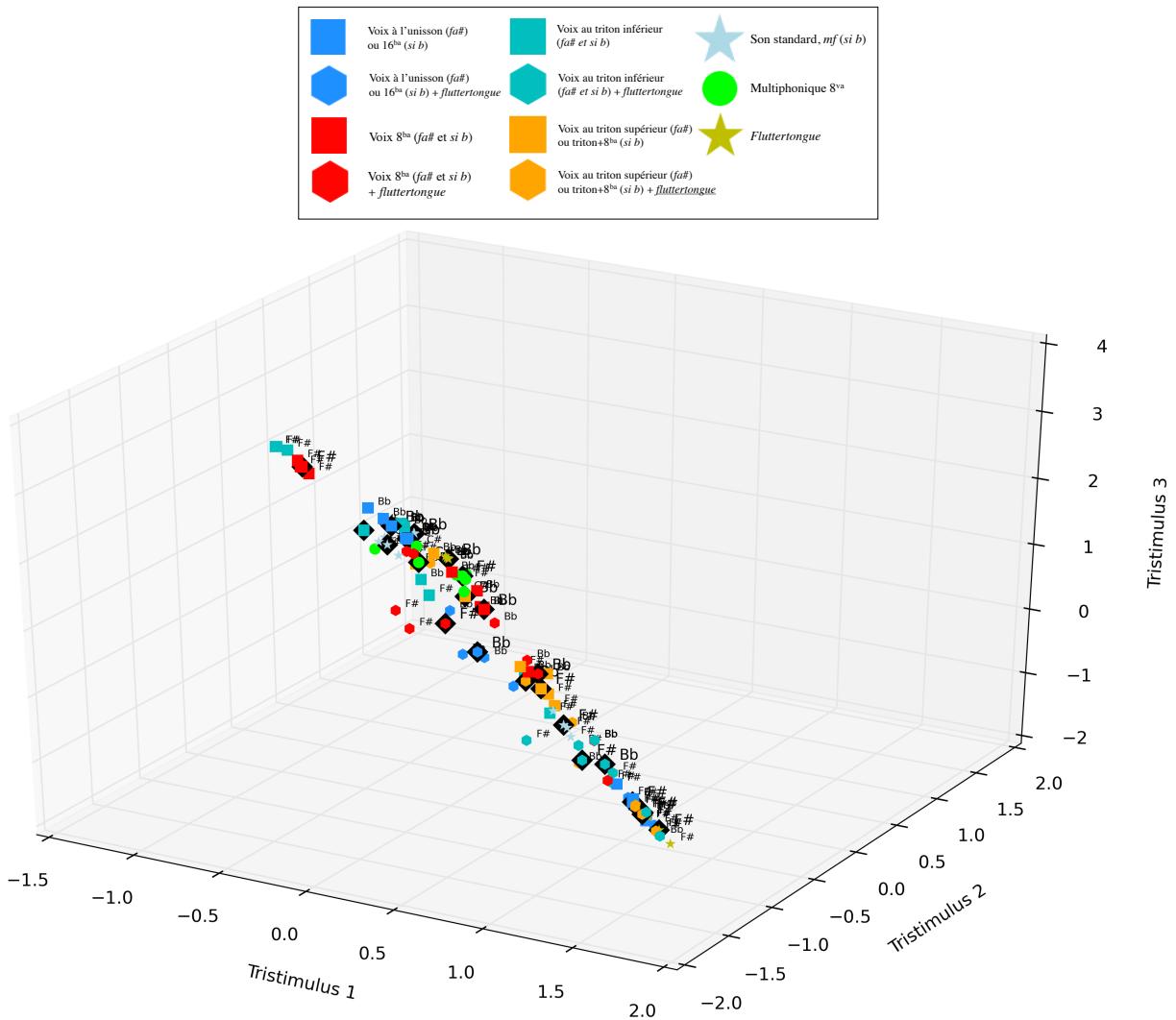


FIGURE 7.52 – Techniques de modulation et polyphonie - Tristimulus 1-2-3 – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace tridimensionnel où les trois coefficients du tristimulus sont mis en relation. Sur *Dō*# (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa*# (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

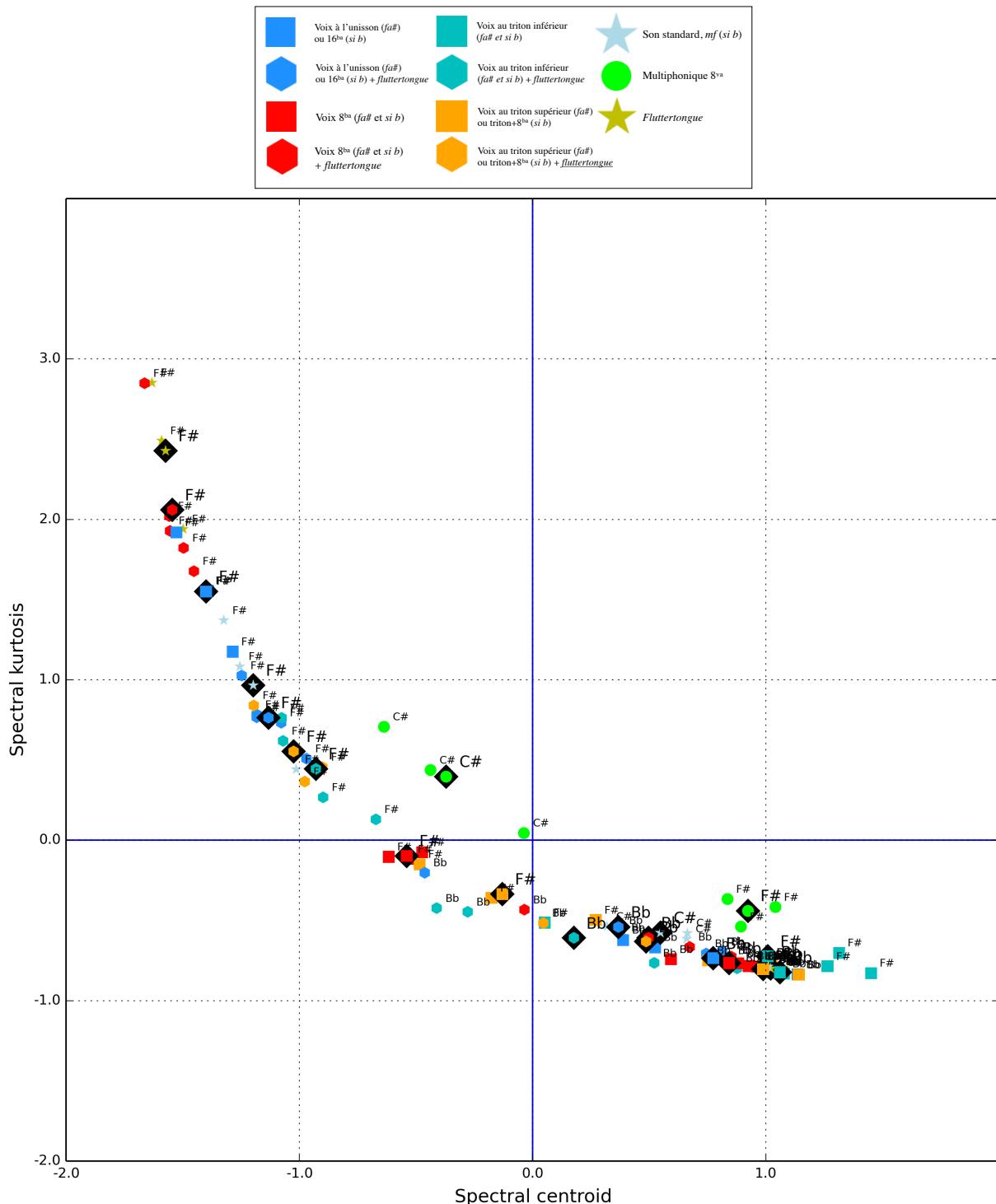


FIGURE 7.53 – Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et aplatissement – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le centroïde et l’aplatissement spectraux sont mis en relation. Sur *Do* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l’octave. Sur *Fa*# (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l’octave, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l’unisson, à l’octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *fluttertongue*, sons avec voix à l’octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *fluttertongue* ET voix à l’octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l’intérieur d’un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

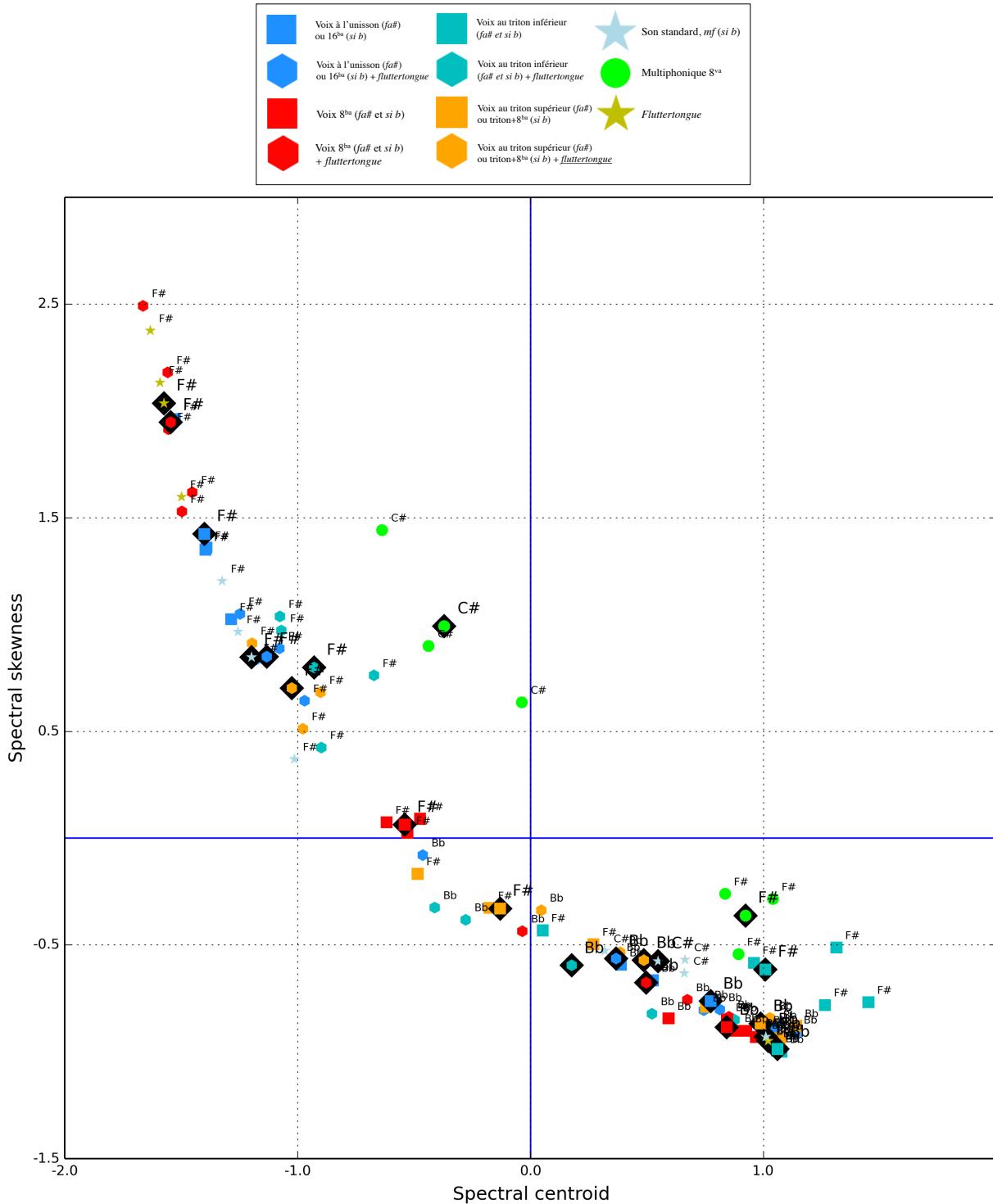


FIGURE 7.54 – Techniques de modulation et polyphonie - Centroïde et asymétrie – Un groupe de 23 types de techniques polyphoniques et/ou de modulation est représenté dans cet espace bidimensionnel où le centroïde et l'asymétrie spectraux sont mis en relation. Sur *Do#* (278,44 Hz) : son standard et son avec multiphonique à l'octave. Sur *Fa#* (371,68 Hz) : son standard, son avec multiphonique à l'octave, son avec *flattertongue*, sons avec voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur, et sons avec *flattertongue* ET voix à l'unisson, à l'octave inférieure, au triton inférieur et au triton supérieur. Sur *Si b* (936,57 Hz) : son standard, son avec *flattertongue*, sons avec voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas, et sons avec *flattertongue* ET voix à l'octave inférieure, à la quinzième inférieure, au triton inférieur et à la note correspondante une octave plus bas. Les pictogrammes représentés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chacune des catégories de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

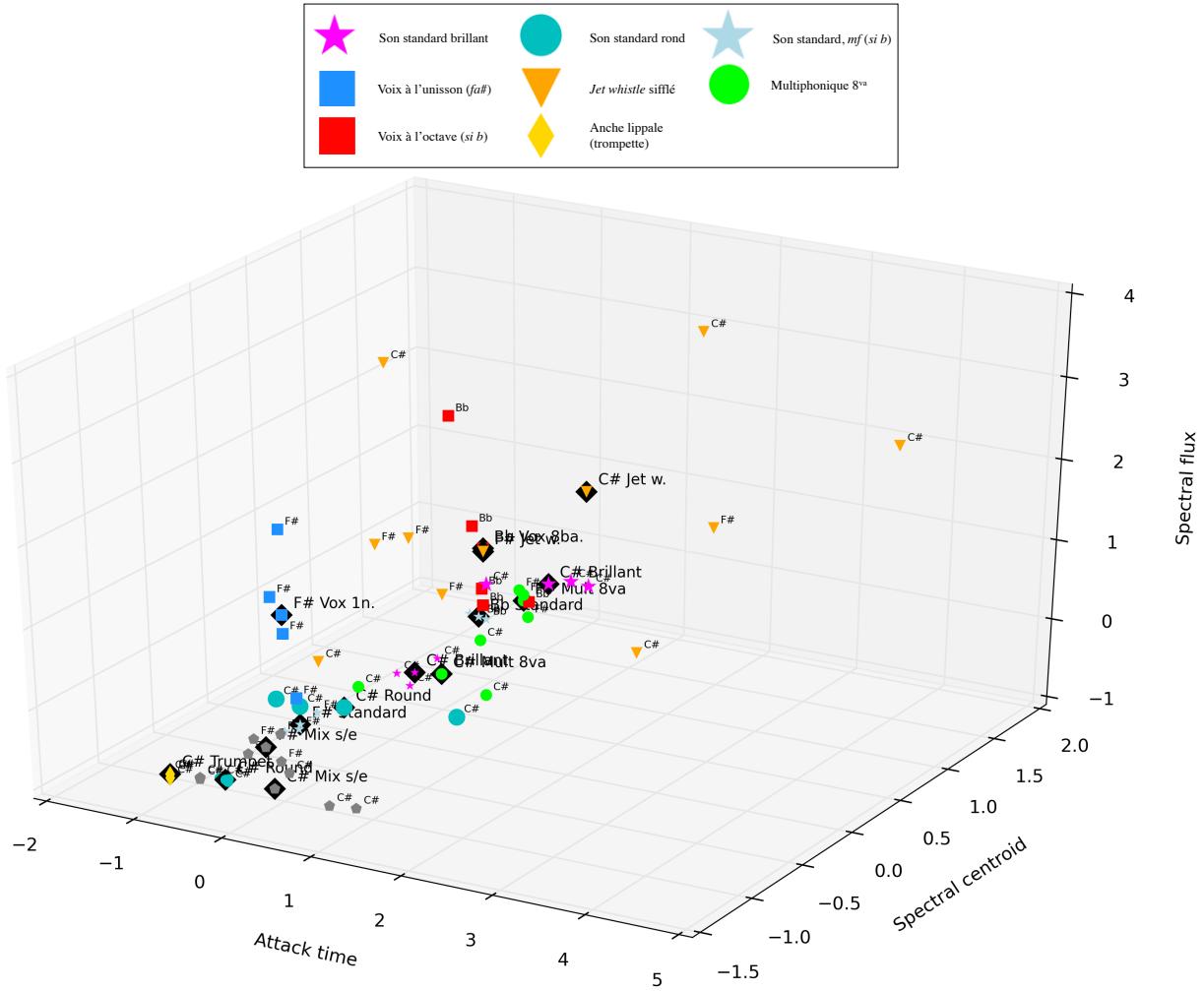


FIGURE 7.55 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Flux spectral – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace tridimensionnel où trois descripteurs corrélés à des dimensions perceptives sont mis en relation : le temps d'attaque, le centroïde spectral, et le flux spectral. Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

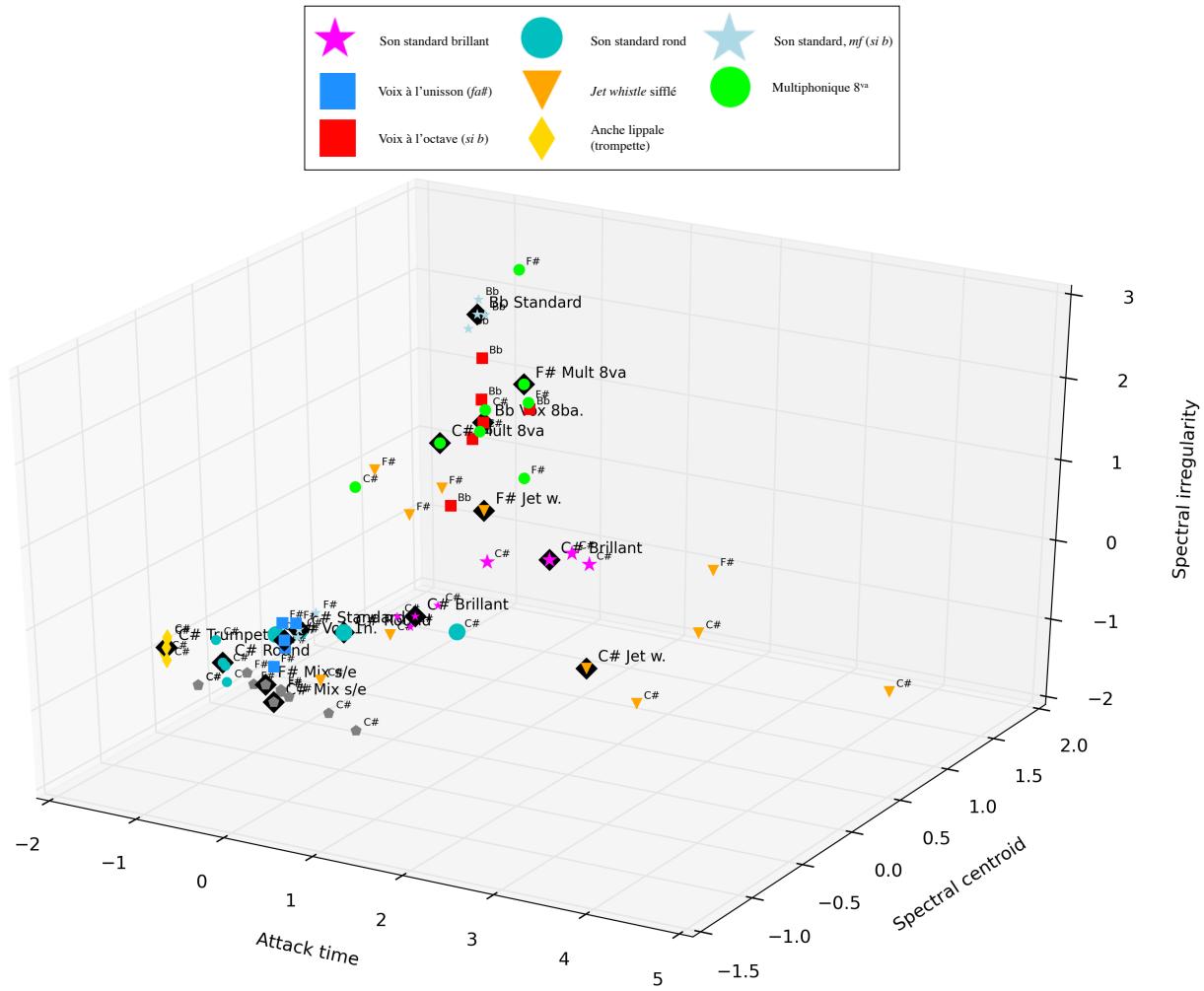


FIGURE 7.56 – Timbres à excitation continue (sans éoliens) - Irrégularité spectrale – Un groupe de 15 types de sons à excitation continue d'une durée de 2 secondes (son de trompette sur *Do*# (278,44 Hz), sons brillants *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), sons ronds *forte* et *piano* sur *Do*# (278,44 Hz), *jet whistle* sifflés sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons mixtes standard/éolien sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), multiphonique à l'octave sur *Do*# (278,44 Hz) et sur *Fa*# (371,68 Hz), sons standard *mf* sur *Fa*# (371,68 Hz) et sur *Si b* (936,57 Hz), sons avec la voix à l'unisson sur *Fa*# (371,68 Hz) et sons avec la voix à l'octave inférieure sur *Si b* (936,57 Hz)) est représenté dans un espace tridimensionnel où trois descripteurs corrélés à des dimensions perpectives sont mis en relation : le temps d'attaque, le centroïde spectral, et l'irrégularité spectrale (déviation harmonique). Les pictogrammes dessinés sur des losanges noirs représentent la moyenne pour chacun des groupes de sons analysés. **Retour au texte : cliquez ici.**

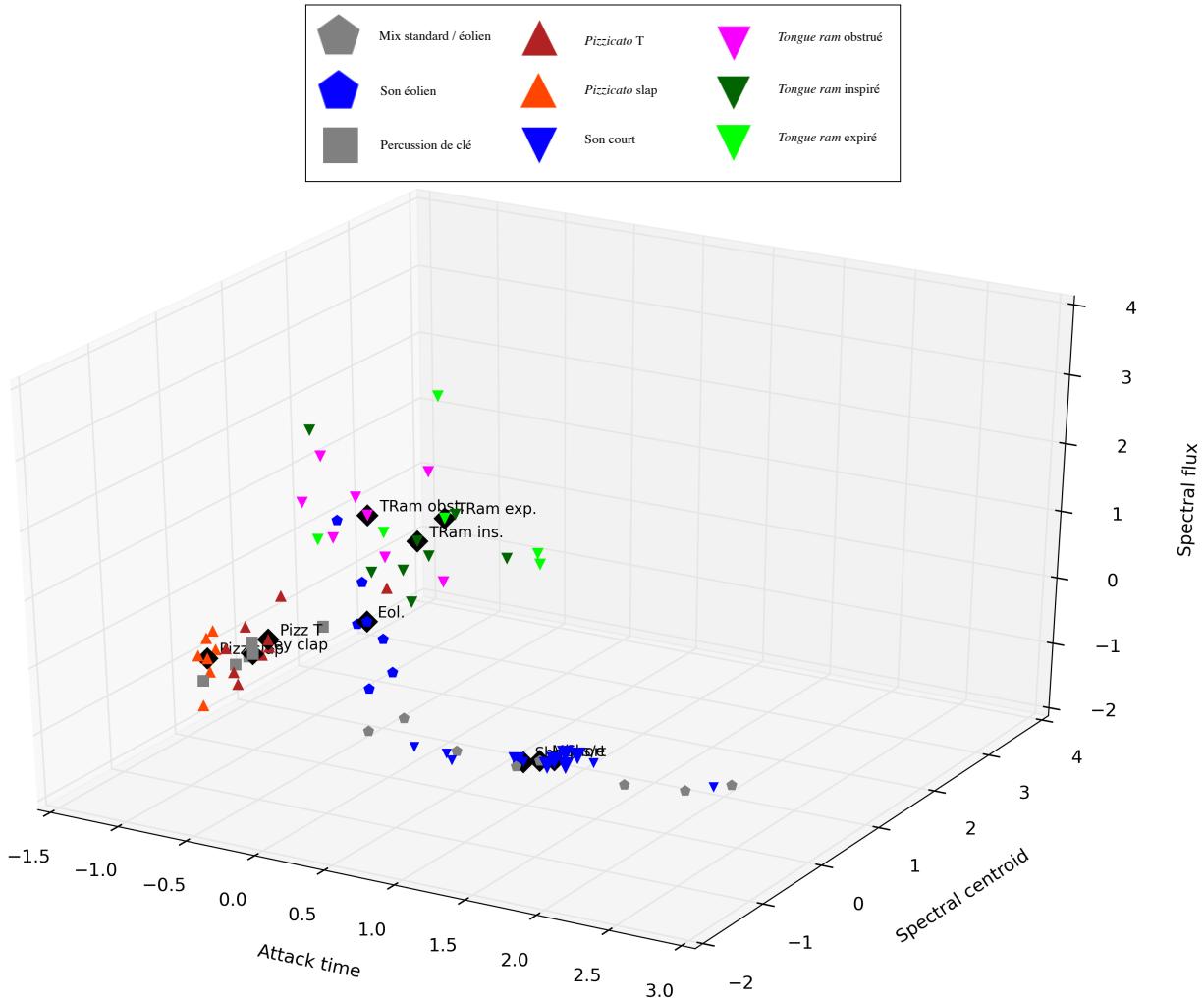


FIGURE 7.57 – Timbres à excitation instantanée - Flux spectral – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace tridimensionnel où trois descripteurs corrélés à des dimensions perpectives sont mis en relation : temps d'attaque, centroïde spectral et flux spectral. Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

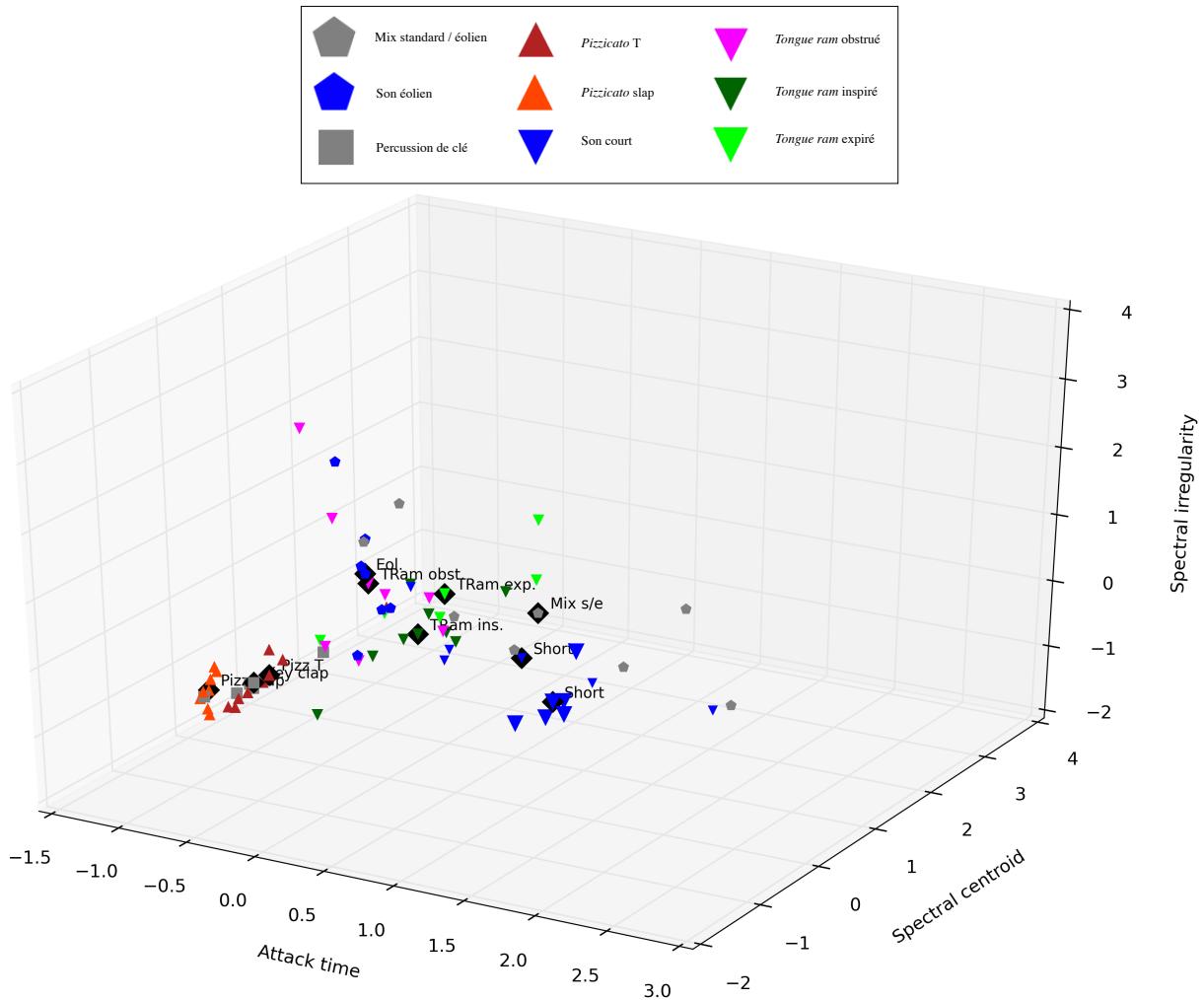


FIGURE 7.58 – Timbres à excitation instantanée - Irrégularité spectrale – Un groupe de 10 types de son courts (à excitation instantanée), joués sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté dans cet espace tridimensionnel où trois descripteurs corrélés à des dimensions perceptives sont mis en relation : temps d'attaque, centroïde spectral et irrégularité spectrale (déviation harmonique). Les sons représentés sont les suivants : sons éoliens, sons mixtes standard-éoliens, sons standard en nuances *piano* et *forte*, percussion de clé, *pizzicati* avec attaques en T et en slap, et *tongue rams* inspiré, expiré et avec obstruction du trou de l'embouchure. Les pictogrammes situés à l'intérieur d'un losange noir représentent la position moyenne pour chaque catégorie de sons. **Retour au texte : cliquez ici.**

4 Discussion

Comme pour les expériences du chapitre précédent, l'échantillon testé est relativement restreint, en ce sens qu'ils proviennent d'une seule personne, jouant toujours sur le même instrument. De même, il se peut aussi que le type de représentation du signal choisi et l'implémentation des algorithmes de calcul des descripteurs acoustiques fasse varier les résultats. L'expérience serait à répéter avec des sons enregistrés par plusieurs flûtistes, afin de s'assurer d'une certaine constance des caractéristiques sonores de chaque mode de jeu.

Cependant, les résultats obtenus ici fournissent tout de même quelques informations supplémentaires sur ce qui définit acoustiquement les propriétés des techniques de jeu testées lors de cette expérience.

4.1 Dynamique et nuance de timbre

On a vu au chapitre précédent que l'usage des nuances de timbres *rond* et *brillant* permettait d'amplifier la nuance dynamique, la brillance du son aidant à le percevoir comme étant d'intensité sonore plus forte. À la lumière des résultats obtenus ici, il est possible de préciser les caractéristiques de ces nuances de timbre et nuances dynamiques.

Du point de vue de l'attaque, les sons brillants ont un temps d'attaque moyen plus long que les sons ronds. De plus, les sons *forte* ont des pentes d'attaque et de déclin plus élevées que les sons *piano*. Toutefois, cette caractéristique s'observe surtout avec les sons brillants, la différence n'étant pas notable avec les sons ronds.

On a aussi vu que l'on peut séparer les sons longs à mode de production standard en trois groupes : rond *piano*, brillant *forte*, puis les sons brillants *piano* et ronds *forte* dans un même groupe. En plus des descripteurs globaux relatifs au spectre, on peut affirmer que le flux spectral permet à lui seul de différencier ces trois groupes de sons. Il est possible que le caractère brillant – se traduisant entre autres par plus d'énergie dans les partiels harmoniques d'ordre élevé, d'autant plus lorsqu'il est amplifié par une nuance dynamique forte, aille de pair avec une plus grande variation d'énergie dans les partiels.

Dans le cas du groupe formé par les sons brillants *piano* et ronds *forte*, c'est la dynamique plus que la nuance de timbre qui permet de différencier les deux groupes. Selon nos résultats, les deux descripteurs qui jouent le plus grand rôle dans cette distinction sont le roulement spectral et l'aspect plat du spectre.

Ces résultats tendent à confirmer ce qu'affirme Stephen McAdams (2013, p. 46), c'est-à-dire que les sons produits grâce à un effort physique plus grand (par exemple *fortissimo* par rapport à *pianissimo*) n'ont pas seulement une plus grande énergie dans le registre fréquentiel aussi présent dans les sons plus doux, mais que leur centroïde spectral tend à être plus élevé, que leur spectre

s'étend sur un registre fréquentiel plus grand, et que leur pente spectrale est moins élevée⁴. Plus loin, en se basant sur les résultats obtenus par Fabiani et Friberg (2011⁵), McAdams conclut que l'évaluation de la dynamique d'un son musical se base à la fois sur la sensation d'intensité et sur le timbre, ainsi que dans une moindre mesure sur la sensation de hauteur.

De plus, Hajda et al. (2004) soulignent que la valeur RMS et le centroïde spectral sont deux propriétés du son qui sont indépendantes du point de vue mathématique (Beauchamp 1982⁶), et que leurs équivalents perceptifs, les sensations d'intensité et de brillance, sont aussi pratiquement indépendantes l'une de l'autre. Toutefois, les auteurs précisent que dans le cas de signaux acoustiques produits par des instruments à vent, il arrive fréquemment que certaines caractéristiques temporelles relatives à l'amplitude RMS et au centroïde soient reliées durant la partie soutenue des sons (Hajda et al. 2004, p. 274-275). C'est effectivement ce qui arrive dans le cas présent.

4.2 Techniques étendues

En regardant les représentations graphiques de combinaisons entre des descripteurs acoustiques du timbre particulier, on peut en arriver à définir certaines caractéristiques des techniques de jeu étendues de la flûte.

4.2.1 Modes de jeu à excitation continue

- **Sons éoliens** : Ils se caractérisent par une brillance et une amplitude de modulation du signal élevée. On remarque aussi des valeurs élevées pour le taux de passage à zéro, le rapport bruit/énergie totale, l'inharmonicité et l'irrégularité spectrale. C'est le placement des résonateurs vocaux en position pour la prononciation de la voyelle [i] qui produit les valeurs les plus élevées pour ces descripteurs.
- **Sons mixtes standard/éoliens** : On remarque ici aussi une inharmonicité et une irrégularité spectrale élevées. Par rapport à plusieurs autres catégories de sons, il y a plus d'énergie

⁴Ma traduction de « Sounds produced with greater playing effort (e.g., fortissimo vs. pianissimo) not only have greater energy at the frequencies present in the softer sound, but the spectrum spreads toward higher frequencies, creating a higher spectral centroid, a greater spectral spread, and a lower spectral slope. »

⁵FABIANI, M. et A. FRIBERG (2011). Influence of pitch, loudness, and timbre on the perception of instrument dynamics. *Journal of the Acoustical Society of America*, 130, p. 193-199, cités dans McAdams 2013, p. 46.

⁶BEAUCHAMP, J.W. (1982). Synthesis by spectral amplitude and "brightness" matching of analyzed musical instrument tones. *Journal of the Audio Engineering Society*, 30(6), p.396-406, cité dans Hajda et al. 2004, p. 274-275.

dans les premiers partiels que dans les aigus. Ces sons se caractérisent aussi par une grande constance dans le déroulement temporel.

- ***Jet whistle sifflé*** : L'amplitude de modulation du signal, l'aspect plat du spectre, le roulement spectral et l'inharmonicité obtiennent des valeurs élevées pour ce type de son. Aussi, les valeurs d'étalement, de centroïde et de flux spectraux sont très élevées par rapport à d'autres types de sons. Par contre, c'est par le rapport bruit/énergie totale que le *jet whistle* se distingue le plus des autres sons.
- **Anche lippale (sons de trompette)** : La valeur RMS de ce type de sons est en général plus élevée que pour les autres sons. L'énergie du spectre se concentre dans les premiers partiels plutôt que dans les aigus. On remarque aussi des valeurs élevées pour le roulement spectral et l'aspect plat du spectre.

4.2.2 Techniques percussives

- ***Tongue rams*** : Ils se caractérisent par une valeur très élevée pour le flux spectral. Celles de la pente spectrale, du centroïde et du roulement spectral sont également élevées. Le rapport bruit/énergie totale est plus élevé pour les *tongue rams* inspirés et expirés que pour ceux avec obstruction, tandis que les valeurs élevées d'irrégularité spectrale concernent surtout les *tongue rams* expirés.
- ***Pizzicati* et percussions de clé** : À part égale, ce sont ces techniques qui ont le temps d'attaque le plus court de toutes. Les *pizzicati* avec une attaque en *T* ont un temps d'attaque plus court que les *pizzicati* en *slap*; à l'inverse, le temps de déclin (*decay*) est plus court pour ces derniers que pour les premiers.

4.2.3 Techniques polyphoniques et de modulation

- **Multiphonique à l'octave** : Elle se traduit par des valeurs élevées pour l'inharmonicité, le taux de passage à zéro, le roulement, l'étalement, l'irrégularité et l'asymétrie spectraux, ainsi que pour l'aspect plat du spectre.
- **Voix à l'unisson ou à l'octave** : La voix à l'unisson ou à intervalle d'octave augmente l'inharmonicité (par la superposition d'un second spectre harmonique sur celui de la flûte

– celui de la voix), la fréquence de modulation du signal et l’irrégularité spectrale. Au contraire, elle diminue la valeur de l’aspect plat du spectre.

- **Voix au triton inférieur ou supérieur** : Ici, la voix augmente les valeurs de la pente spectrale, du centroïde, du roulement spectral, de l’aspect plat du spectre et le taux de passage à zéro. On remarque aussi un rapport bruit/énergie totale plus élevé et plus d’énergie dans le spectre que pour d’autres types de techniques de modulation, spécialement dans l’énergie du spectre harmonique.
- **Fluttertongue** : L’usage de cette technique se remarque particulièrement dans les valeurs élevées générées pour le flux spectral, l’inharmonicité et le rapport bruit/énergie totale. La fréquence fondamentale tend à augmenter légèrement, tout comme la valeur RMS et l’énergie du spectre. Par contre, le roulement spectral tend à être moins élevé, surtout dans le registre grave.

4.3 Descripteurs et dimensions perceptives du timbre

Lors de la mise en relation du temps d’attaque, du centroïde spectral et d’une troisième dimension (le flux spectral ou l’irrégularité spectrale), on a pu constater que l’importance de ces descripteurs, apparentés aux principales dimensions perceptives des sons instrumentaux, variait selon le type de sons analysés. Par exemple, pour les sons à excitation continue (longs), le temps d’attaque n’a qu’une importance relative par rapport au centroïde lorsqu’il s’agit de différencier les groupes de sons, alors que c’est plutôt l’inverse du côté des sons à excitation instantanée (courts). Par contre, pour tous les types de sons, le flux spectral semble être assez important lorsqu’il s’agit de distinguer des groupes de sons.

Il serait pertinent de valider ces résultats avec des expériences sur la perception sonore, où la tâche des participants consisterait à évaluer la dissimilarité entre plusieurs paires de sons. On pourrait ainsi savoir de quoi se composent réellement les dimensions perceptives du timbre de la flûte traversière. Toutefois, la difficulté d’un tel type d’expérience perceptive réside dans le fait de trouver l’équilibre entre l’uniformisation acoustique des sons et leur validité écologique. En effet, plusieurs des techniques de jeu mentionnées dans ce chapitre n’ont pas encore été modélisées, et restent donc difficiles à reproduire avec des techniques de synthèse sonore. À l’inverse, il

est assez malaisé d'arriver à un son instrumental générique, en ce sens que le son résultant de techniques étendues varie énormément selon la personne, l'instrument et le registre.

De plus, la présence d'un rapport bruit/énergie totale élevée, d'une inharmonicité (naturelle ou forcée) élevée ou d'une grande instabilité temporelle cause souvent des erreurs de calcul assez considérables lors de l'analyse de certains sons (ou pour certaines portions d'un son donné) (McAdams 1999, p.91).

5 Conclusion

Même si les expériences de ce chapitre ont quelques limites, elles permettent tout de même d'avoir une bonne idée des caractéristiques timbrales des variations intra-instrumentales de la flûte. On peut en effet obtenir toute une variété de sons à partir d'un seul instrument et de l'ensemble de ses techniques de jeu, un peu comme avec un ensemble musical formé de plusieurs instruments différents. Les différences intra-instrumentales, donc liées au timbre-qualité, sont principalement liées au mode de production sonore, qui détermine le type de vibration et de résonance qui produira le son résultant.

Si les descripteurs acoustiques du timbre peuvent être utilisés pour reconnaître les différentes nuances à partir de méthodes computationnelles, il devient intéressant de les utiliser dans un contexte de création, par exemple pour contrôler d'autres processus. Jusqu'à maintenant, les descripteurs acoustiques ont été calculés en temps différé ; nous verrons dans le chapitre suivant ce qu'il en est lorsqu'on utilise un suivi en direct de ces mêmes descripteurs.

Pistes de réflexion et apports des chapitres 5 et 6

Instrumentistes et compositeurs.trices :

- Mieux comprendre la composition ainsi que les caractéristiques des divers sons instrumentaux.
- Possibilité de développer des pistes pour guider l'écoute du timbre et pour diversifier l'expression par le timbre.
- Possibilité d'acquérir une conception spectrale du timbre, et en appliquer les principes en interprétation, en improvisation et en orchestration.

Musicologues :

- Outils supplémentaires d'analyse timbrale pour les langages compositionnels se basant sur le timbre.
- Possibilités d'exploration du rôle du timbre instrumental en musicologie de l'interprétation.

Ingénieur.e.s et psychoacousticien.ne.s :

- Poser les bases d'une exploration méthodique du timbre instrumental.
- Résumé des caractéristiques principales du timbre des techniques étendues à la flûte.
- Pistes pour différents travaux de modélisation sonore.
- Pistes pour l'analyse perceptive du timbre intra-instrumental.

Chapitre 8

Suivi de changements continus du timbre en temps réel

Sommaire

1	Introduction	321
2	Librairies de suivi des descripteurs en temps réel	323
3	Suivi en direct de descripteurs du timbre	329
4	Méthodologie	335
5	Résultats	338
6	Discussion	435
7	Conclusion	438

1 Introduction

Les expériences décrites au chapitre précédent visaient à caractériser les différences et les correspondances entre plusieurs groupes de sons de flûte traversière. Sauf dans les cas où l’analyse se concentrat sur les distinctions entre plusieurs types d’attaque, la plupart des observations concernaient des sons relativement statiques.

Le but des expériences qui seront décrites ci-dessous est plutôt d'observer ce qui se passe lorsque l'on opère des changements continus dans la sonorité de la flûte traversière. Or, la Timbre Toolbox ne fournit qu'une seule valeur par descripteur pour tout l'ensemble d'un fichier sonore. À moins d'échantillonner celui-ci et de procéder à l'analyse séparée de tous les échantillons¹, il est difficile d'obtenir un aperçu de la variation des valeurs de descripteurs de timbre au cours du déroulement temporel du fichier.

À l'aide d'une librairie de suivi en direct des descripteurs de timbre, il est toutefois possible de montrer l'évolution acoustique d'un signal sonore, sous forme de fichier ou de son capté en direct. Cela est utile non seulement dans le but de comprendre exactement ce qui se passe durant un phénomène de modulation (*vibrato*, *fluttermouth*) ou d'un changement continu de timbre, mais cet outil peut aussi être utilisé dans une perspective compositionnelle. En effectuant un mappage efficace entre les descripteurs monitorés et les paramètres de traitements audionumériques ou vidéo, il devient possible d'utiliser le signal capté – en l'occurrence celui de la flûte traversière – comme contrôleur.

Ce chapitre débutera par quelques définitions puis on y fera une revue des principales librairies de suivi en temps réel des descripteurs du timbre instrumental ainsi que de quelques applications possibles de ces outils numériques dans un cadre artistique. Enfin, les expériences menées sur divers changements continus apportés au timbre de la flûte seront présentées. On y examinera différents types de vibrato, des techniques de modulation comme le *fluttermouth*, puis différents changements progressifs de timbre : changements de brillance, changements de voyelle avec la technique du *jet whistle* et avec le son standard, *pitch bends* et enfin, modification du rapport bruit/énergie totale dans la sonorité.

Champs d'expertise

- Acoustique musicale
- Informatique musicale
- *Music information retrieval*
- Outils et processus interactifs

¹Une expérience de ce type dépasse l'envergure de cette thèse, mais elle fait partie des idées futures à développer à partir de ce travail de recherche.

2 Librairies de suivi des descripteurs en temps réel

2.1 Définitions

Les descripteurs du timbre en temps réel constituent le cœur de ce chapitre. En plus de la possibilité d'observer l'évolution temporelle des descripteurs sur toute la durée d'un fichier sonore donné, le suivi en temps réel peut être utile dans une perspective artistique, grâce à la transformation du son enregistré en flux de données. Il s'agit ici de faire la distinction entre plusieurs types de paramètres, et de distinguer l'humain de la machine.

2.1.1 Paramètres formels et expressifs

Dans sa thèse de doctorat intitulée *Media scores - A framework for composing the Modern Day Gesamtkunstwerk*, Peter Alexander Torpey propose une distinction entre paramètres formels et paramètres expressifs qui s'apparente à la notion de descripteur de bas et de haut niveau, définie au chapitre 4 (Cf. section 3.1.3).

Un **paramètre formel** désigne une propriété spécifique à un certain médium de représentation, alors qu'un **paramètre expressif** représente un concept plus abstrait qui se situe à un niveau supérieur de perception. Les paramètres expressifs ne sont pas des propriétés morphologiques d'un médium, mais peuvent être directement corrélés à un paramètre formel, tout comme ils peuvent aussi correspondre à la perception regroupée de plusieurs paramètres formels (Torpey 2013, p. 21).

2.1.2 Sensation et perception

Torpey fait également la distinction entre sensation et perception. La première, selon sa définition, correspond à la détection de stimuli par les sens, alors que la perception consiste en un processus d'explication de la signification du stimulus perçu. Ainsi, l'esprit essaie inconsciemment d'identifier la cause du stimulus à partir d'expériences vécues, ce qui est généralement possible en raison de la constance des phénomènes qui se produisent dans l'environnement : peu de choses arrivent sans pouvoir être expliquées par une cause donnée.

Or, l'ordinateur n'est pas doué d'intelligence, et ne peut donc pas aller au-delà d'un équivalent de la sensation. C'est-à-dire qu'il est capable de détecter des paramètres formels et de les

transformer en flux de données (Torpey 2013, p. 25-26). C'est donc à l'artiste qui manipule les outils numériques de faire preuve d'un bon sens de l'observation et de tirer une signification de ce qu'il.elle observe. Autrement dit, c'est à l'humain de transformer les paramètres formels détectés par l'ordinateur en paramètres expressifs et, en poussant un peu plus loin, d'intégrer ces flux de données à son langage musical et artistique.

2.2 Librairies de suivi en temps réel

2.2.1 Suivi en temps réel ou en direct ?

Avant de poursuivre, il convient de préciser que le suivi des descripteurs nécessite un certain temps de calcul, aussi minime soit-il, et que ce temps de calcul rend impossible le contrôle en simultané de paramètres sonores. Dans sa thèse de doctorat, Vincent Verfaille propose deux définitions du temps réel. La première signifie que le « *temps de calcul est inférieur au temps d'écoute du son produit, l'écoute pouvant être différée* ». Mais idéalement, dans le contexte de l'utilisation de flux de données pour le contrôle de paramètres, l'expression « temps réel » désigne un calcul assez rapide pour ne pas être perçu. C'est ici que la seconde définition de Verfaille intervient : il doit s'agir de processus

dont l'exécution se fait en direct, dont le traitement d'un bloc d'échantillons est plus rapide que la lecture de ce bloc, et dont le temps de latence (la taille du bloc, en secondes) est suffisamment faible pour que l'oreille ne perçoive pas le décalage entre l'événement sonore original et l'événement sonore produit par le processus. Cette latence doit être de quelques millisecondes, inférieure à 20 ms (Verfaille 2003, p. 25).

À l'heure actuelle (en 2018), l'extraction de descripteurs et l'utilisation des flux de données ainsi générés peuvent s'effectuer en direct et respecter cette seconde définition du *temps réel*, mais il reste très facile de pousser les ordinateurs à la limite de leurs capacités de calcul, l'extraction en temps réel des descripteurs du timbre restant relativement coûteuse en termes de ressources. Il convient donc d'être prudent et d'optimiser les processus lors de la conception d'un *patch* ou d'un programme destiné à l'utilisation des descripteurs du timbre en direct.

2.2.2 Objets et librairies de suivi en temps réel

En 1998, Miller Puckette développe les objets `fiddle~` et `bonk~`, conçus pour l'environnement Max/MSP (Malt et Jourdan 2008, p. 1). Ces deux objets, respectivement dédiés à la détection de la hauteur (selon le standard MIDI) et des *onsets*², sont devenus des classiques du suivi en direct dans le contexte de la musique mixte³. Depuis, `fiddle~` et `bonk~` ont été portés vers l'environnement PureData⁴, tout en continuant à être utilisés dans l'environnement Max par de nombreux utilisateurs.

En 2001, une librairie d'objets externes pour Max/MSP a été implémentée par Tristan Jehan. Parmi les objets disponibles on trouve `pitch~` (basé sur `fiddle~`, l'objet mentionné dans le paragraphe précédent, mais générant des données en Hertz), `loudness~` (pour la mesure de l'énergie spectrale ou de l'énergie dans le domaine temporel), `brightness~` (pour la mesure du centroïde spectral), `noisiness~` (pour une mesure de l'aspect plat du signal basé sur une série de coefficients de Bark), `bark~` (pour une analyse en 25 bandes d'après un modèle auditif), `analyze~` (qui regroupe les cinq descripteurs précédents en un seul objet), `shifter~` (un *pitch shifter* conçu pour les sons monophoniques périodiques), `segment~` (un détecteur d'*onsets* pour les sons périodiques ou non périodiques) et `beat~` (un détecteur de pulsations et de tempo), entre autres (Jehan 2001 [site web])⁵.

Dans les années qui suivent⁶, Norbert Schnell implémente l'objet `yin~` dans Max/MSP pour l'estimation de la fréquence fondamentale d'après l'algorithme de Chevigné et Kawahara (2002). L'objet génère aussi un facteur de périodicité ainsi qu'une représentation de l'énergie contenue dans le signal (page web des "MSP Externals" de l'Ircam (s.d.) [site web]). Quant à Todor Todoroff, il implémente l'objet `iana~` à partir d'un algorithme de Terhardt programmé par Gérard Assayag à l'Ircam. L'objet peut être utilisé pour extraire les partiels les plus significatifs

²Début d'un événement sonore. Ce terme est utilisé plutôt que le mot *attaque* parce qu'il est plus inclusif; la notion d'attaque peut sous-entendre une perspective instrumentale.

³Par exemple, la pièce *Jupiter*, composée par Philippe Manoury en 1987 et révisée en 1992 (Éditeur : Durand), fait usage dans ses dernières versions de l'objet `fiddle~` pour détecter la hauteur de la note jouée par l'instrumentiste et ainsi permettre à l'ordinateur de réagir directement au jeu de l'instrumentiste, grâce à un module de suivi de partitions.

⁴À l'origine, une version libre de Max, également développée par Miller Puckette depuis le milieu des années 1990, et qui possède depuis plusieurs années sa propre communauté d'utilisateurs.

⁵La compatibilité de ces objets avec Max 7 n'a pas été testée de notre côté.

⁶L'algorithme à la base de l'objet dont il sera question date de 2002, et la page de la "Max Object Database" (s.d.) [site web] dédiée à l'objet `yin~` indique que la dernière version a été compilée pour Max/MSP version 4.5, antérieure à 2008.

de sons musicaux. Ce dernier objet a été conçu dans une optique d’analyse-synthèse des sons (Pottier 2005, p. 118).

Finalement, l’objet `ircamdescriptor~`, développé récemment, « *calcule plus de 40 éléments audio en temps réel ou en temps différé (batch) à partir d’un buffer~. Par exemple, hauteur, timbre, intensité, états spectraux, atténuation et crête, harmoniques, caractéristiques perceptives, MFCC, etc.* » (page du Max Sound Box sur le Forumnet de l’Ircam (s.d.) [site web]). `ircamdescriptor~` est en fait une implémentation de la Timbre Toolbox dans l’environnement Max (Malt et Gentilucci 2015, p. 3). Les objets `iana~`, `yin~` et `ircamdescriptor~` font maintenant partie de la librairie *Max Sound Box*, regroupant une série de modules d’interaction en temps réel pour Max, disponibles avec abonnement au Forumnet de l’Ircam.

2.2.3 Les `zsa.descriptors`

Dans la même lignée que la Timbre Toolbox, la librairie des `zsa.descriptors` (2008) comprend plusieurs descripteurs du standard MPEG-7 (Cf. section 3.2.1) ainsi que des implementations d’algorithmes de détection de pics d’amplitude développés par Xavier Serra⁷ et quelques outils de composition assistée par ordinateur développés par l’Équipe Représentations Musicales à l’Ircam. Mikhail Malt et Emmanuel Jourdan ont créé leur librairie pour l’utilisation en temps réel des descripteurs dans une optique de création et d’analyse de la musique contemporaine (Malt et Jourdan 2008, p. 1). Les `zsa.descriptors` ont été implémentés dans l’environnement Max ; la dernière version stable disponible en téléchargement fonctionne avec Max 7.

La plupart des objets appartenant aux `zsa.descriptors` ont été conçus de manière à fonctionner à l’intérieur du *patcher* `pfft~`, qui calcule de manière efficiente la transformée de Fourier nécessaire à l’extraction des descripteurs spectraux et spectraux temporels. Selon les auteurs, cette stratégie offre l’avantage de la modularité, en plus d’assurer l’efficacité des calculs et de permettre l’utilisation directe de l’analyse comme paramètre de transformation sonore dans le domaine spectral (Malt et Jourdan 2008, p. 3). Enfin, un autre avantage de la librairie `zsa.descriptors` est d’être accessible gratuitement en ligne⁸.

⁷SERRA, Xavier. 1989. « *A system for sound analysis/transformation/synthesis based on a deterministic plus stochastic decomposition.* » Thèse de doctorat (Ph.D.), Stanford University, citée dans Malt et Jourdan 2008, p. 1.

⁸À cette adresse : <http://www.e--j.com/index.php/what-is-zsa-descriptors/>. Il est ensuite nécessaire d’accéder à la version payante si l’on désire concevoir des applications en *standalone*.

2.3 Applications du suivi en direct

Du moment qu'on a la possibilité d'extraire des descripteurs du timbre en direct, plusieurs possibilités s'offrent à l'artiste qui désire intégrer la manipulation de flux de données à son langage. Cela soulève, entre autres, la question du mappage (ou *mapping*, en anglais). Nous ne prétendons pas y répondre de manière exhaustive dans le cadre de cette thèse – cela n'est pas le but poursuivi – mais on constate que différentes approches ont été explorées. Le suivi en direct de descripteurs permet, entre autres, de faciliter la détection d'événements, mais aussi d'accéder à plusieurs manières de contrôler des paramètres de synthèse sonore et de traitements audionumériques, ainsi qu'à plusieurs possibilités de mappages audiovisuels. Voici quelques exemples d'applications possibles du suivi de descripteurs du timbre en temps réel.

2.3.1 Détection d'événements

Dans leur second article sur les `zsa.descriptors`, Malt et Jourdan proposent l'utilisation de certains descripteurs du timbre pour faciliter la détection d'événements, comme des impulsions ou des débuts de notes. Par exemple, une détection d'événements basée sur les variations d'amplitude est susceptible d'être problématique lorsque l'on travaille avec des instruments comme le basson ou l'accordéon. Dans le cas du basson, le rayonnement acoustique est très différent selon les registres, et la tension électrique captée par le microphone risque de ne pas être représentative du niveau d'intensité sonore généré par l'instrument. Et dans le cas de l'accordéon, l'intensité dynamique varie énormément selon les registres. Une solution à ce problème consiste à suivre la pente spectrale (objet `zsa.slope~`), dont la variation est fortement corrélée à l'enveloppe spectrale ; cette manœuvre permet donc de détecter les événements plus efficacement qu'avec le suivi d'amplitude.

Une autre possibilité consiste à détecter des événements bruités (comme des percussions de clés) au milieu d'événements mélodiques à l'aide d'une combinaison du centroïde spectral (objet `zsa.centroid~`) et de l'étalement spectral (objet `zsa.spread~`), pour générer une mesure de l'écart-type spectral. Celui-ci augmente en fonction de la richesse du spectre, et tend à être beaucoup plus élevé dans le cas d'événements bruités (Malt et Jourdan 2009, p. 5).

2.3.2 Descripteurs et musique mixte

Dans sa pièce *Brakhage Series II* (2012) pour violoncelle et électronique, le compositeur Grégoire Lorieux s'est servi de différents objets Max pour le suivi de descripteurs en direct. Parmi les `zsa.descriptors`, on compte les objets `zsa.mel~`, qui calcule une liste de coefficients en Mels⁹, `zsa.dist`, qui calcule la distance relative entre plusieurs listes ainsi que `zsa.centroid~`, qui retourne la valeur du centroïde spectral. Le *patch* fait également usage de différents objets externes conçus à l'Ircam, dont l'objet `yin~` mentionné plus haut, pour obtenir une estimation de la fréquence fondamentale. Le *patch* inclut plusieurs traitements dont des délais, un module de spatialisation spectrale ainsi que deux modules de synthèse granulaire fonctionnant à partir de l'analyse en direct du son capté par les microphones (Lorieux 2012, p. 4, 6).

La pièce *Unsounding Objects*¹⁰ (2013), fruit d'une collaboration interdisciplinaire entre Ian Hattwick (designer d'instruments numériques), Preston Beebe (compositeur) et Zachary Hale (percussionniste) au CIRMMT¹¹ avait pour but de « *créer un instrument musical numérique utilisant les qualités timbrales d'objets préexistants afin de contrôler de la synthèse sonore en situation de performance musicale*¹² (Hattwick et al. 2014, p. 1). » Ici, les `zsa.descriptors` sont utilisés comme outil dans l'un des quatre modules d'analyse du son en temps réel. Les objets `zsa.energy` et `zsa.bark` sont utilisés pour générer une série de 25 coefficients Bark. Les données obtenues sont ensuite traitées puis dirigées vers une banque d'oscillateurs sinusoïdaux, chaque valeur de la liste contrôlant l'amplitude d'un des oscillateurs (Hattwick et al. 2014, p. 3).

2.3.3 Mappages audiovisuels

Dans l'esprit du *Gesamtkunstwerk* moderne (Cf. Torpey 2013), on peut naturellement utiliser les flux de données générés par les descripteurs de timbres pour manipuler les paramètres d'une image numérique. Pour sa pièce *Verklärter Rohr*¹³ (2017) pour clarinette basse, électronique

⁹Selon la référence de l'objet Max, l'algorithme de calcul a été implémenté d'après les outils de reconnaissance de la parole décrits par Rabiner et Juang dans *Fundamentals of speech recognition*, (1993). New York : Prentice-Hall.

¹⁰Une vidéo de l'œuvre peut être visionnée ici : <https://youtu.be/d61xxCRdF-o> (Repéré le 26 juin 2018).

¹¹Centre for Interdisciplinary Research in Music and Media Technology, Schulich School of Music, Université McGill, Montréal.

¹²Ma traduction de la citation suivante (ce sont les auteurs qui soulignent) : « *The goal of Unsounding Objects is to create a digital musical instrument which uses the timbral qualities of pre-existing objects to drive sound synthesis during a musical performance.* »

¹³Il est possible de visionner des extraits de l'œuvre ici : <https://vimeo.com/202655434> (Repéré le 26 juin 2018).

temps réel et vidéo générative, le compositeur Julian Hoff a conçu un *patch* dans lequel il utilise les `zsa.descriptors` pour la détection du flux spectral, du niveau d'amplitude, du roulement, de l'étalement et du centroïde spectral, ainsi que de bandes de Bark. Grâce à ces flux de données générés par le son de la clarinette basse, l'interprète peut manipuler en direct l'objet créé par la vidéo générative ainsi que plusieurs processus sonores¹⁴.

Par ailleurs, dans leur article intitulé *A new timbre visualisation technique based on semantic descriptors*, Soraghan, Faire, Renaud et Supper proposent plusieurs associations entre paramètres acoustiques et visuels. Par exemple, le centroïde spectral peut être associé au paramètre de brillance visuelle ou au degré d'intensité de la teinte (*hue* en anglais); ou encore, l'étalement spectral (*spread*) peut être lié à la variation de contrastes dans la texture ou au degré de saturation. Quant au rapport bruit/énergie totale ou à l'aspect plat du spectre (*flatness*), ils peuvent être associés à la granularité de l'image (Soraghan et al. 2018, p. 30).

3 Suivi en direct de descripteurs du timbre

3.1 Choix de la librairie de suivi de descripteurs

Nous avons ici choisi d'exploiter les possibilités de la librairie des `zsa.descriptors`¹⁵ afin de réaliser cette série d'expériences. Bien que l'objet `ircamdescriptor~` propose une implémentation quasi complète des outils de la Timbre Toolbox pour des analyses en temps réel de fichiers sonore, nous avons préféré opter pour une librairie qui est accessible gratuitement¹⁶ et qui est largement utilisée par les compositeurs souhaitant intégrer le suivi en direct de descripteurs du timbre à leurs modules d'analyse, de synthèse et de traitement numérique.

3.2 Objectifs de l'expérience

Par cette démarche, nous poursuivons deux objectifs :

1. Observer le comportement d'une sélection de descripteurs du timbre lors de changements continus apportés au timbre de la flûte traversière, afin de pouvoir caractériser par des termes objectifs ces changements.

¹⁴D'après un échange de courriels entre l'auteure et le compositeur (15 mai 2018).

¹⁵La version utilisée date de 2015. Voir la page web dédiée à la librairie ([2015 \[site web\]](#)).

¹⁶Sous licence Creative Commons.

2. Fournir une description des flux de données obtenus par le suivi en direct de différentes techniques de jeu à la flûte traversière, afin de permettre aux musiciens souhaitant utiliser le suivi de descripteurs en situation de jeu de prendre des décisions éclairées quant au mappage de ces paramètres avec ceux de modules de synthèse et de traitement du son, de l'image et, éventuellement, d'autres médiums.

Les sons analysés ont été regroupés en plusieurs catégories, en fonction du phénomène ou du changement de sonorité à observer. Les expériences comprennent les analyses de différents types de vibrato, du *flutertongue*, de changements de brillance, de changements dans le rapport son/bruit, de changements de voyelles, de *jet whistles* ainsi que de *pitch bends*.

3.3 Description des sons analysés

3.3.1 Vibrato

Comme on peut le constater à la lecture du chapitre 1 ainsi qu'à l'écoute de nombreux flûtistes, le vibrato est largement utilisé depuis le début du XX^e siècle par ceux-ci comme technique d'ornementation et comme moyen de rendre leur sonorité plus vivante – comme l'a fait le flûtiste Marcel Moyse, à l'instar d'autres grands instrumentistes de son époque (Powell 2002, p. 223). Selon Meyer, le vibrato de la flûte se caractérise par une stabilité de l'amplitude des premiers partiels (ce qui donne l'impression d'une sonorité stable) et par une modulation de fréquence plutôt modérée (un vibrato induisant une variation de ± 10 à ± 15 cents étant déjà considéré comme ample). On remarque aussi une importante modulation d'amplitude des partiels d'ordre plus élevé (au-delà de 3 000 Hz, la variation d'amplitude peut atteindre 15 dB), ainsi qu'une modulation d'amplitude équivalente du bruit de souffle dans la région fréquentielle autour de 10 000 Hz. Ce sont ces deux dernières caractéristiques qui permettent au son de la flûte de se distinguer dans la sonorité d'un ensemble (Meyer 2009, p. 67-69). On peut donc s'attendre à observer des variations conséquentes du côté des descripteurs spectraux.

Au chapitre 2 (Cf. section 3.3.1), il a été question de la possibilité de créer un vibrato à partir de deux groupes de muscles distincts : les muscles du larynx d'une part, et les muscles abdominaux et thoraciques d'autre part. La plupart du temps, le vibrato dit « standard » est généré grâce à une activation des muscles abdominaux et thoraciques. Cependant, il est difficile de

dépasser une fréquence de modulation de 5,5 à 6 Hz de cette manière, puisque des mouvements plus rapides ne correspondent pas à la fonction biologique des muscles concernés. Par contre, les muscles du larynx, capables d'attendre une vitesse de contraction beaucoup plus rapide (14 à 35 millisecondes par rapport à 50 à 140 millisecondes pour les abdominaux et intercostaux), peuvent générer un vibrato beaucoup plus rapide, allant jusqu'à 10 Hz (Gärtner 1981, p. 81-82). Ce dernier est souvent qualifié de *chevrottement*, et c'est le terme que nous utiliserons pour le désigner dans ce chapitre. Quant au terme *vibrato*, il désignera l'oscillation générée par les muscles abdominaux et thoraciques.

Les techniques de vibrato qui ont été analysées et comparées sont les suivantes :

- Vibrato lent de faible amplitude
- Vibrato lent de grande amplitude
- Vibrato rapide de faible amplitude
- Vibrato rapide de grande amplitude
- Chevrottement lent
- Chevrottement rapide

Chacune de ces techniques a été enregistrée successivement sur deux notes : dans le registre grave (sur *Fa #₄*) et vers la limite supérieure du registre médium (sur *Si b₅*), pour un total de douze échantillons sonores à analyser.

3.3.2 *Fluttermusik*

Il existe deux manières de produire le *fluttermusik* ou *Flatterzunge* (Cf. section 3.3.5). Par un roulement de la langue (consonne roulée alvéolaire [r]) ou par une vibration du dos de la langue près de ou contre la luette (consonne roulée uvulaire [ʁ]). C'est cette deuxième technique que nous avons testée lors de cette expérience¹⁷. Comme nous l'avons vu, le *fluttermusik* entraîne une modulation périodique de l'amplitude du son. Mais qu'en est-il des autres paramètres ? Peut-on détecter des variations périodiques caractéristiques des propriétés spectrales du son ? Le *fluttermusik* a également été enregistré sur *Fa #₄* et sur *Si b₅* :

- *Fluttermusik* sur *Fa #₄*
- *Fluttermusik* sur *Si b₅*

¹⁷Parce que la personne qui a enregistré les sons, l'auteure de cette thèse en l'occurrence, maîtrise mieux cette technique que la première.

3.3.3 Changements de timbre : entre brillant et rond

Dans le chapitre précédent (Cf. section 2.2), nous avons examiné les différences entre les descripteurs de sons brillants et de sons ronds. D'un point de vue technique, c'est la position d'embouchure, ou plus précisément la forme de l'ouverture des lèvres, qui distingue les deux types de timbres. Dans le premier cas (sons brillants), l'ouverture des lèvres est plus large mais moins haute que dans le second cas (sons ronds), où elle tend à être plus ronde¹⁸. Ici, nous avons voulu observer les caractéristiques timbrales du changement d'une qualité sonore à l'autre et ce, dans les deux directions. De plus, chacun des changements continus a successivement été enregistré avec la nuance *piano* et la nuance *forte*. Finalement, étant donné que c'est dans le registre grave que cette technique induit la plus grande variation timbrale, les sons ont été enregistrés sur deux notes : *Do #4* et *Fa #4*. On a donc obtenu huit fichiers sonores à analyser :

- Brillant à rond sur *Do #4*, nuance *f*
- Brillant à rond sur *Do #4*, nuance *p*
- Rond à brillant sur *Do #4*, nuance *f*
- Rond à brillant sur *Do #4*, nuance *p*
- Brillant à rond sur *Fa #4*, nuance *f*
- Brillant à rond sur *Fa #4*, nuance *p*
- Rond à brillant sur *Fa #4*, nuance *f*
- Rond à brillant sur *Fa #4*, nuance *p*

Remarque

Lors de l'enregistrement des sons, un effort conscient a été déployé afin d'isoler, dans la mesure du possible, la nuance dynamique (associée principalement à la vitesse et au débit du jet d'air) de la nuance de timbre (modulable pour sa part par la forme de l'ouverture des lèvres et par l'angle du jet d'air). Toutefois, ces deux paramètres sont souvent interreliés : comme on l'a vu lors des analyses des chapitres précédents (Cf. chapitre 6, section 3.1.1 et chapitre 7, section 3.3.1), une augmentation de la nuance dynamique semble faire augmenter les descripteurs en lien avec la brillance.

¹⁸Cette affirmation découle d'une observation de la technique personnelle de l'auteure ; du moins, elle correspond au geste effectué afin d'obtenir les deux qualités sonores. D'autres flûtistes pourraient y arriver en modifiant d'autres paramètres de leur geste.

3.3.4 Changements de timbre : entre standard et éolien

Pour cette expérience, il s'agit d'explorer les états intermédiaires entre le son standard, dans le cas duquel des ondes stationnaires se créent dans le tuyau de l'instrument et le son éolien, qui se traduit par un son de souffle faisant entendre les résonances du tuyau, sans ondes stationnaires. Les deux mêmes notes du registre grave, soit *Do #₄* et *Fa #₄*, ont été reprises :

- D'éolien à standard sur *Do #₄*
- De standard à éolien sur *Do #₄*
- D'éolien à standard sur *Fa #₄*
- De standard à éolien sur *Fa #₄*

3.3.5 Changements de timbre : entre les voyelles *i* et *o*

Ici, plutôt que d'être obtenue en changeant la forme de l'ouverture des lèvres, la variation timbrale est obtenue en modifiant la position des résonateurs vocaux, de manière à les positionner pour la prononciation de voyelles différentes. De même, les exemples ont été créés à partir d'enregistrements sur deux notes du registre grave, soit *Do #₄* et *Fa #₄*. Nous avons enregistré deux possibilités de variation entre deux extrêmes, soit les voyelles [i] et [o] :

- De *i* à *o* sur *Do #₄*
- De *o* à *i* sur *Do #₄*
- De *i* à *o* sur *Fa #₄*
- De *o* à *i* sur *Fa #₄*

3.3.6 *Jet whistles*

Dans le cas des *jet whistles*, nous avons conservé le même changement de voyelles que dans l'expérience précédente. C'est le mode de production sonore qui est différent : il consiste à projeter l'air directement à l'intérieur du tuyau, avec une grande vitesse. Les sons ont été enregistrés avec les doigtés du *Do #₄* et du *Fa #₄* (graves) :

- De *i* à *o* sur le doigté du *Do #₄*
- De *o* à *i* sur le doigté du *Do #₄*
- De *i* à *o* sur le doigté du *Fa #₄*
- De *o* à *i* sur le doigté du *Fa #₄*

3.3.7 Pitch bends

Enfin, une dernière expérience consiste à observer ce qui se passe lorsqu'on varie graduellement l'angle de l'embouchure ; cela équivaut à exécuter un *pitch bend*. Nous avons enregistré deux types de *pitch bends* : le premier consiste à couvrir l'embouchure à partir de la position médiane et le second, à la découvrir. Ici, les deux types de techniques n'ont été enregistrées que sur *Fa #₄* :

- *Pitch bend* couvrant sur le doigté du *Fa #₄*
- *Pitch bend* découvrant sur le doigté du *Fa #₄*

3.3.8 Remarques sur les échantillons

- L'enregistrement de sons pour les analyses du vibrato, du chevrotement et du *fluttermouth* s'est fait sur deux notes représentatives de leurs registres respectifs. D'une part, le *Fa #₄*, parce qu'il se situe au milieu du registre grave¹⁹, et d'autre part, le *Si b₅*, parce qu'il se situe dans la partie supérieure du registre médium et donc, assez près du registre aigu.
- Pour l'analyse de la transition entre les sons ronds et brillants, le *Do #₄* a été choisi pour une combinaison optimale entre la facilité d'émission et le spectre d'impédance permettant l'émission d'un assez grand nombre de partiels et donc, pour la possibilité d'effectuer des variations timbrales assez importantes. Le *Fa #₄* a été choisi pour les mêmes raisons que précédemment, parce que cette note représente bien l'ensemble du registre grave.
- Certaines techniques rendent l'octaviation difficile (*jet whistle*, *pitch bend*) ou ne la permettent pas du tout (sons éoliens). Par ailleurs, c'est dans le registre grave qu'il est possible d'obtenir les plus grandes variations timbrales (pour les changements de brillance et de voyelle, notamment). Pour cette raison, la plupart des sons analysés dans le cadre de ce chapitre n'ont été joués que dans le registre grave.

¹⁹On pourra se référer aux explications données au chapitre 6, section 2.2.1 pour le choix des échantillons à analyser.

4 Méthodologie

4.1 Enregistrement des échantillons sonores

Les enregistrements des échantillons sonores ayant servi à ces analyses ont été enregistrés le 8 et 9 avril 2017 au *Performance Measurement and Recording Laboratory* du CIRMMT, à Montréal, par l'auteure de cette thèse. Les conditions d'enregistrement sont analogues à celles des expériences du chapitre précédent. L'instrument est une flûte Powell modèle Conservatory en aurumite 9K. Les sons ont été captés par un microphone DPA 4011-Tl cardioïde, placé à 50 cm de l'embouchure, à un angle de 40°. L'enregistrement a été effectué avec une interface Fireface 800 et le logiciel Reaper 4.591, sur un ordinateur MacBook Pro. Puis les fichiers sonores à analyser ont été découpés et édités avec le logiciel Amadeus Pro. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 44 100 Hz et la résolution, à 32 bits.

4.2 Implémentation dans l'environnement Max 7

Neuf descripteurs spectraux inclus dans les `zsa.descriptors`, également implémentés dans la Timbre Toolbox, ont été sélectionnés pour un suivi en direct dans le cadre de ces expériences :

- `zsa.centroid~` (centroïde spectral)
- `zsa.decrease~` (décroissance spectrale)
- `zsa.rolloff~` (roulement spectral)
- `zsa.slope~` (pente spectrale globale)
- `zsa.spread~` (étalement spectral)
- `zsa.flux~` (flux spectral)
- `zsa.kurtosis~` (aplatissement spectral)
- `zsa.skewness~` (asymétrie spectrale)
- `zsa.flatness~` (aspect plat du spectre)

À ces descripteurs spectraux s'ajoute un suivi de hauteur grâce aux objets `fzero~` et `fiddle~`, ainsi qu'un suivi d'amplitude (aussi effectué à partir de l'objet `fiddle~`).

Les neuf objets calculant les descripteurs spectraux sont intégrés à un *patcher* `pfft~`, qui effectue la transformée de Fourier au préalable. Celle-ci est réglée pour avoir une taille de fenêtre à 1024 échantillons (ce qui est suffisamment long, étant donné que la note la plus grave enregistrée est un *Do #4*, à 277,18 Hz), avec un facteur *overlap* de 2.

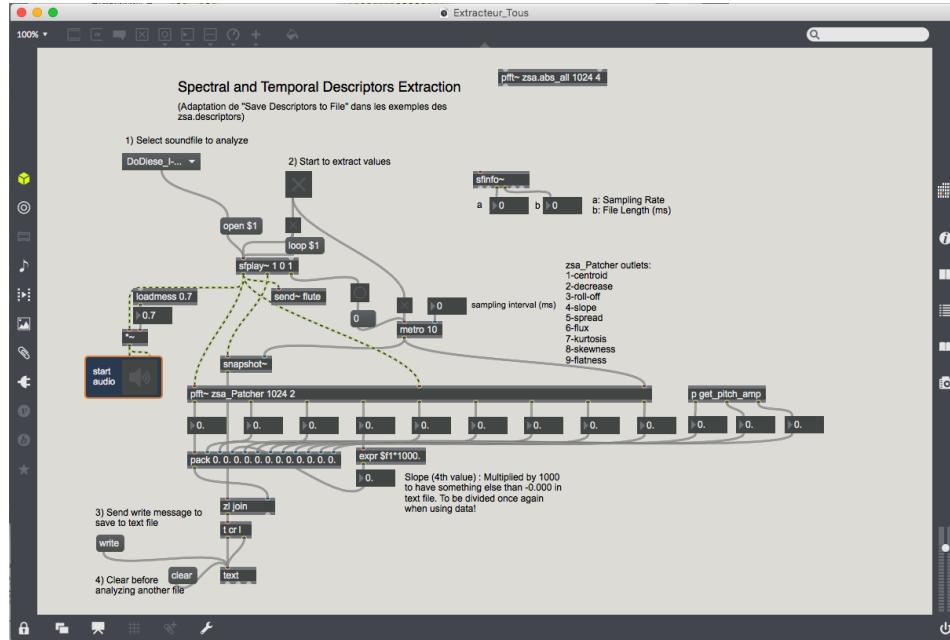


FIGURE 8.1 – Patch principal - zsa.descriptors

Le calcul du descripteur *flatness* dans ce contexte diffère un peu de celui effectué par la Timbre Toolbox : l'objet `zsa.flatness~` prend en entrée un message lui indiquant pour quelles bandes de fréquences (jusqu'à huit) il doit retourner une valeur. Ici, la liste a été réglée à pour générer des valeurs pour les bandes allant de 125 à 250, 250 à 500, 500 à 1000, 1000 à 2000, 2000 à 4000, 4000 à 8000, puis de 8000 à 16 000. La liste de valeurs ainsi générées est gérée dans un *subpatcher* qui calcule les moyennes arithmétique et géométrique de ces listes de valeurs, puis qui en fait le rapport pour retourner une seule valeur, se rapprochant du résultat d'un calcul du descripteur *flatness* à partir de la Timbre Toolbox.

À l'extérieur du *patcher* `pfft~`, c'est un objet `sfplayer~` qui effectue la lecture du fichier sonore en temps réel et qui en envoie les données au module effectuant la transformée de Fourier. Finalement, un objet `metro~` envoie un signal (bang) à un objet `snapshot~` toutes les 10 millisecondes afin de stocker les valeurs générées lors du calcul des descripteurs dans un fichier texte. Les valeurs sont toutes écrites telles quelles dans le fichier texte, à l'exception de la valeur extraite à partir de l'objet `zsa.slope~`, qui, étant généralement inférieure à 0,001, est multipliée par 1000 afin d'être enregistrée convenablement.

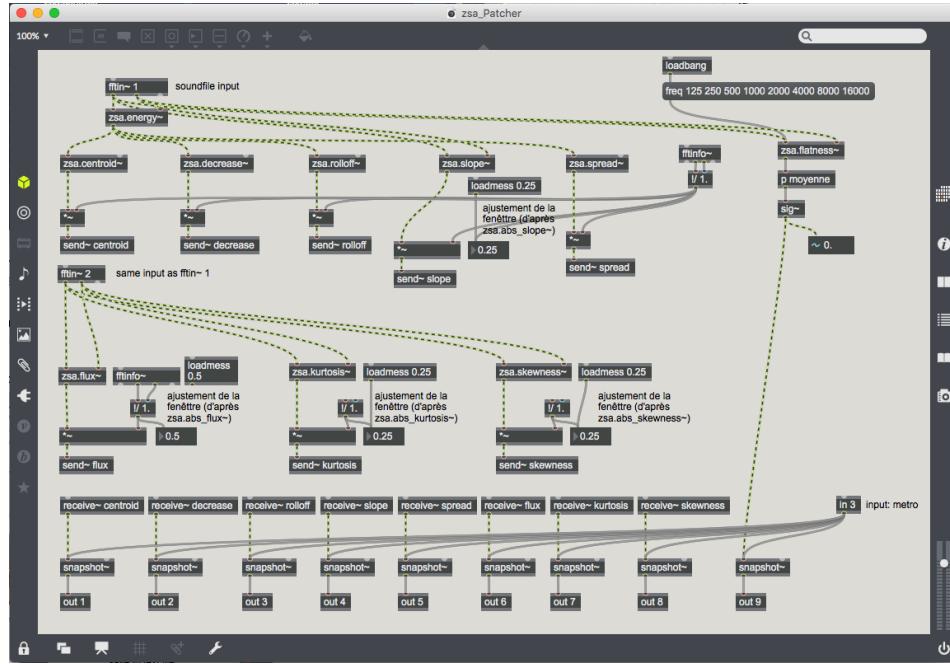


FIGURE 8.2 – Subpatch `pfft~` pour le calcul des descripteurs spectraux

4.3 Analyse des données

Une fois l'extraction des valeurs de descripteurs pour chacun des fichiers sonores complétée, deux types d'analyse ont été effectués. Afin d'obtenir une meilleure résolution lors de la comparaison des données concernant la partie soutenue des sons – la qualité de l'attaque n'ayant que peu d'importance dans ce type d'analyse, les données du début et de la fin des fichiers dont la valeur était nulle ou trop extrême (celles qui correspondent aux premiers transitoires d'attaque et aux derniers transitoires d'extinction) ont été supprimées.

4.3.1 Comparaison des données par descripteur

La première compilation des données consiste à observer le comportement d'un descripteur donné pour les fichiers appartenant à une même catégorie. Par descripteur, nous avons donc comparé les données pour les catégories suivantes :

- Vibrato et chevrottement lents
- Vibrato et chevrottement rapides
- *Fluttertongue*
- Changements de timbre brillant / rond
- *Jet whistles*

- *Pitch bends*
- Changements de timbre son / bruit
- Changements de voyelle

Comme l'objet `zsa.decrease~ a`, pour une raison qui nous est encore inconnue, généré systématiquement des valeurs identiques à celles de l'objet `zsa.centroid~`, les valeurs liées à ce descripteur n'ont pas été incluses dans la présentation des résultats.

4.3.2 Comparaison des données par fichier

Le second type d'analyse consiste en une comparaison de l'ensemble des descripteurs pour chaque fichier sonore, afin d'examiner les possibles corrélations qui pourraient exister entre eux. Pour les listes de fichiers analysés, on pourra se référer à la section précédente de ce chapitre (section 3.3).

Étant donné la grande disparité entre les échelles de valeurs (entre 10^{-4} et 10^5) entre les descripteurs, les données ont été normalisées (échelonnées entre 0 et 1) grâce à un script Matlab qui traite les listes de données extraites des fichiers texte. Si l'on souhaite utiliser le suivi de descripteurs en direct dans le cadre d'une pièce de musique mixte ou d'une œuvre multimédia, il s'agit d'ailleurs d'une transformation des données qu'il est souhaitable d'effectuer avant de diriger les flux de valeurs vers les paramètres que l'on souhaite contrôler.

4.3.3 Présentation graphique des résultats

Pour les deux types d'analyse, les données ont été représentés graphiquement grâce à des scripts en langage Python faisant appel à la librairie graphique Matplotlib (Hunter 2007).

5 Résultats

5.1 Vibrato et chevrottement

5.1.1 Observations par descripteur

Variations du suivi d'amplitude

Tant du côté du vibrato lent (fréquence d'environ 2,5 Hz) que du vibrato rapide (fréquence d'environ 5,5 Hz), la variation d'amplitude du vibrato (ou chevrottement) n'implique pas nécessairement de changement de timbre.

rement une variation de l'écart en décibels entre les points minimum et maximum d'une période. Autrement dit, la courbe subit à peu de choses près une translation sur l'axe des ordonnées : le vibrato plus ample se traduit par une intensité plus élevée en décibels. Par ailleurs, c'est le chevrottement qui produit le plus grand écart d'intensité entre les oscillations (figures 8.3 et 8.4).

Centroïde spectral

Si l'intensité sonore varie relativement peu dans le vibrato (tous types confondus), des contrastes beaucoup plus prononcés se retrouvent du côté du centre de gravité spectral. De plus, la variation est plus importante lorsque le vibrato est exécuté à plus basse fréquence : elle peut atteindre les environs de 400 Hz dans le cas du vibrato lent à forte amplitude. Si l'on compare le vibrato à faible amplitude et le chevrottement, on constate que l'amplitude de leurs modulations respectives est similaire. De plus, le vibrato lent à forte amplitude tend à avoir un centroïde moyen plus élevé que les deux autres types, spécialement dans le registre médium/aigu (*Si b₅*). Cette tendance est moins apparente du côté du vibrato rapide (figures 8.5 et 8.6).

Aspect plat du signal (*flatness*)

Dans le cas de ce descripteur, les véritables disparités apparaissent plus dans le registre médium/aigu (*Si b₅*) que dans le registre grave (*Fa#₄*). Dans ce cas, c'est le chevrottement qui tend à avoir la valeur moyenne la plus haute, peu importe la fréquence de la modulation (figures 8.7 et 8.8).

Flux spectral

La variation du flux spectral est nettement plus prononcée lorsque la fréquence de la modulation est moindre. La variation est minime dans le cas du vibrato rapide, peu importe le registre, et c'est dans le registre grave (*Fa#₄*) qu'elle est la plus grande. Elle peut atteindre un facteur de 0,4 dans le cas du vibrato lent et ample dans le registre grave, par rapport à un facteur de 0,05 dans le cas du vibrato rapide (figures 8.9 et 8.10).

Aplatissement spectral (*kurtosis*)

Quant à l’aplatissement spectral, c’est dans le registre médium/aigu que sa valeur est la plus élevée, et dans ce registre, c’est le chevrotement qui atteint la plus grande variation. Dans le registre grave, les types de vibrato se distinguent lorsque la fréquence de la modulation est élevée (figures 8.11 et 8.12).

Roulement spectral (*roll-off*)

Ce descripteur, ici comme dans d’autres situations d’analyse, n’est détecté que de façon approximative par l’objet `zsa.rolloff`²⁰. Comme dans le cas du centroïde, les valeurs subissent une grande variation, ce qui est logique puisque ce descripteur est corrélé à la brillance du son. Cependant, l’amplitude de cette variation semble peu changer selon le registre ou le type de vibrato. Ou du moins, il n’est pas possible d’arriver à un constat plus précis d’après ces résultats (figures 8.13 et 8.14).

Asymétrie spectrale (*skewness*)

L’observation des courbes d’asymétrie spectrale permet aussi difficilement de tirer des conclusions. On peut toutefois affirmer que la variation ainsi que les valeurs moyennes sont plus élevées dans le registre médium/aigu que dans le registre grave. De plus, sur *Si b₅*, c’est le chevrotement qui produit les valeurs et le taux de variation les plus élevés (figures 8.15 et 8.16).

Pente spectrale globale (*slope*)

Dans le registre grave, c’est le vibrato (abdominal-thoracique) à grande amplitude qui produit la variation la plus prononcée des valeurs de pente spectrale. Dans le registre médium/aigu, le taux de variation entre le vibrato ample et le chevrotement est comparable, mais ce dernier tend à produire une valeur moyenne légèrement plus élevée (figures 8.17 et 8.18).

²⁰Dans la configuration actuelle.

Étalement spectral (*spread*)

Finalement, pour l'étalement spectral tout comme pour le centroïde, c'est dans le registre grave et avec une fréquence de modulation moindre que le plus grand écart de variation se remarque. La variation de la valeur d'étalement spectral du vibrato lent et ample est nettement plus prononcée que dans les autres cas. Ceci se remarque également, dans une moindre mesure, dans le registre médium/aigu (pour une fréquence de modulation plus lente). Sinon, de manière générale dans le cas de ce descripteur, le chevrottement ne se distingue pas particulièrement du vibrato abdominal-thoracique (figures 8.19 et 8.20).

5.1.2 Comparaison de types de vibrato

Vibrato lent et ample : entre *Fa#* et *Si b*

Maintenant, si l'on compare le vibrato lent et ample sur les deux registres (grave et médium/aigu), on peut observer diverses corrélations entre les descripteurs. En général, les courbes normalisées varient avec une plus grande amplitude dans le registre grave, mais les mêmes corrélations sont présentes dans les deux registres.

Les courbes du suivi d'amplitude, du centroïde, du roulement et de l'étalement spectraux, de la fréquence fondamentale (détectée par l'objet *fiddle~*) et, dans une moindre mesure, de l'aspect plat du spectre oscillent de la même manière, avec des amplitudes différentes. Par contre, les courbes de la pente spectrale globale et de l'asymétrie spectrale suivent une tendance inversée par rapport à ces dernières. L'aplatissement spectral semble aller dans le même sens que l'asymétrie et la pente spectrale, mais selon les résultats obtenus, cela ne s'observe que dans le registre médium/aigu. Enfin, le flux spectral semble évoluer de manière indépendante par rapport aux autres descripteurs (figures 8.21 pour le *Fa#* grave et 8.22 pour le *Si b* médium). De manière générale, les corrélations positives et négatives que l'on observe entre les différents descripteurs extraits suivent les résultats obtenus dans le cadre des analyses faites aux chapitres 6 et 7. Par ailleurs, le comportement du flux spectral est intéressant à observer en soi : ses variations se produisent à une fréquence presque deux fois plus rapide que celle des autres descripteurs, ce qui laisse penser que ces variations sont assimilables à l'instabilité générée par les états transitoires entre les extrêmes du vibrato.

Vibrato lent et ample et chevrottement lent sur *Si b*

Ici l'objectif est plutôt d'identifier certaines différences dans le comportement global des descripteurs entre le vibrato abdominal-thoracique et le chevrottement. D'abord, le roulement spectral connaît des écarts très importants dans le cas du vibrato, alors qu'il varie très peu dans le cas du chevrottement. Par contre, l'aplatissement et l'asymétrie spectraux, la pente spectrale globale ainsi que l'amplitude connaissent des variations plus importantes avec le chevrottement (figures 8.22 pour le vibrato lent à grande amplitude et 8.23 pour le chevrotement lent). Il est possible que les différents paramètres gestuels (posture, muscles contractés) intervenant dans la production sonore changent le timbre de base du son, avant même la création du vibrato comme tel.

5.2 *Fluttertongue*

Comment se comportent les descripteurs lorsqu'on exécute la technique du *fluttertongue*? Ici, le *fluttertongue* est comparé sur deux registres, avec des enregistrements sur *Fa#4* (registre grave) et sur *Si b5* (registre médium/aigu).

Comme dans le cas du vibrato, le centroïde, le roulement et l'étalement spectral et, jusqu'à un certain point l'aspect plat du spectre (surtout dans le registre grave) évoluent de manière conjointe. Suivant une tendance inversée par rapport à ces derniers descripteurs (le plus facile à observer étant l'étalement spectral), l'aplatissement et l'asymétrie spectraux évoluent ensemble. Quant à la courbe de l'aspect plat du spectre dans le registre médium/aigu, elle épouse à peu de choses près les contours des courbes d'aplatissement et d'asymétrie spectrale, mais semble le faire avec quelques dizaines de millisecondes de retard. Enfin, la courbe du flux spectral suit à peu près celle de l'aspect plat du signal, et la courbe de la pente spectrale semble se dessiner à l'inverse de la courbe de l'étalement spectral (figures 8.24 pour le *Fa#* grave et 8.25 pour le *Si b* médium)).

Pour passer directement à la prochaine section des résultats (transition entre sons brillants et ronds), cliquez [ici](#).

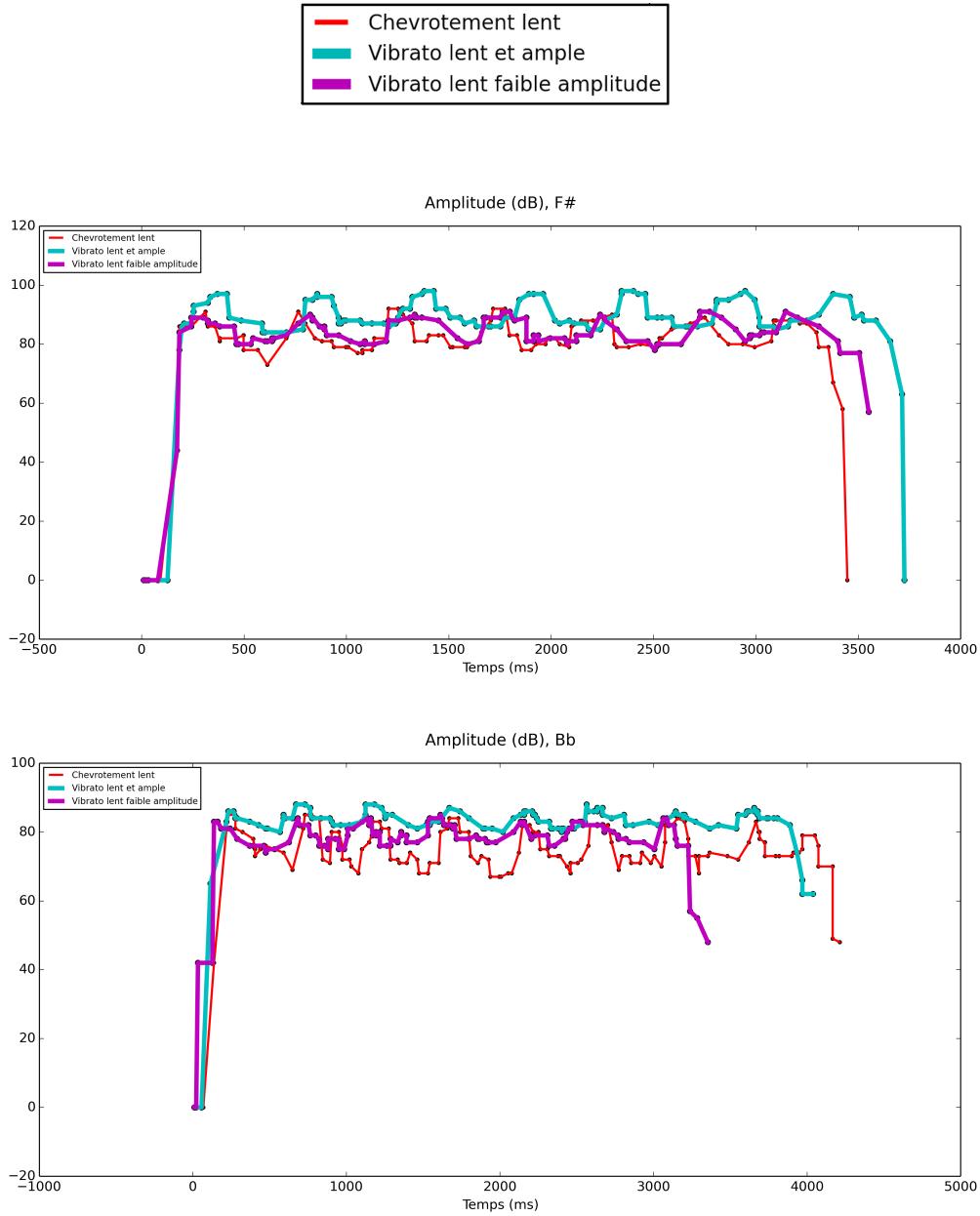


FIGURE 8.3 – Vibrato lent – Amplitude – Le suivi des variations d'amplitude (en dB) est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

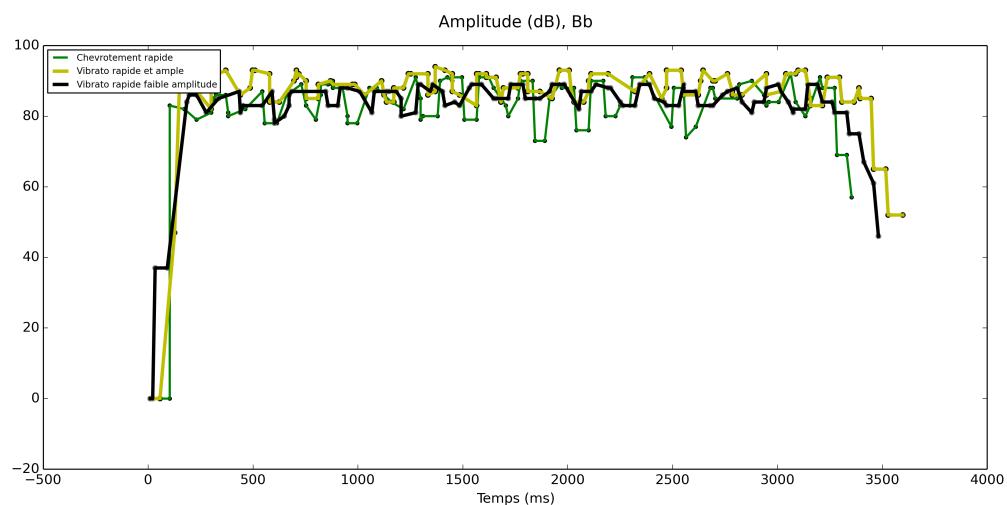
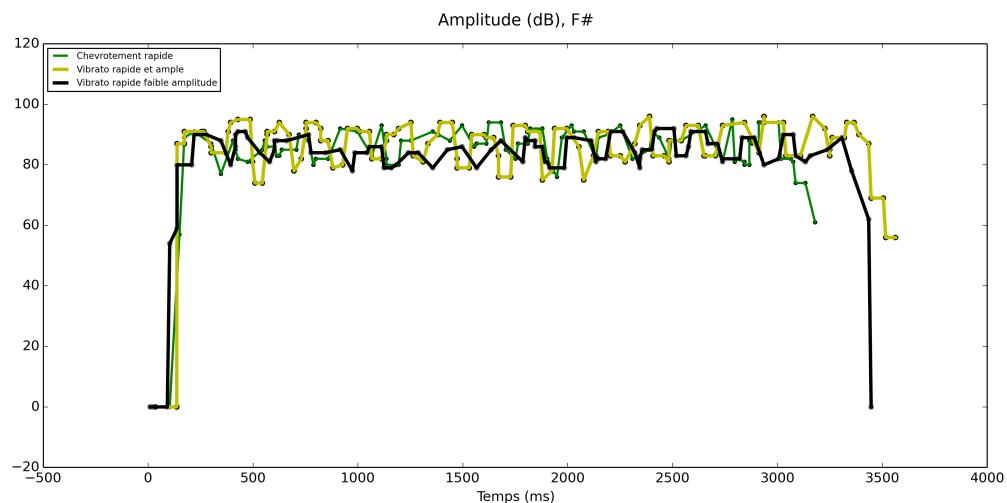
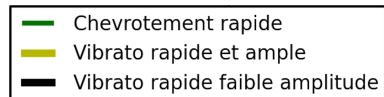


FIGURE 8.4 – Vibrato rapide – Amplitude – Le suivi des variations d'amplitude (en dB) est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

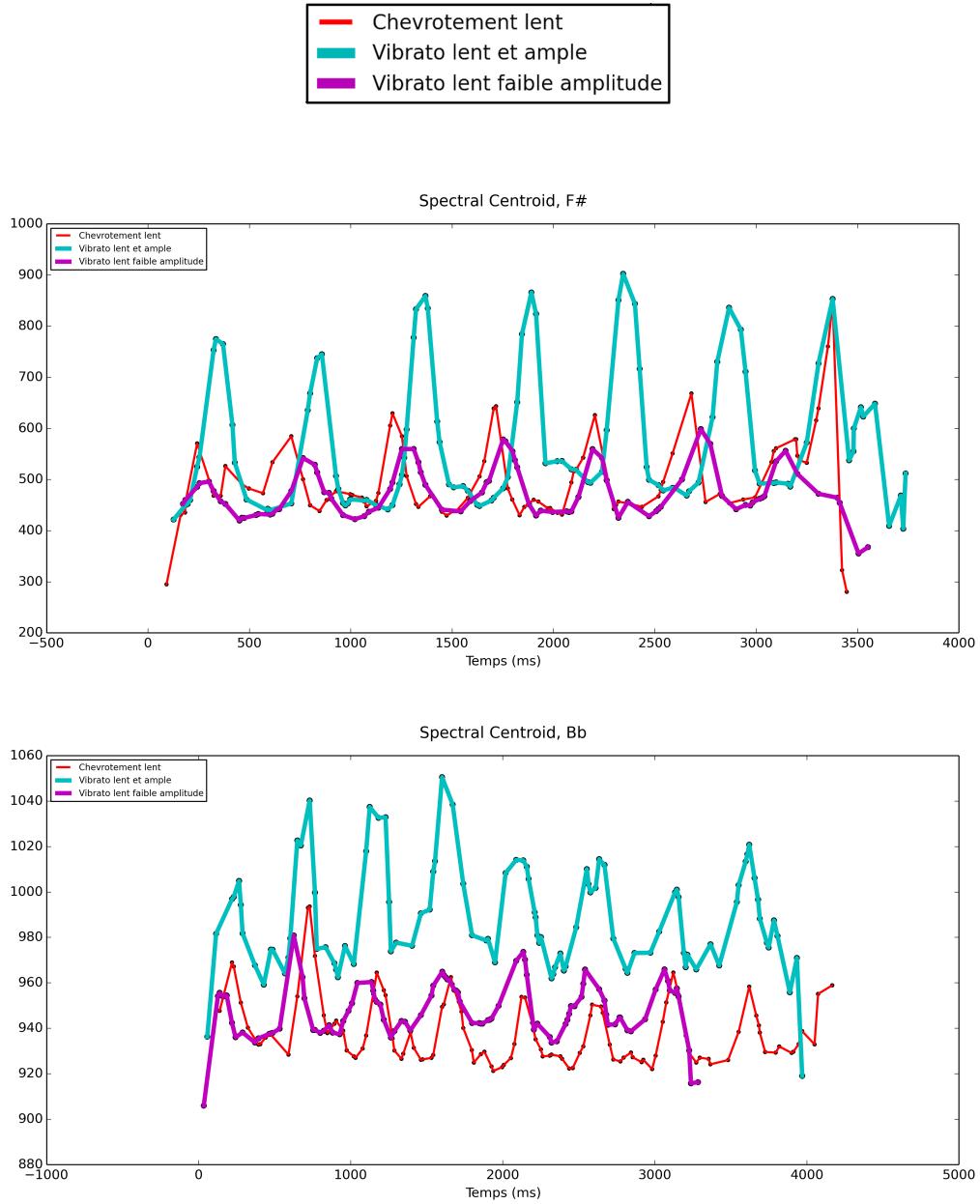


FIGURE 8.5 – Vibrato lent – Centroïde – Le suivi des variations du centroïde (en Hertz) est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

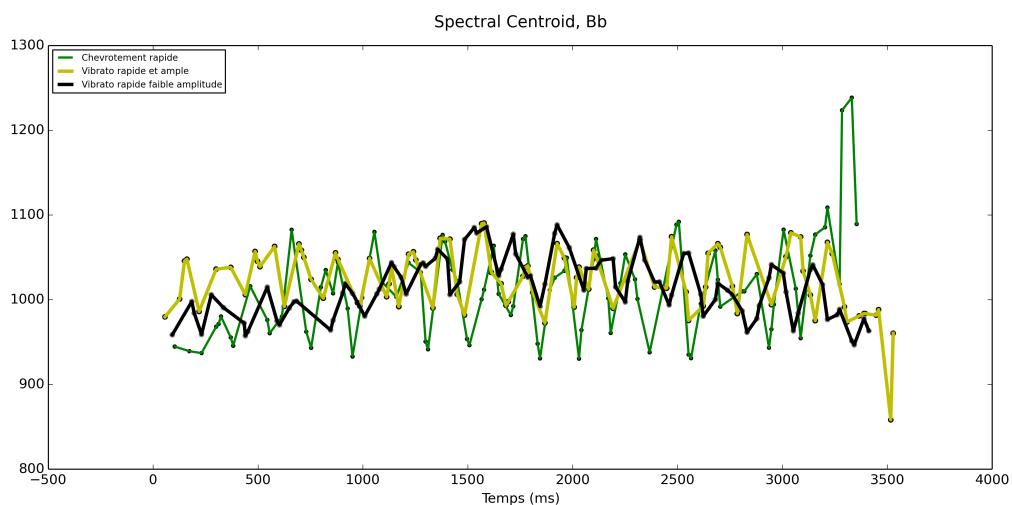
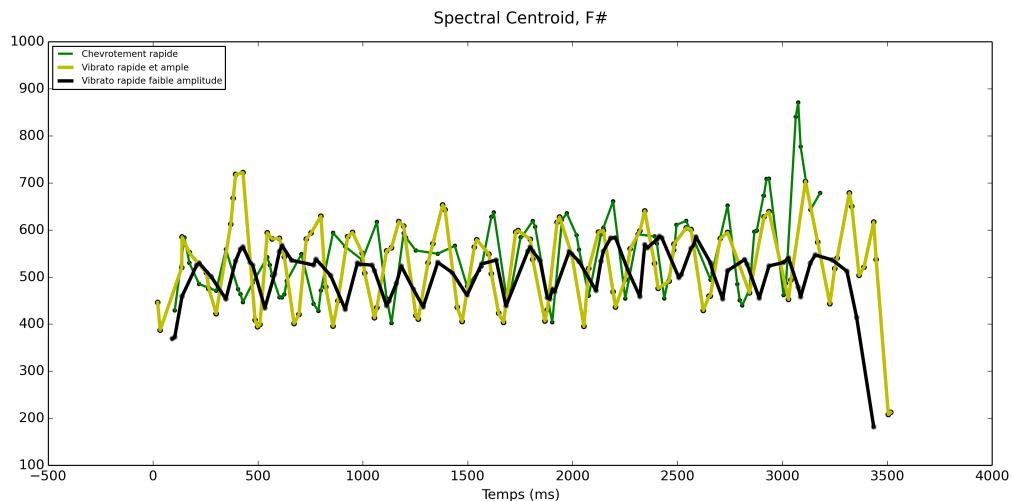
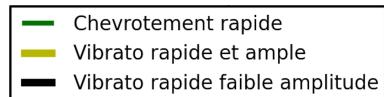


FIGURE 8.6 – Vibrato rapide – Centroïde – Le suivi des variations du centroïde (en Hertz) est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

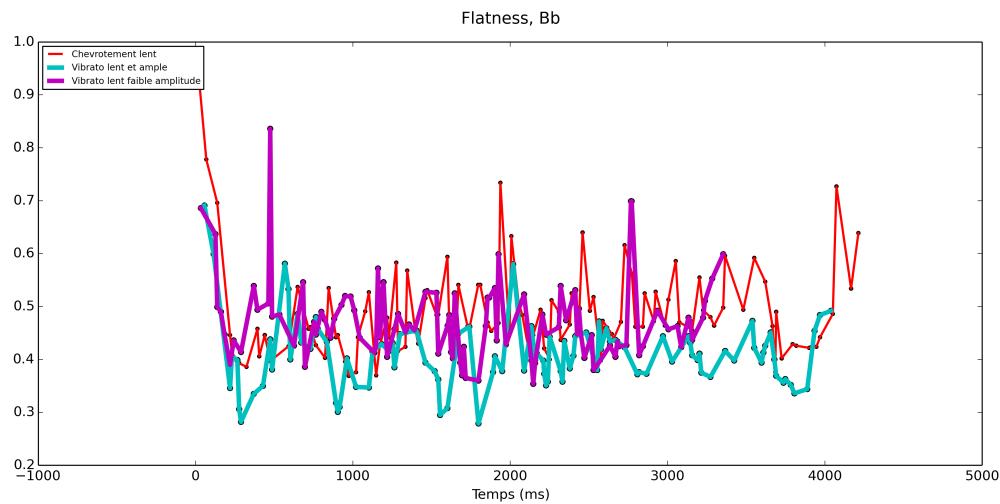
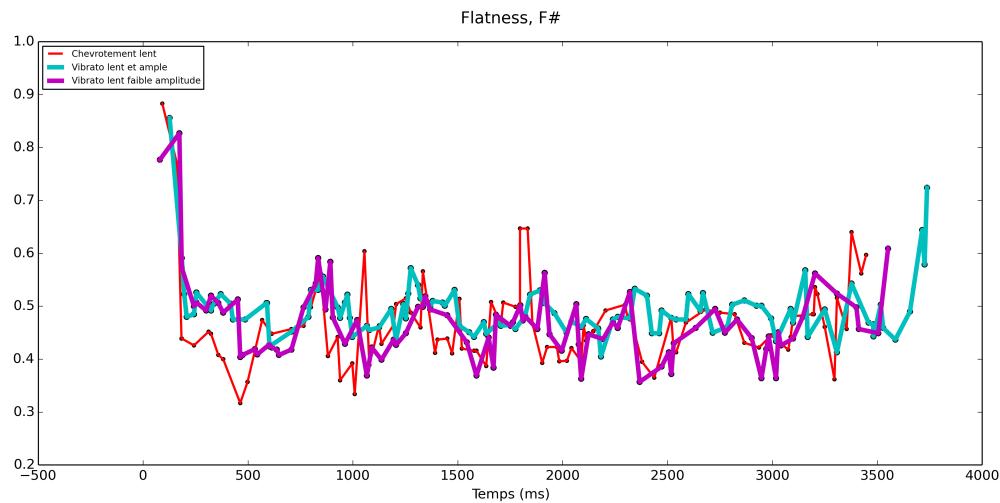
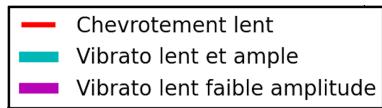


FIGURE 8.7 – Vibrato lent – Aspect plat du spectre (*Flatness*) – Le suivi des variations des valeurs liées à l'aspect plat du spectre est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

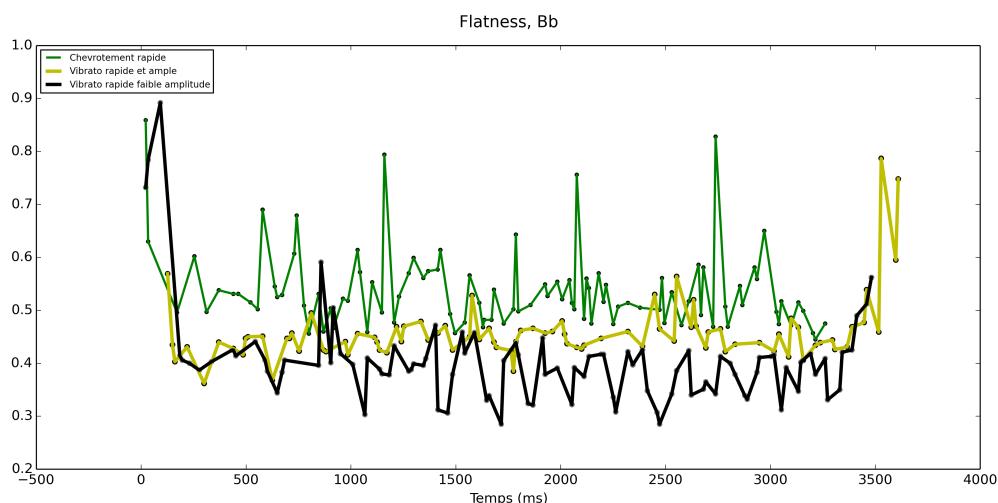
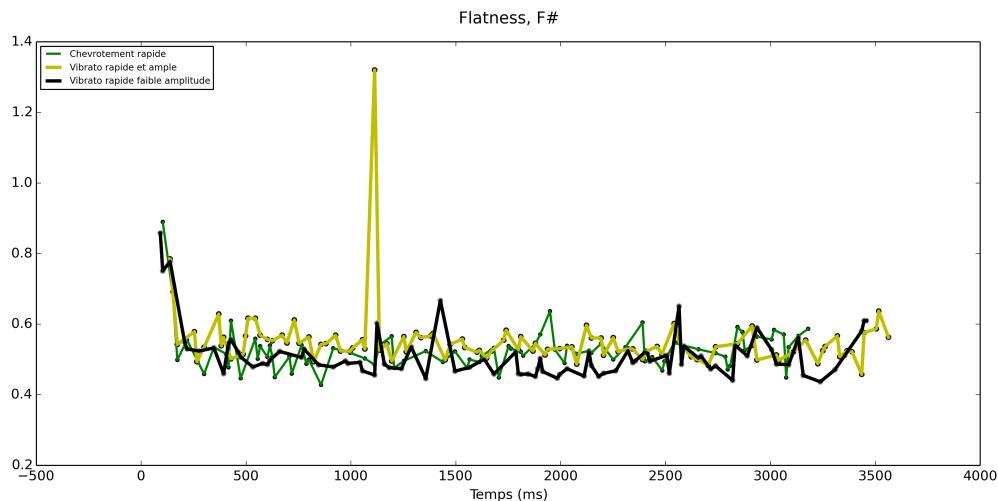
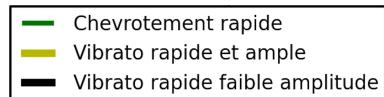


FIGURE 8.8 – Vibrato rapide – Aspect plat du spectre (*Flatness*) – Le suivi des variations des valeurs liées à l'aspect plat du spectre est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

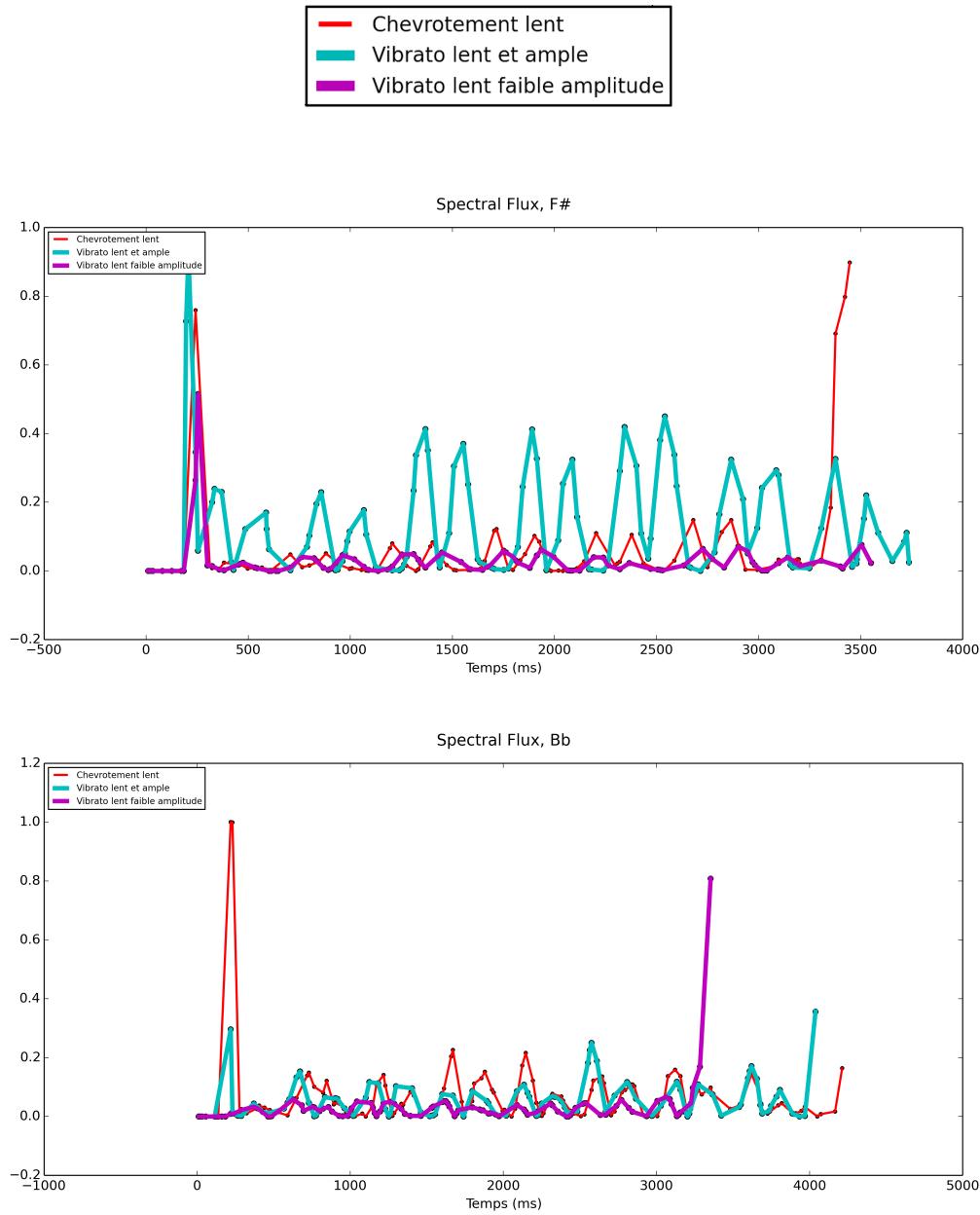


FIGURE 8.9 – Vibrato lent – Flux spectral – Le suivi des variations des valeurs liées au flux spectral est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). [Retour au texte : cliquez ici.](#)

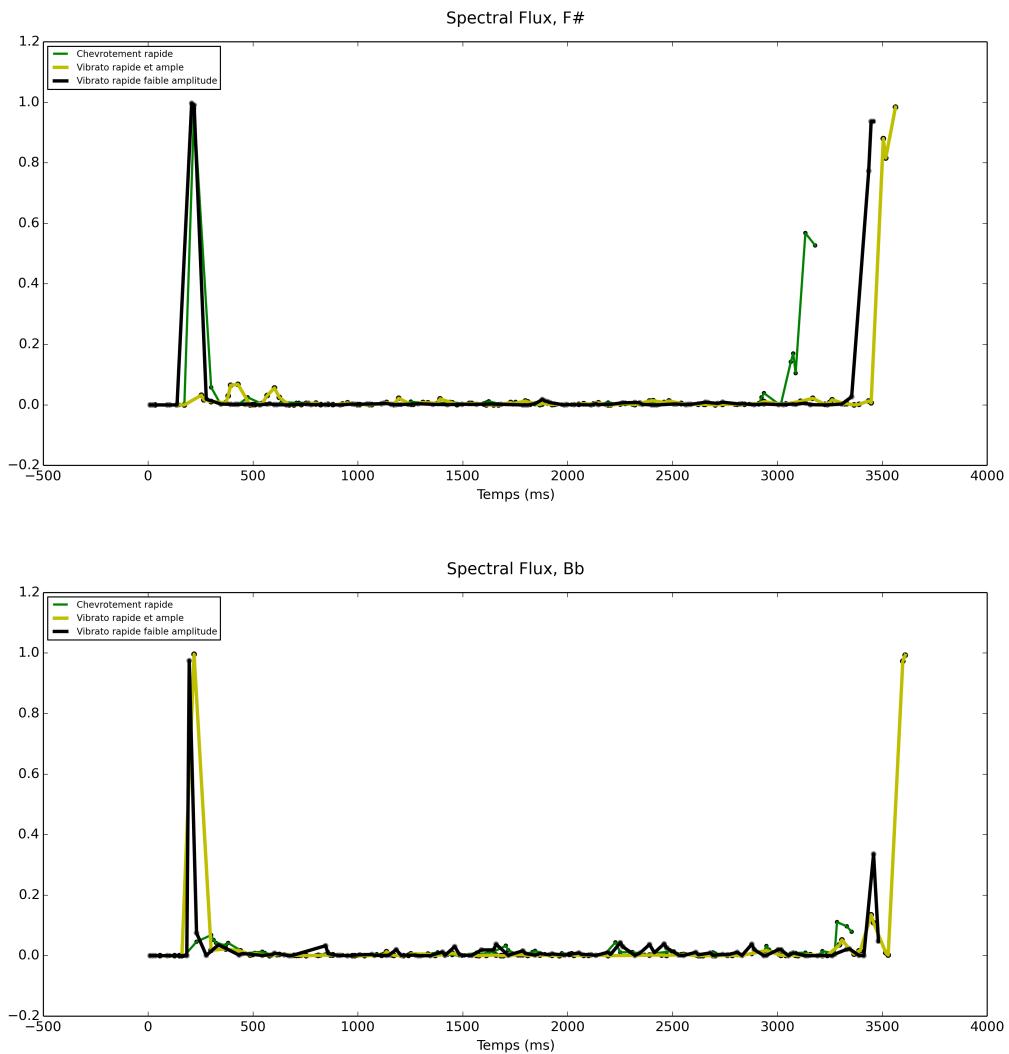
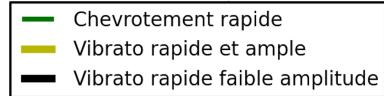


FIGURE 8.10 – **Vibrato rapide – Flux spectral** – Le suivi des variations des valeurs liées au flux spectral est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). [Retour au texte : cliquez ici](#).

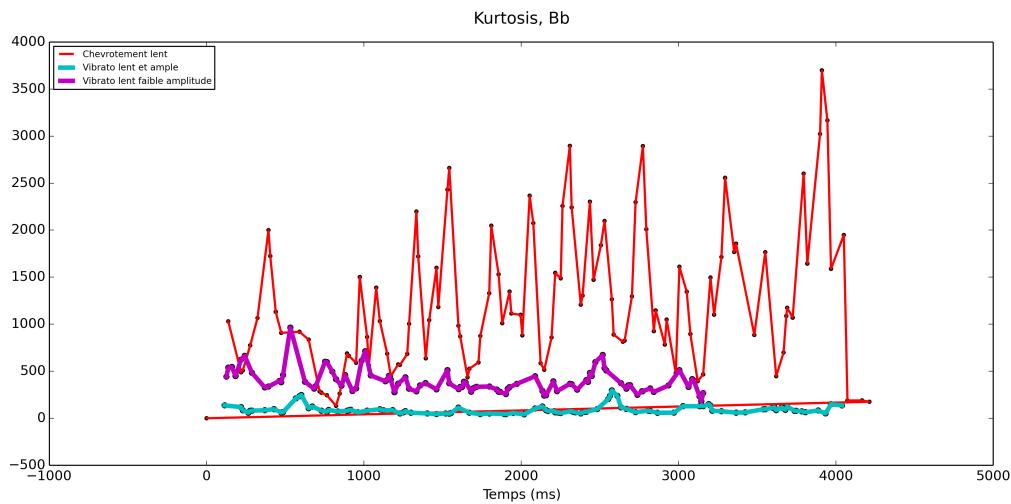
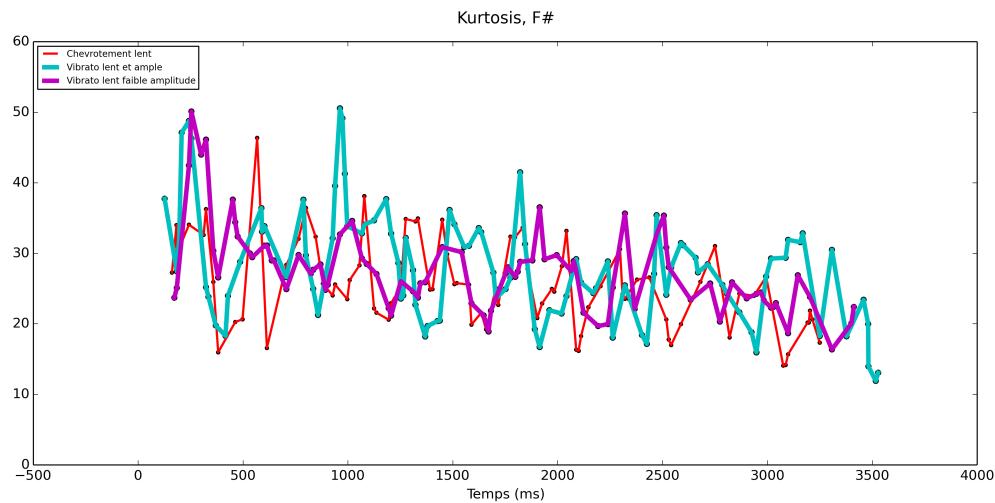
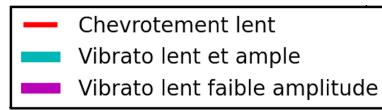


FIGURE 8.11 – Vibrato lent – Aplatissement spectral (Kurtosis) – Le suivi des variations des valeurs liées à l’aplatissement spectral est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

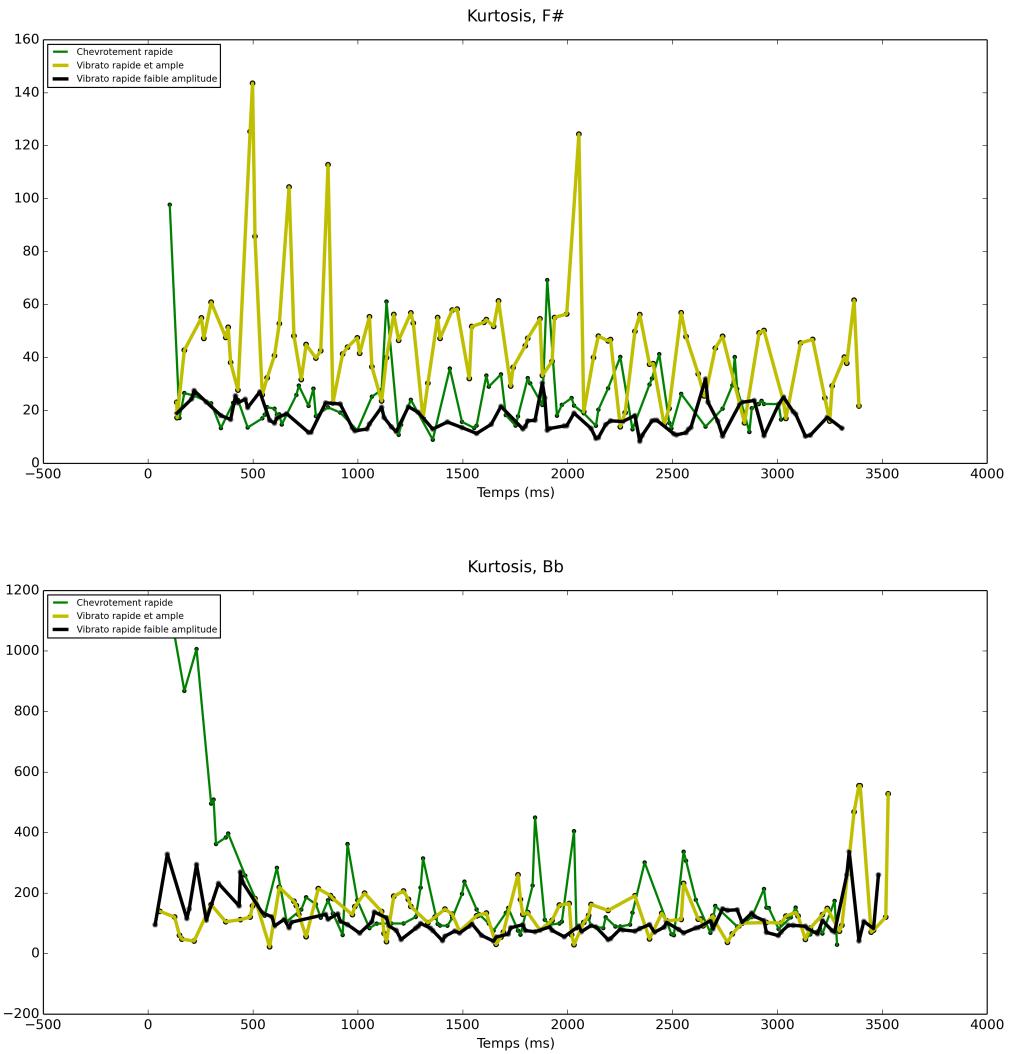
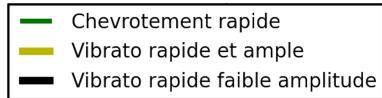


FIGURE 8.12 – Vibrato rapide – Aplatissement spectral (*Kurtosis*) – Le suivi des variations des valeurs liées à l’aplatissement spectral est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa*# (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

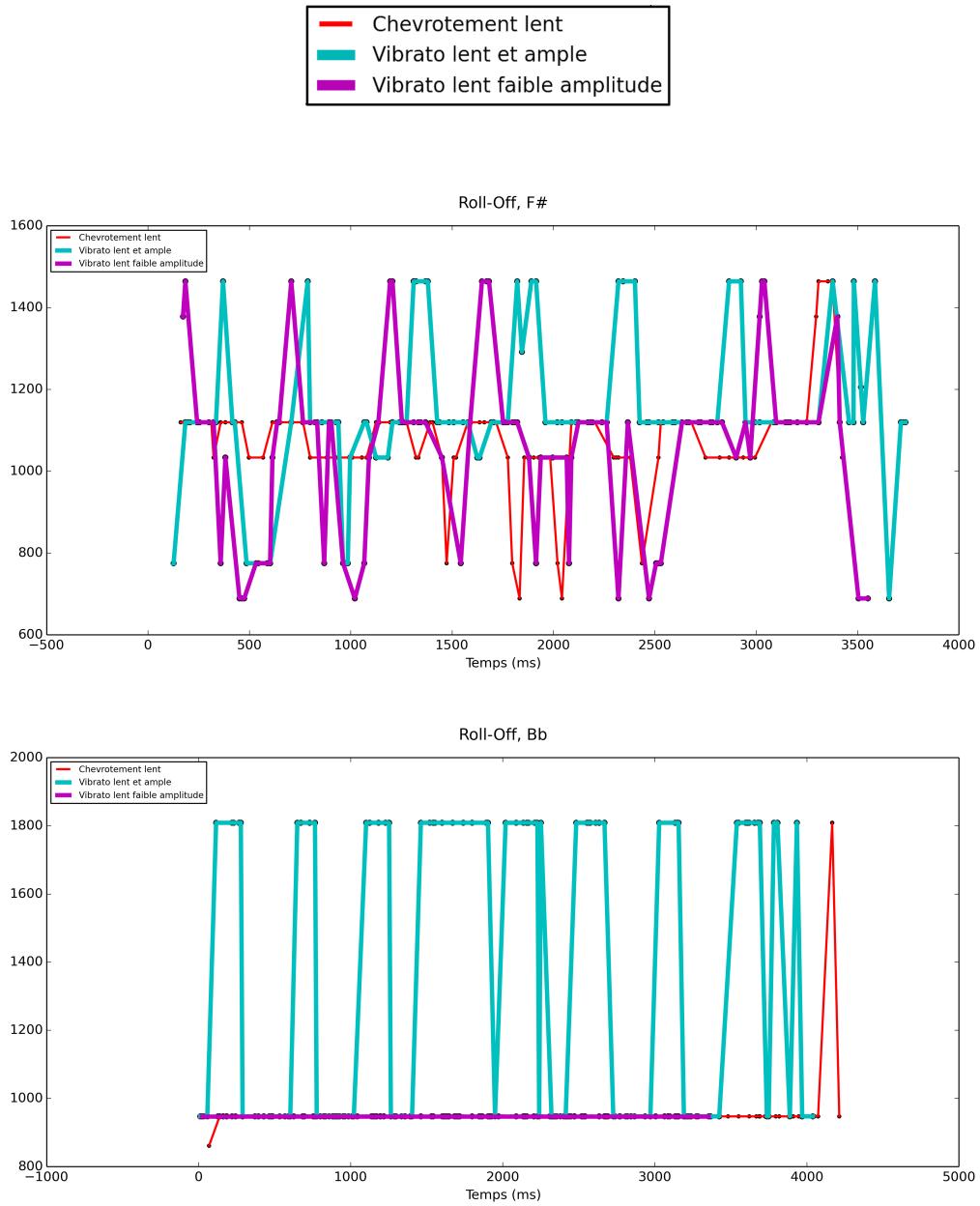


FIGURE 8.13 – Vibrato lent – Roulement spectral (*Roll-Off*) – Le suivi des variations du roulement spectral (en Hertz) est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

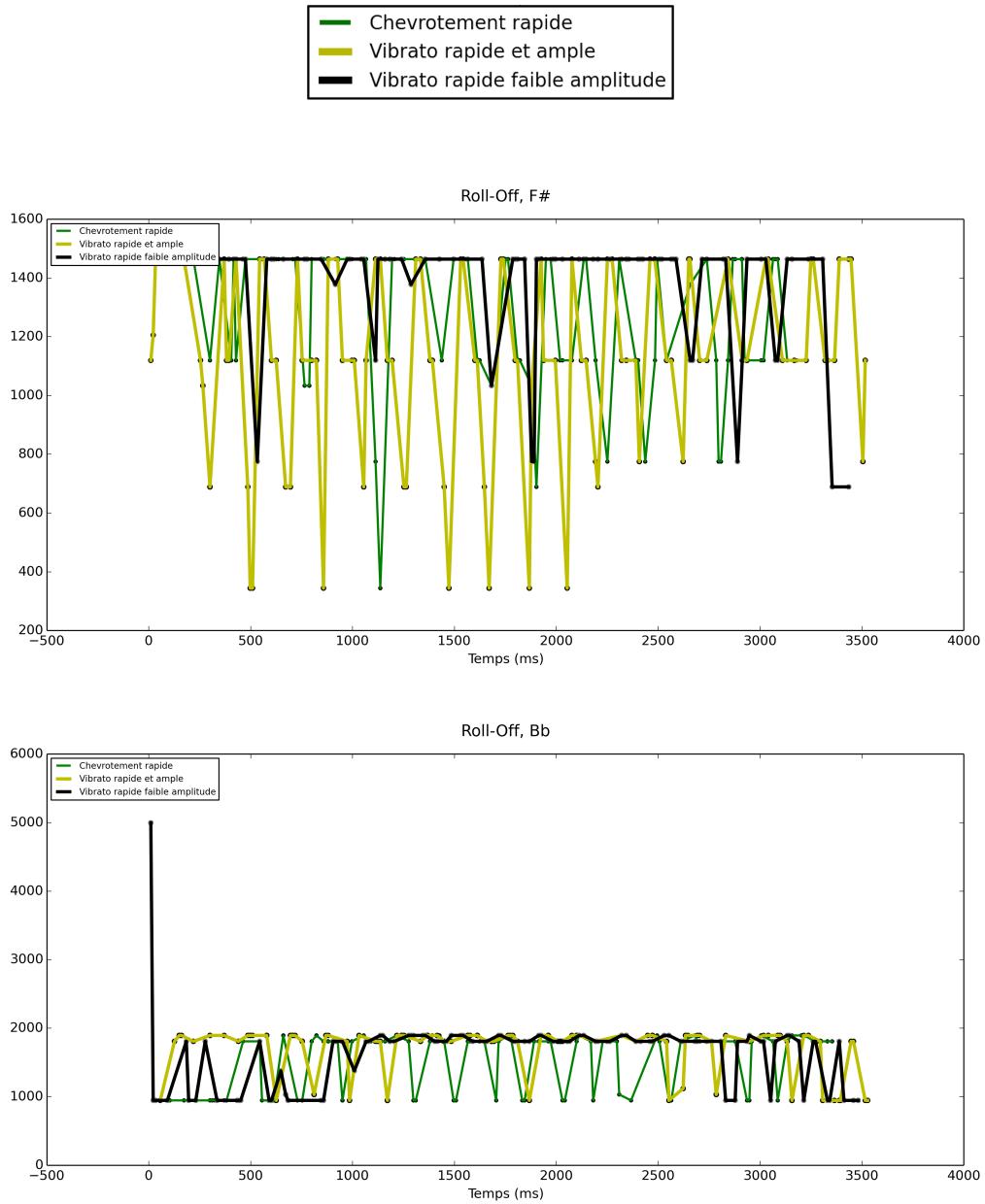


FIGURE 8.14 – **Vibrato rapide – Roulement spectral (Roll-Off)** – Le suivi des variations du roulement spectral (en Hertz) est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrotement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa*# (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). [Retour au texte : cliquez ici](#).

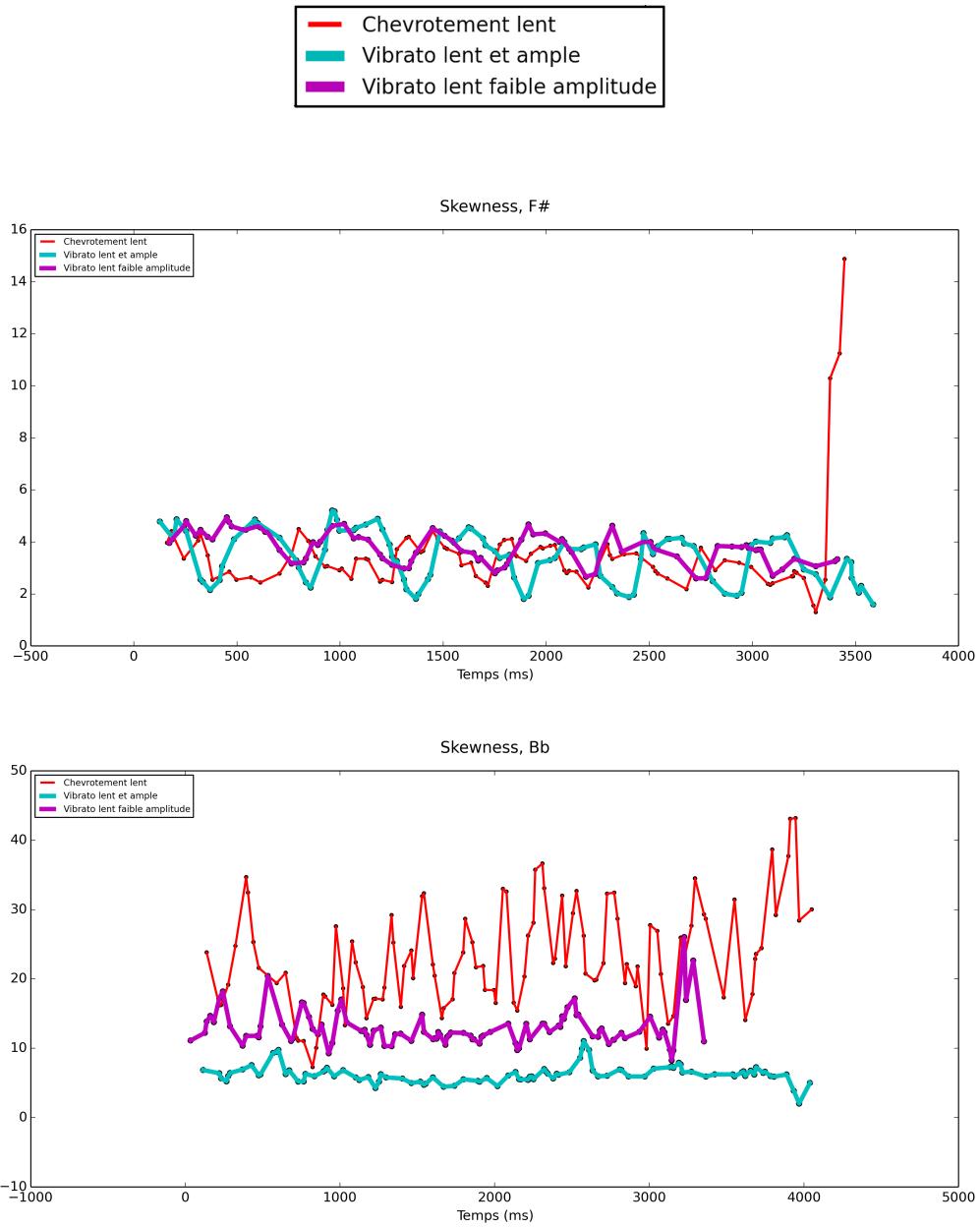


FIGURE 8.15 – **Vibrato lent – Asymétrie spectrale (Skewness)** – Le suivi des variations des valeurs liées à l'asymétrie spectrale est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

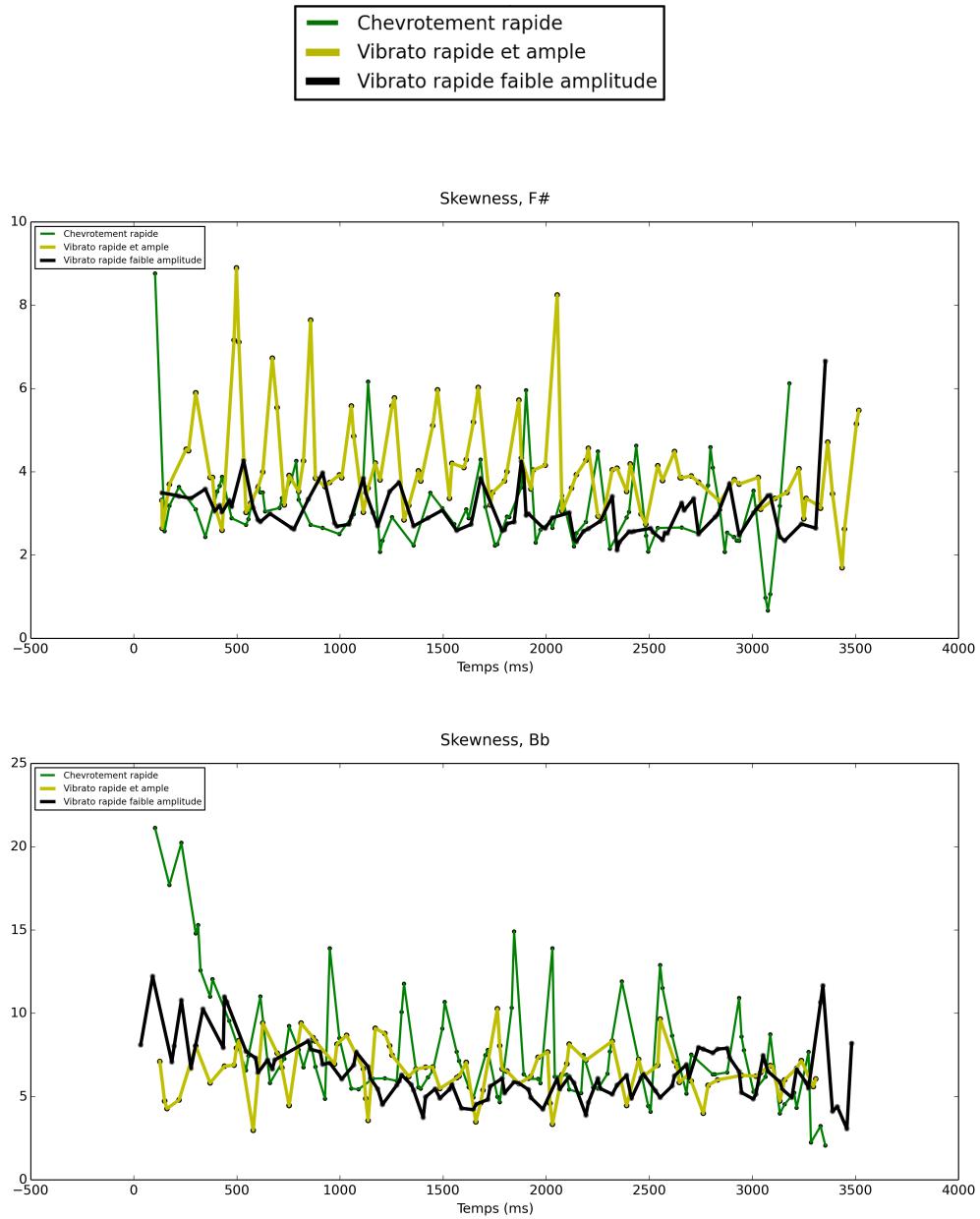


FIGURE 8.16 – Vibrato rapide – Asymétrie spectrale (Skewness) – Le suivi des variations des valeurs liées à l'asymétrie spectrale est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrotement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

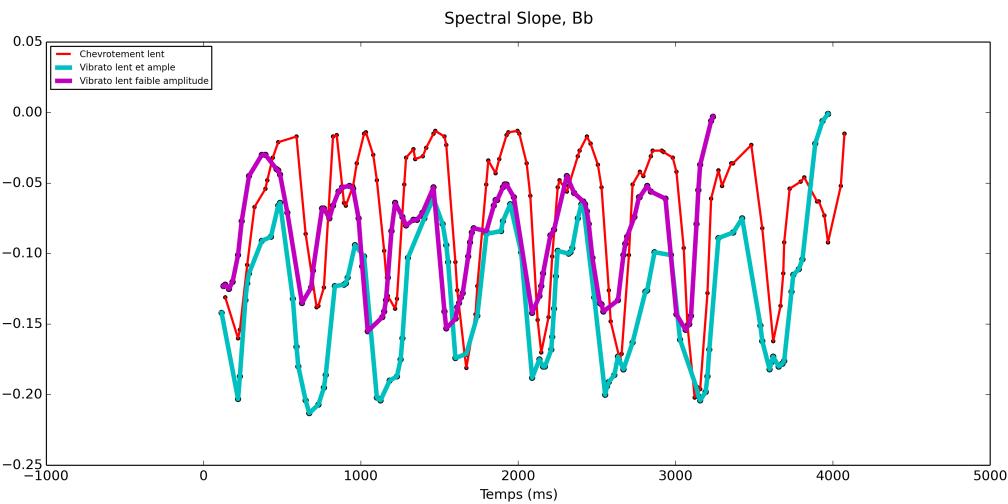
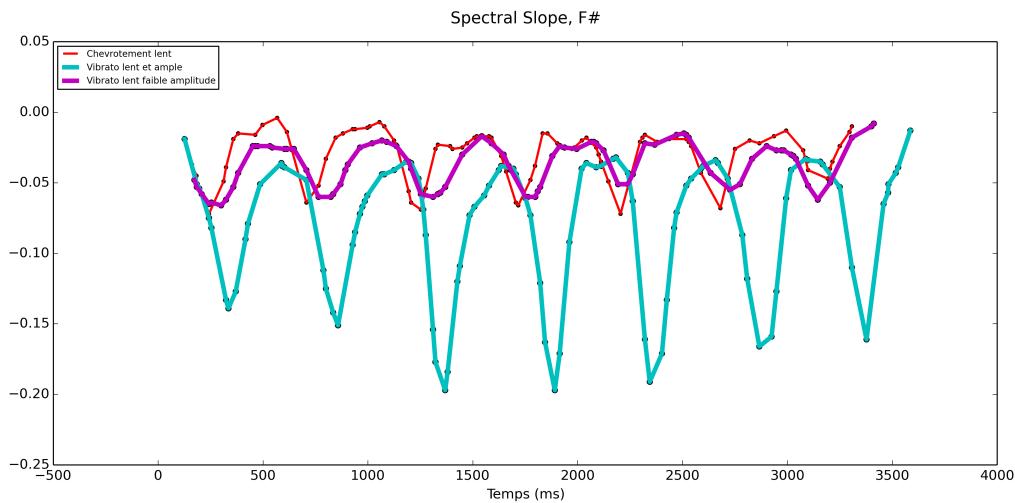
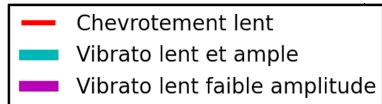


FIGURE 8.17 – Vibrato lent – Pente spectrale globale (Slope) – Le suivi des variations des valeurs liées à la pente globale du spectre est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

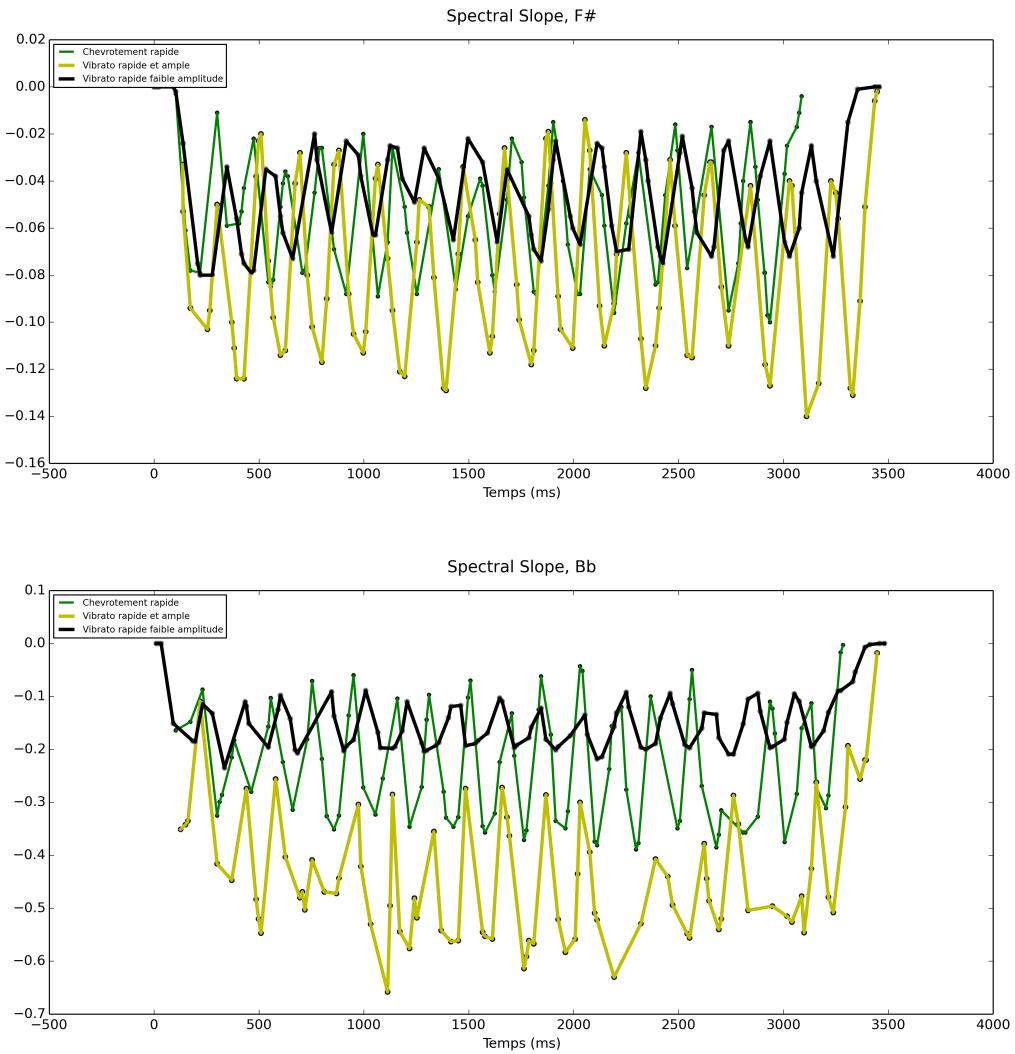
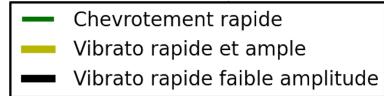


FIGURE 8.18 – **Vibrato rapide – Pente spectrale globale (Slope)** – Le suivi des variations des valeurs liées à la pente globale du spectre est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

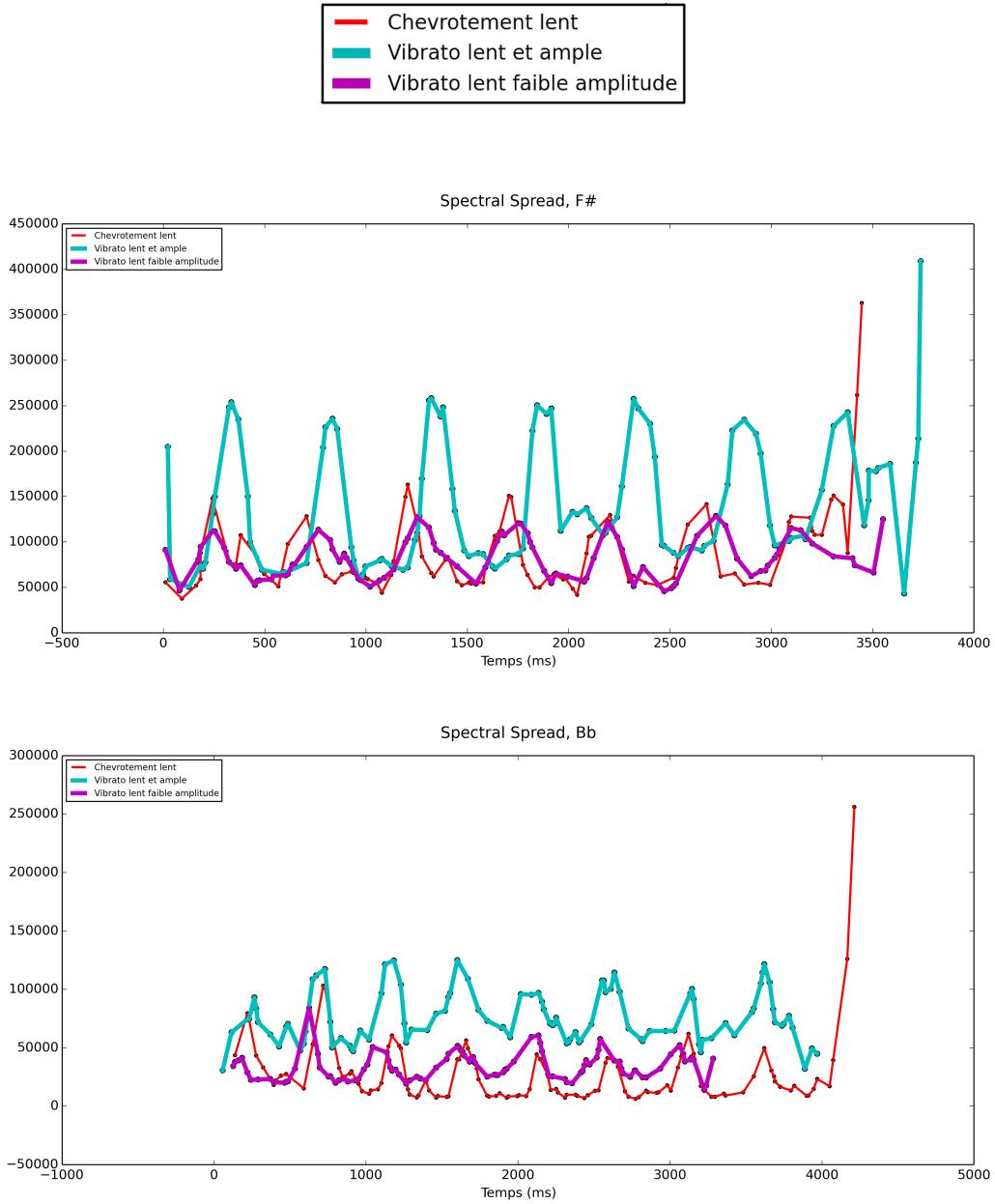


FIGURE 8.19 – Vibrato lent – Étalement spectral (Spread) – Le suivi des variations des valeurs liées à l'étalement spectral est représenté ici pour trois types de vibrato lent : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

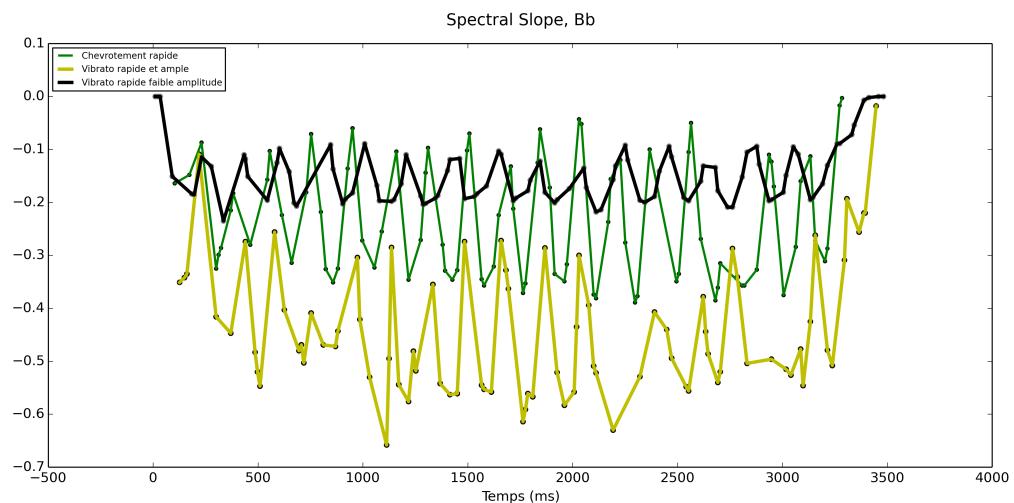
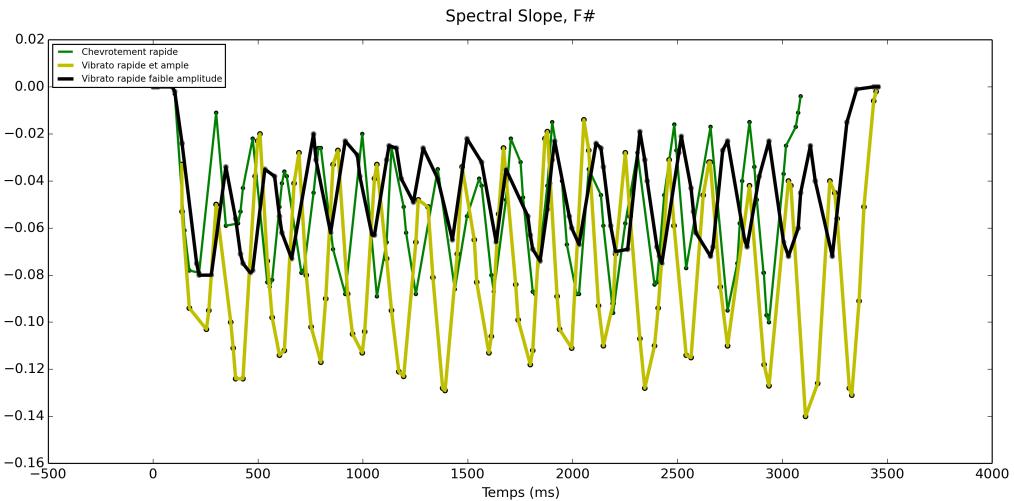
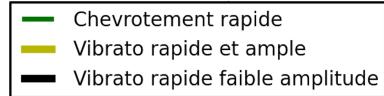


FIGURE 8.20 – Vibrato rapide – Étalement spectral (Spread) – Le suivi des variations des valeurs liées à l'étalement spectral est représenté ici pour trois types de vibrato rapide : chevrottement (vibrato de larynx), vibrato lent et ample (abdominal-thoracique), et lent et de faible amplitude (abdominal-thoracique). Le graphique du haut montre les résultats obtenus à partir de sons enregistrés sur *Fa#* (371,68 Hz), tandis que le graphique du bas montre ceux obtenus à partir de sons enregistrés sur *Si b* (936,57 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

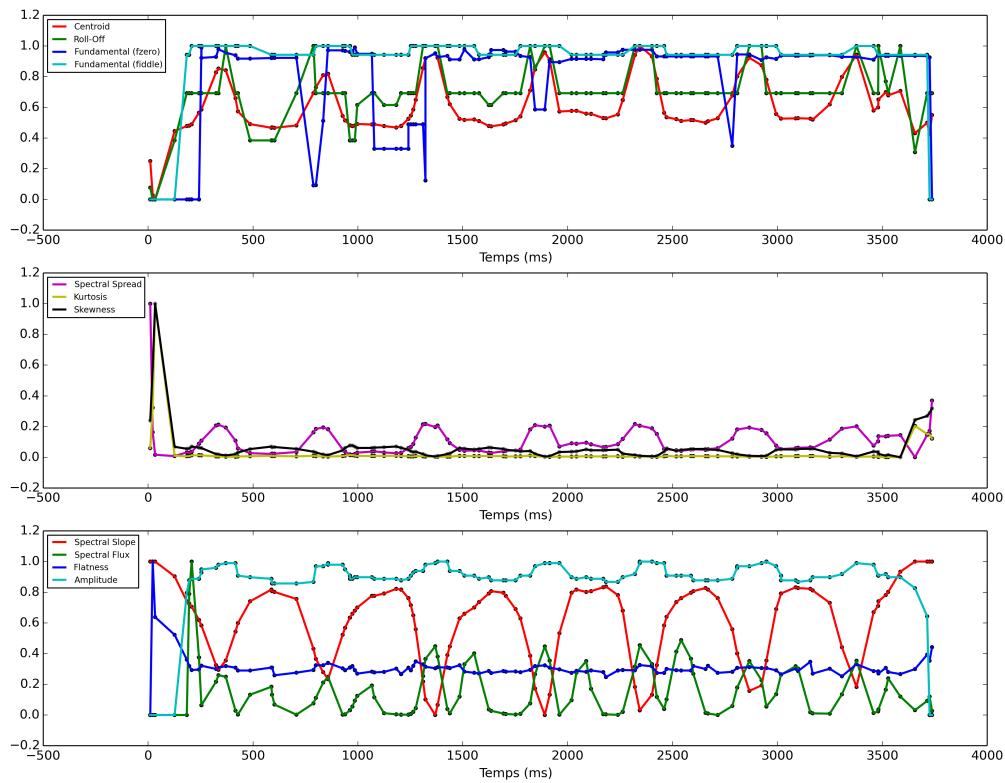
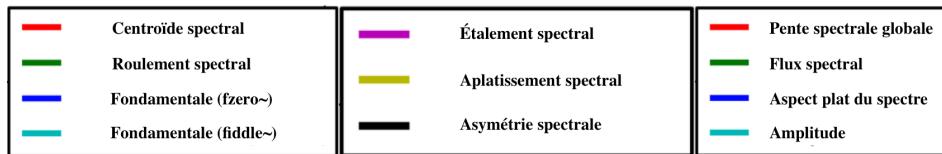


FIGURE 8.21 – Fa # – Vibrato lent à grande amplitude – Le suivi de 11 descripteurs du timbre pour un vibrato lent à grande amplitude joué sur *Fa#* (371,68 Hz) et représenté. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

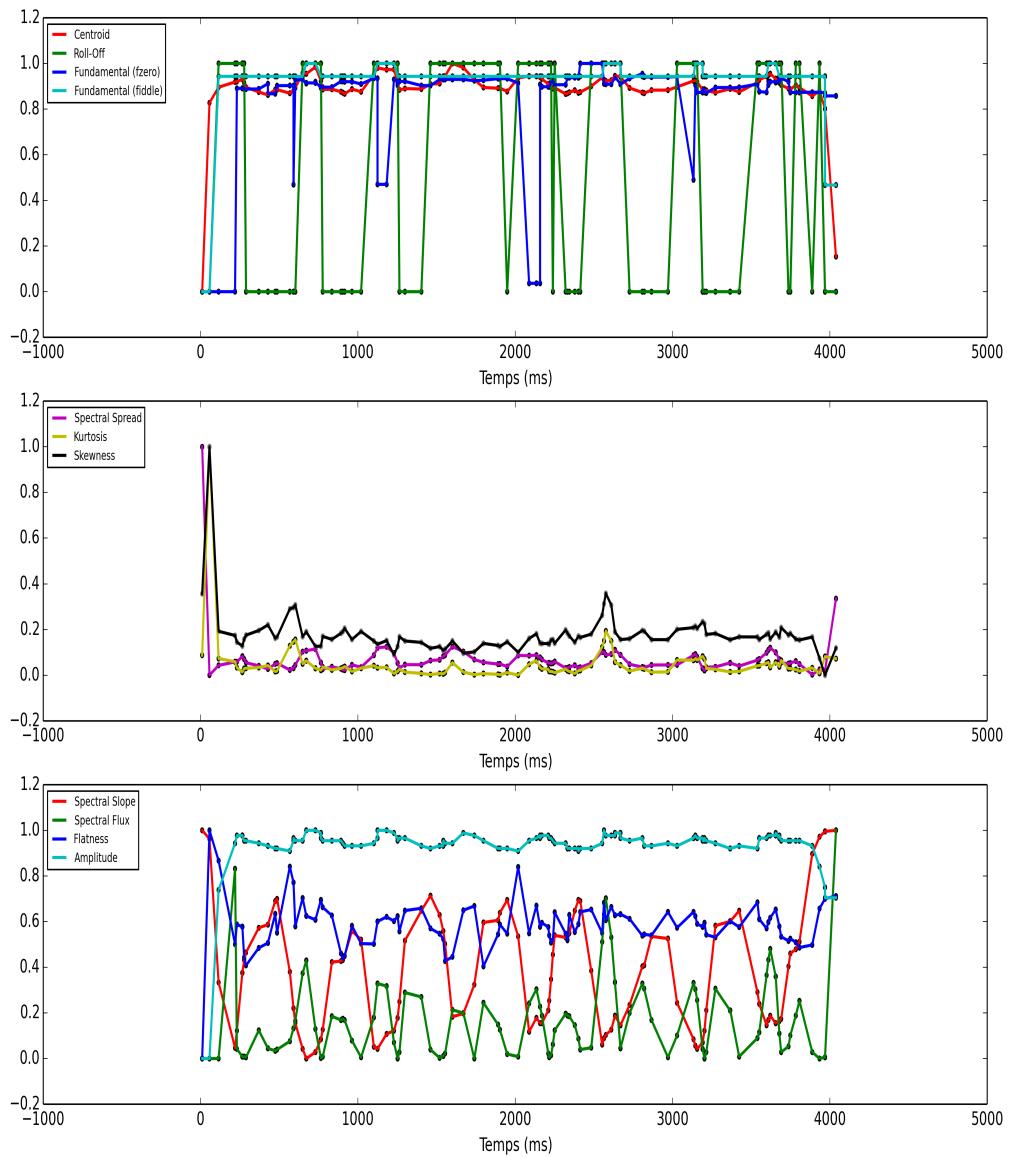
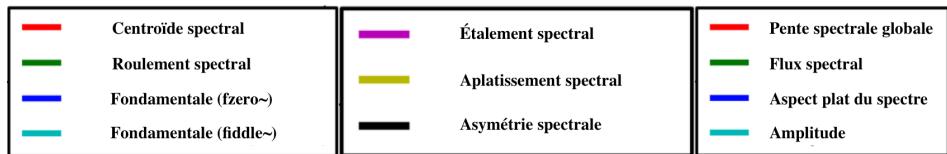


FIGURE 8.22 – *Si b* – Vibrato lent à grande amplitude – Le suivi de 11 descripteurs du timbre pour un vibrato lent à grande amplitude joué sur *Si b* (936,57 Hz) et représenté. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

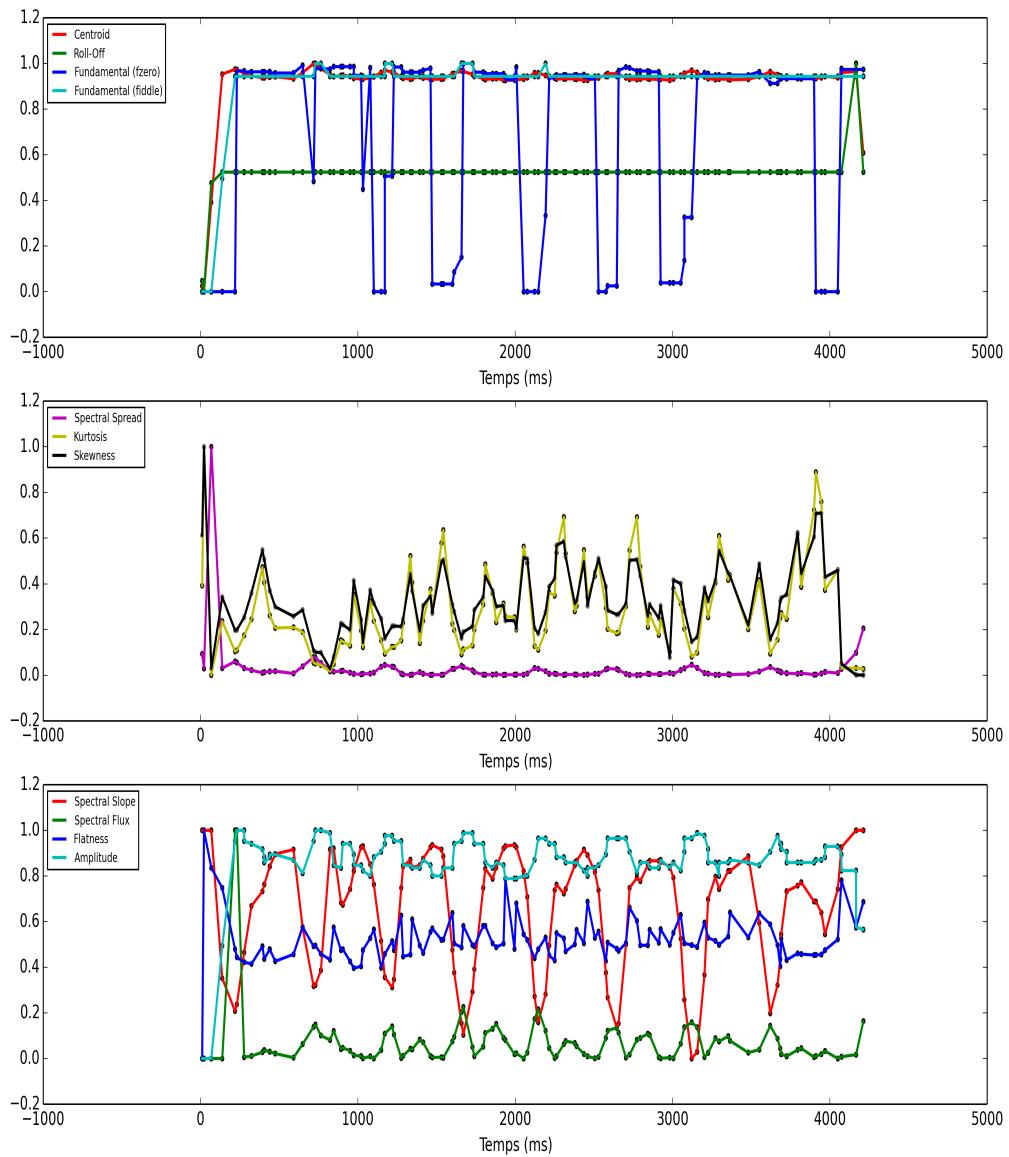
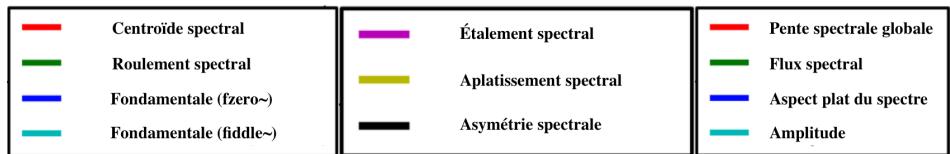


FIGURE 8.23 – *Si b* – Chevrotement lent – Le suivi de 11 descripteurs du timbre pour un chevrotement (vibrato de larynx) joué sur *Si b* (936,57 Hz) et représenté. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). Retour au texte : [cliquez ici](#).

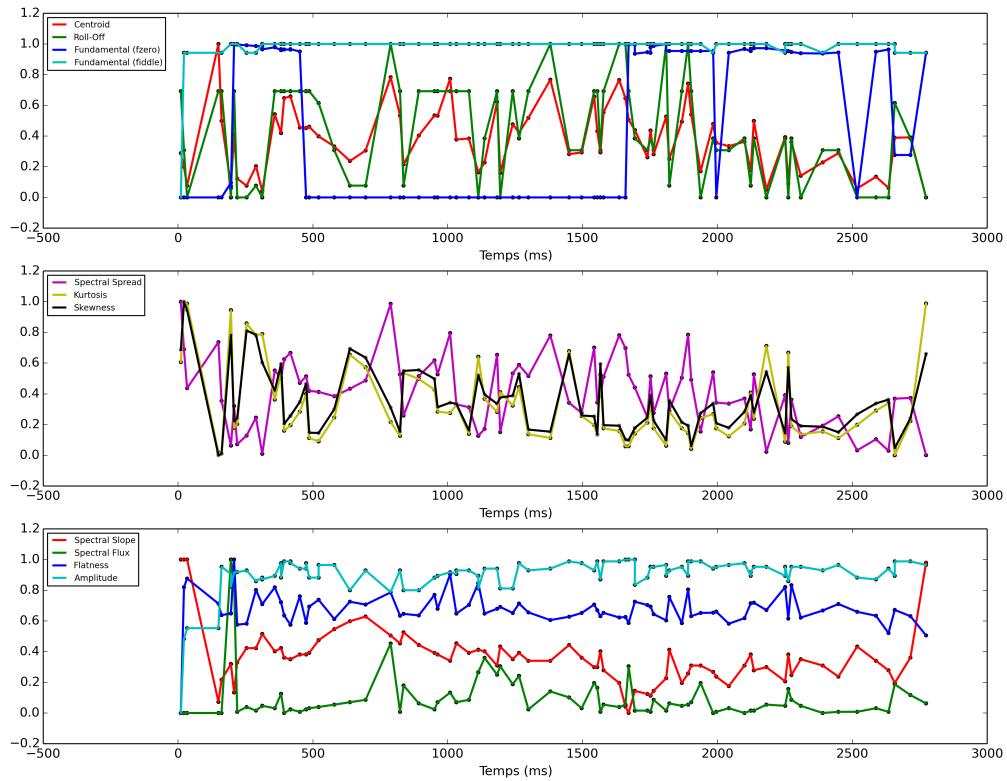
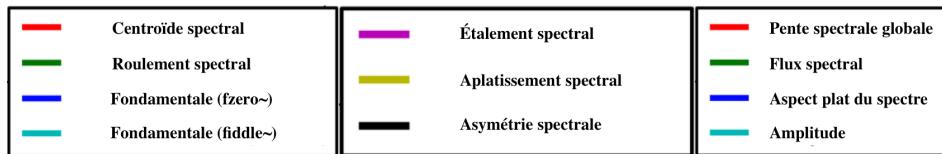


FIGURE 8.24 – *Fa # – Fluttetongue* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre pour un son avec *fluttetongue* joué sur *Fa#* (371,68 Hz) et représenté. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

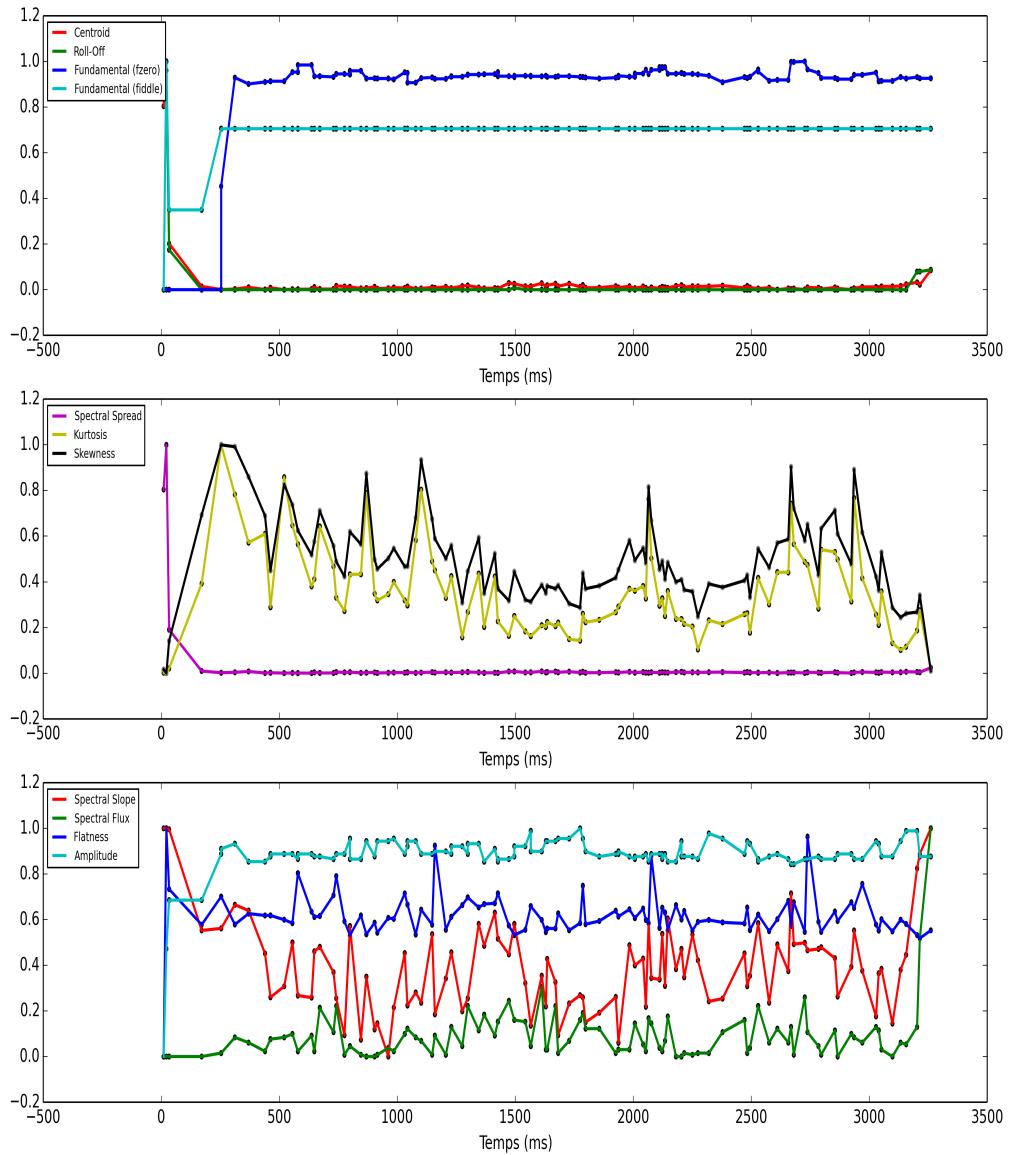
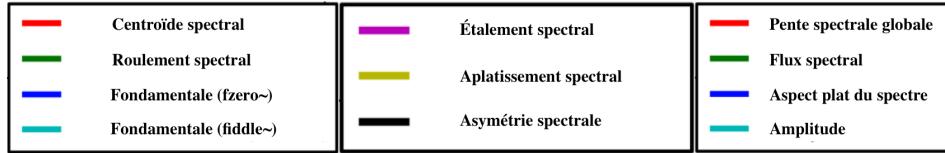


FIGURE 8.25 – *Si b – Fluttetongue* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre pour un son avec *fluttetongue* joué sur *Si b* (936,57 Hz) et représenté. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

5.3 Changements de timbre : brillant/rond

Comme nous l'avons vu, le changement de brillance dans le registre grave de la flûte traversière se traduit principalement par un changement de la forme de l'embouchure : plus plate et élargie pour les sons brillants et plus ronde pour les sons dits ronds, du moins dans le cas de cette étude. Voici ce que l'on observe lorsque l'on effectue un suivi en temps réel de changement de brillance dans le son.

5.3.1 Observation générale des changements de timbres

De brillant à rond, nuance *f*

Dans les résultats des expériences du chapitre précédent, on constate que la brillance du son est fortement corrélée à l'usage d'une nuance *forte* ; autrement dit, on utilise la brillance comme moyen d'amplifier le registre dynamique de la flûte. On peut alors s'attendre à une diminution de la valeur des descripteurs caractéristiques de la brillance, soit le centroïde spectral et la fréquence de roulement spectral (*roll-off*).

C'est effectivement ce qui se passe. Lors du passage de brillant à rond, nuance *f* (figures 8.26 pour *Do#*₄ et 8.27 pour *Fa#*₄), les courbes correspondant au **centroïde** (rouge, en haut), au **roulement spectral** (vert, en haut), à l'**étalement spectral** (magenta, au milieu) et au **suivi d'amplitude** (cyan, en bas) ont toutes les trois une pente descendante. Le descripteur **flatness** (aspect plat du spectre ; bleu, en bas) ne suit pas clairement la même tendance, mais s'en rapproche dans le cas du *Do#*, avec une courbe très accidentée. Le comportement de la **pente spectrale** (*slope* ; rouge, en bas) est différent pour les deux notes : dans le cas du *Do#*₄, elle remonte au moment de la transition, tandis que dans le cas du *Fa#*₄, elle descend constamment pour remonter vers la fin du fichier sonore.

Le comportement du **flux spectral** (vert, en bas) n'est pas constant : il tend à être élevé lors des transitoires d'attaque et d'extinction, et marque le moment de la transition entre brillant et rond dans le cas du *Do#*₄. Enfin, les courbes d'**aplatissement** et d'**asymétrie spectraux** (respectivement *kurtosis* et *skewness*, jaune et noir, au milieu) ont, pour leur part, une pente inverse à celle du centroïde spectral : elles tendent à monter graduellement, même si leur pente n'est pas très prononcée. Ils tendent, eux aussi, à être élevés lors des transitoires d'attaque

et d'extinction. Quant à la **fréquence fondamentale** (cyan, en haut), elle est convenablement détectée par l'objet `fiddle~`, mais détectée seulement dans le cas du *Fa#4* par l'objet `fzero~` (bleu, en haut) et ce, de manière plutôt inconstante.

De brillant à rond, nuance *p*

Lorsque l'on observe le même changement de timbre – brillant à rond – mais avec la nuance *p*, certaines tendances se répètent. Le **centroïde**, le **roulement** et l'**étalement** spectraux (en haut) ainsi que l'amplitude (en bas) suivent tous une pente descendante. Les descripteurs **aplatissement** (*kurtosis*) et **asymétrie** (*skewness*) suivent aussi la même tendance que dans l'exemple qui précède. Quant aux courbes du **flux spectral**, de la **pente du spectre** et, dans une moindre mesure, de son **aspect plat**, elles ont une trajectoire plus erratique qu'avec la nuance *f* (figures 8.28 pour *Do#4* et 8.29 pour *Fa#4*).

De rond à brillant, nuance *f*

Si l'on inverse le changement de timbre, en passant de rond à brillant (en nuance *f*), les descripteurs **centroïde**, **roulement**, **étalement** spectraux ainsi que le suivi d'**amplitude** inversent la pente de leurs courbes, en montant graduellement à mesure que le son gagne en brillance. Les descripteurs **aplatissement** et **asymétrie** inversent également leurs tendances contraires en descendant avec la brillance. Il est plus difficile de noter une tendance constante dans le comportement du **flux spectral**, de l'**aspect plat** du spectre et de la **pente spectrale**, dont les courbes diffèrent entre les deux notes (*Do#4*, figure 8.30 et *Fa#4*, figure 8.31).

De rond à brillant, nuance *p*

Avec la nuance *p*, le comportement du **centroïde**, du **roulement**, de l'**étalement** spectraux ainsi que du suivi d'**amplitude** sont sensiblement les mêmes qu'avec la nuance *f* (ils montent), tout comme celui des descripteurs **aplatissement** et **asymétrie** (qui descendent). Toutefois, la **pente spectrale** se comporte différemment pour les deux notes : elle descend avec la brillance dans le cas du *Do#4*, mais monte dans le cas du *Fa#4* ; le comportement du **flux spectral** et de l'**aspect plat** du spectre est également difficile à cerner. Enfin, la fréquence fondamentale est correctement

déTECTée par l’objet **fiddle~**, mais pas du tout par l’objet **fzero~** (figures 8.32 pour *Do#₄* et 8.33 pour *Fa#₄*).

5.3.2 Observations sur certains descripteurs

Centroïde spectral

En observant plus attentivement le centroïde pour les quatre fichiers sonores décrits plus haut, on remarque une fois de plus qu’il est plus élevé lorsque le son est plus brillant, mais aussi que la tendance est plus accentuée pour les sons joués avec la nuance *f*. Cela confirme le fait que la différence dynamique et la fréquence du centroïde spectral sont fortement corrélées (Cf. figure 8.34 pour le suivi du centroïde).

Les courbes du suivi d’amplitude se comportent de la même manière, mais on constate aussi que l’écart dynamique entre les nuances *p* et *f* n’est que de l’ordre de quelques décibels. Ces deux faits indiquent que le changement de brillance tend à se confondre avec une différence dynamique (Cf. figure 8.35 pour le suivi d’amplitude).

Roulement spectral (*roll-off*)

Le roulement spectral suit la même tendance que le centroïde (figure 8.34). Cependant, l’objet **zsa.rolloff~** semble ne pas toujours bien effectuer le calcul de ce descripteur, dont les résultats ressemblent à une approximation de la fréquence de roulement. Celle-ci semble mieux détECTée dans le cas du *Do#₄* que du *Fa#₄*. Dans le premier cas, l’écart fréquentiel est d’environ 300 Hz entre le roulement (constant) le moins élevé et le plus élevé, alors que dans le second, la plupart des valeurs semblent être contenues dans un intervalle d’environ 400 Hz (Cf. figure 8.36 pour le suivi du roulement spectral).

Aplatissement spectral (*kurtosis*)

De même, la courbe de l’aplatissement spectral suit celle du centroïde (figure 8.34). Par contre, le premier tend à se comporter de manière plus erratique à mesure que l’on monte dans le registre de la flûte (*Fa#₄* par rapport au *Do#₄*) (Cf. figure 8.37 pour le suivi de l’aplatissement spectral).

Flux et asymétrie spectraux

Les courbes du flux spectral présentent peu de corrélations avec le niveau de brillance ou le niveau dynamique ; cependant, le flux augmente durant les transitoires d'attaque et d'extinction, comme l'asymétrie spectrale. Celle-ci tend à réagir de manière contraire au centroïde, mais sur un registre plus petit, et de manière plus erratique (Cf. figures 8.38 pour le flux spectral et 8.39 pour l'asymétrie spectrale).

Pente et étalement spectraux

Pour la pente spectrale, on observe les mêmes tendances qu'avec le centroïde (figure 8.34), mais la courbe est plus erratique. Les valeurs élevées correspondent immanquablement aux transitoires d'attaque et d'extinction. Quant à l'étalement spectral, il se comporte aussi de manière similaire au centroïde, mais la pente de la courbe est plus accentuée. Le comportement de ce descripteur est beaucoup plus erratique avec le *Do#4* qu'avec le *Fa#4* (Cf. figures 8.40 pour la pente spectrale globale et 8.41 pour l'étalement spectral).

Pour passer directement à la section suivante des résultats (sur les *jet whistles*), cliquez [ici](#).

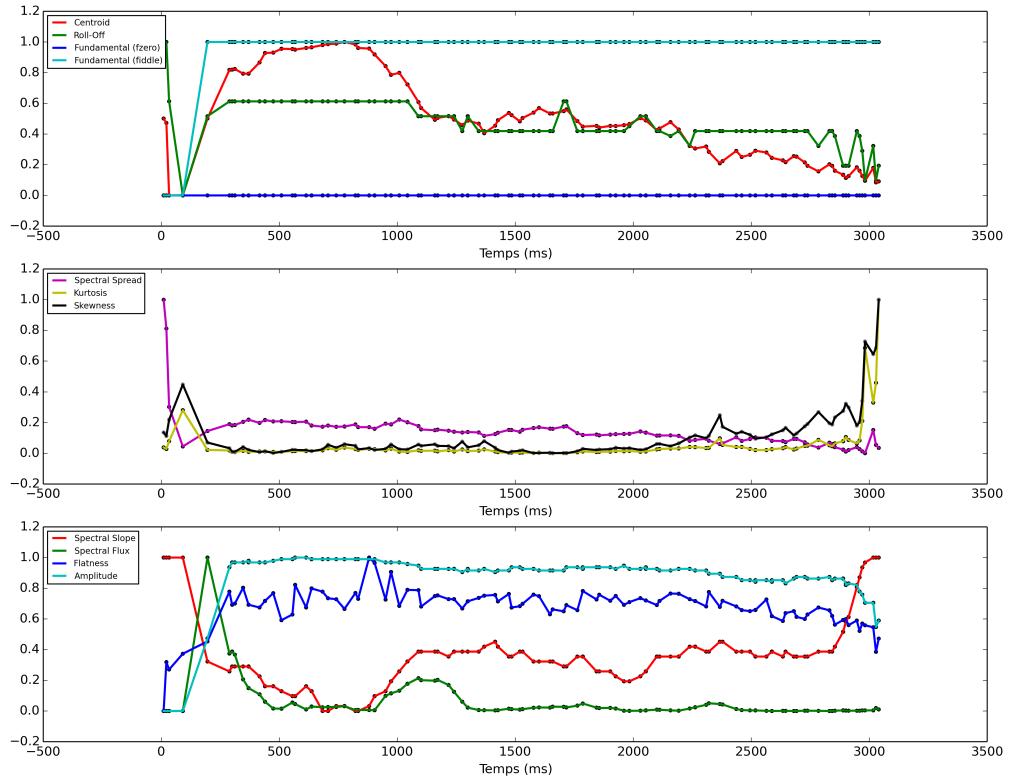
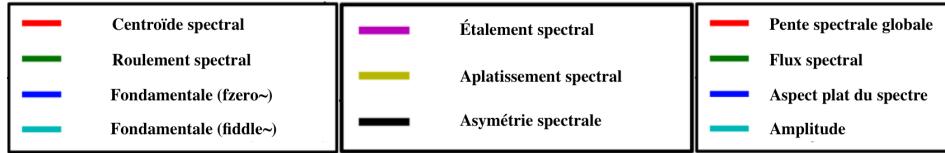


FIGURE 8.26 – *Do # – Brillant à rond, f* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *brillant* et *rond*, en nuance dynamique *forte* et jouée sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

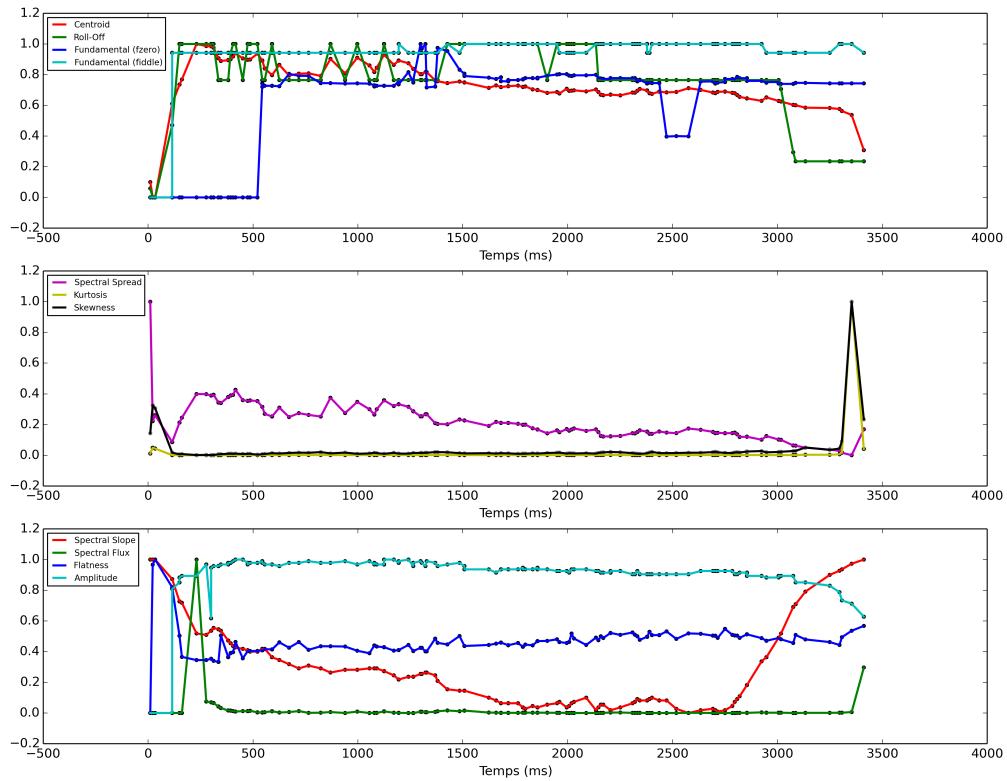
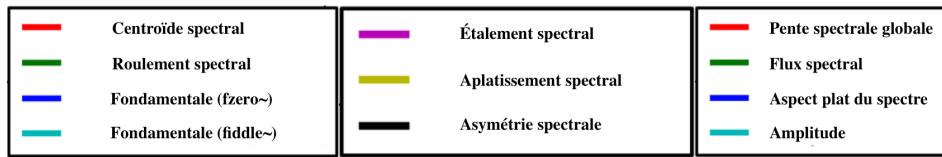


FIGURE 8.27 – **Fa # – Brillant à rond, f** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *brillant* et *rond*, en nuance dynamique forte et joués sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

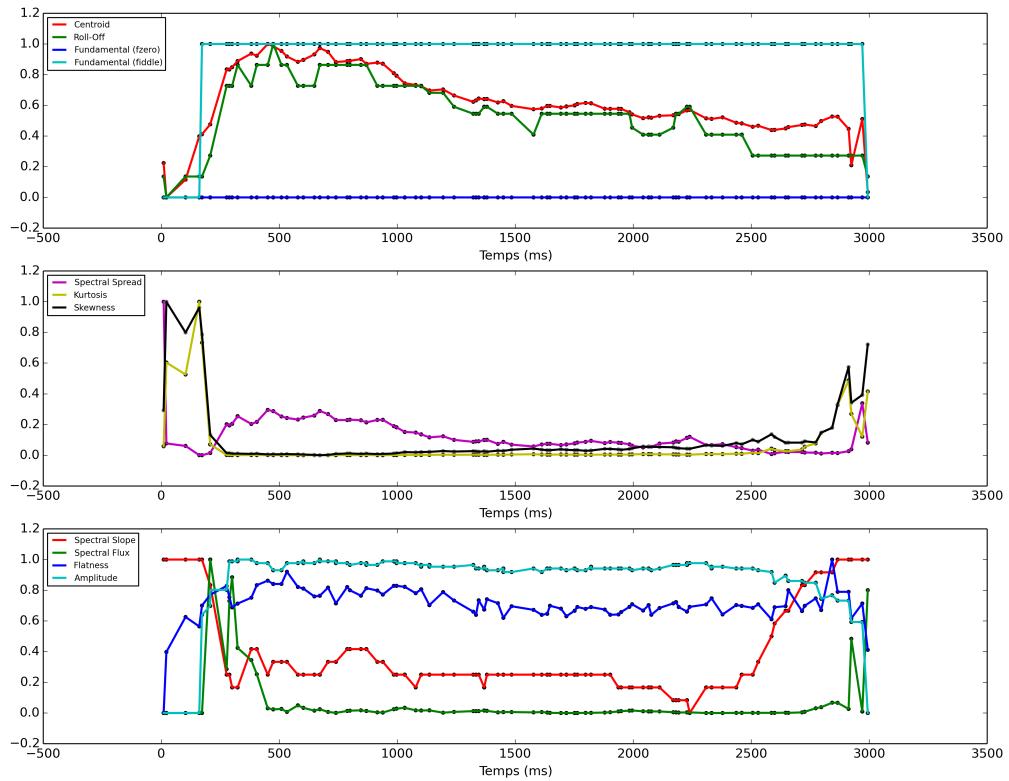
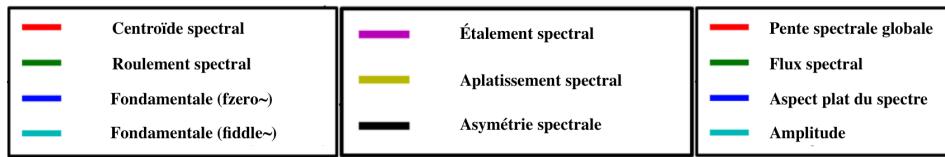


FIGURE 8.28 – *Do # – Brillant à rond, p* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *brillant* et *rond*, en nuance dynamique *piano* et jouée sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

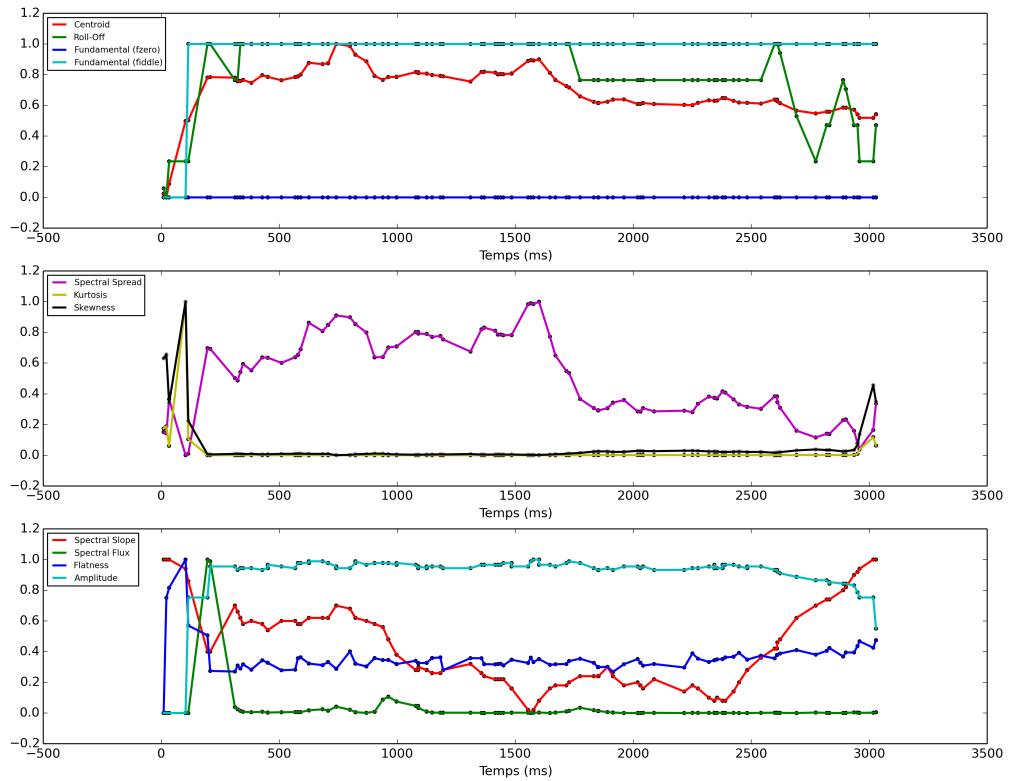
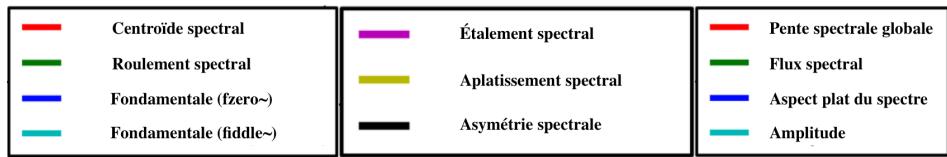


FIGURE 8.29 – *Fa # – Brillant à rond, p* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *brillant* et *rond*, en nuance dynamique *piano* et joués sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

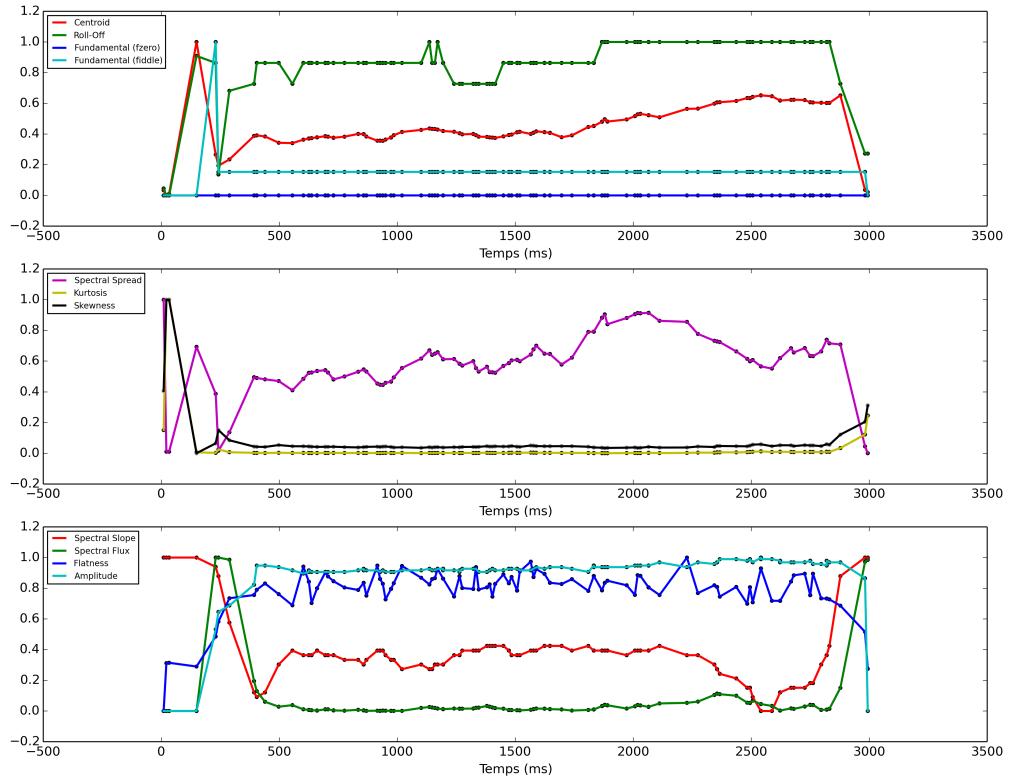
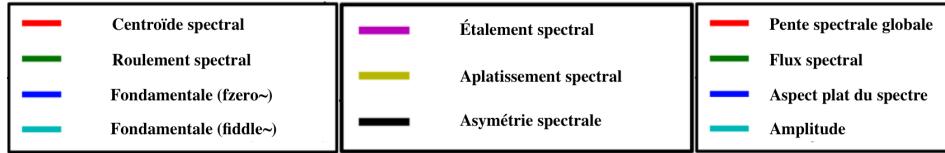


FIGURE 8.30 – **Do # – Rond à brillant, f** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *rond* et *brillant*, en nuance dynamique forte et jouée sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

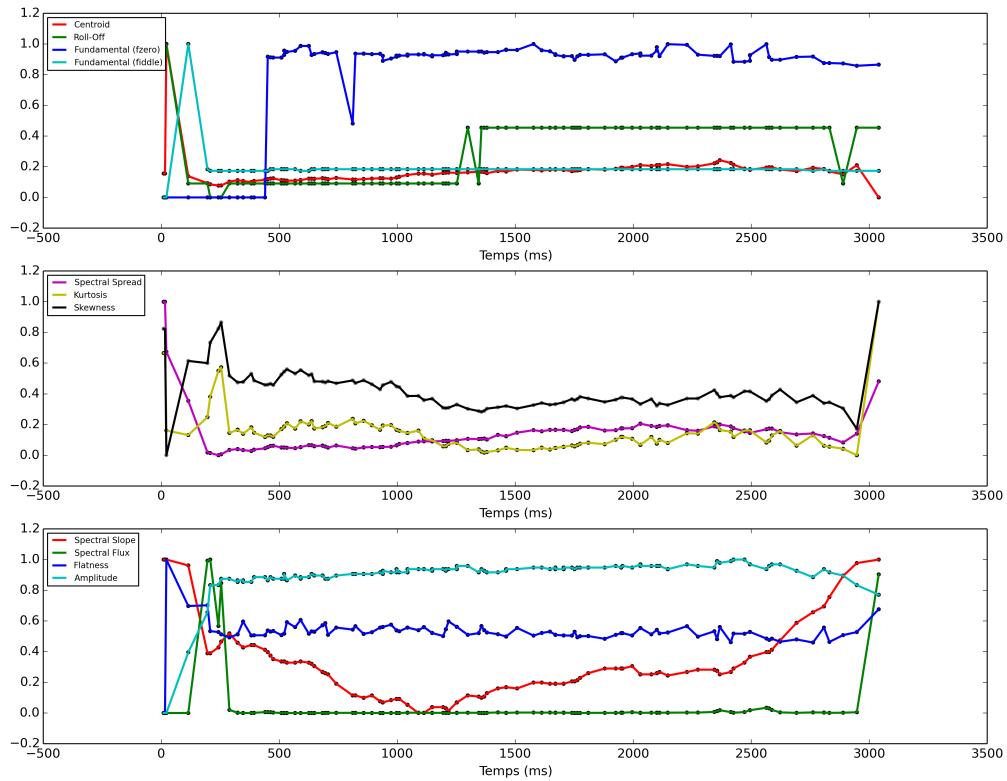
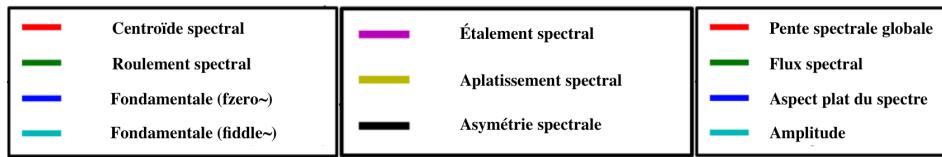


FIGURE 8.31 – **Fa # – Rond à brillant, f** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *rond* et *brillant*, en nuance dynamique forte et jouée sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

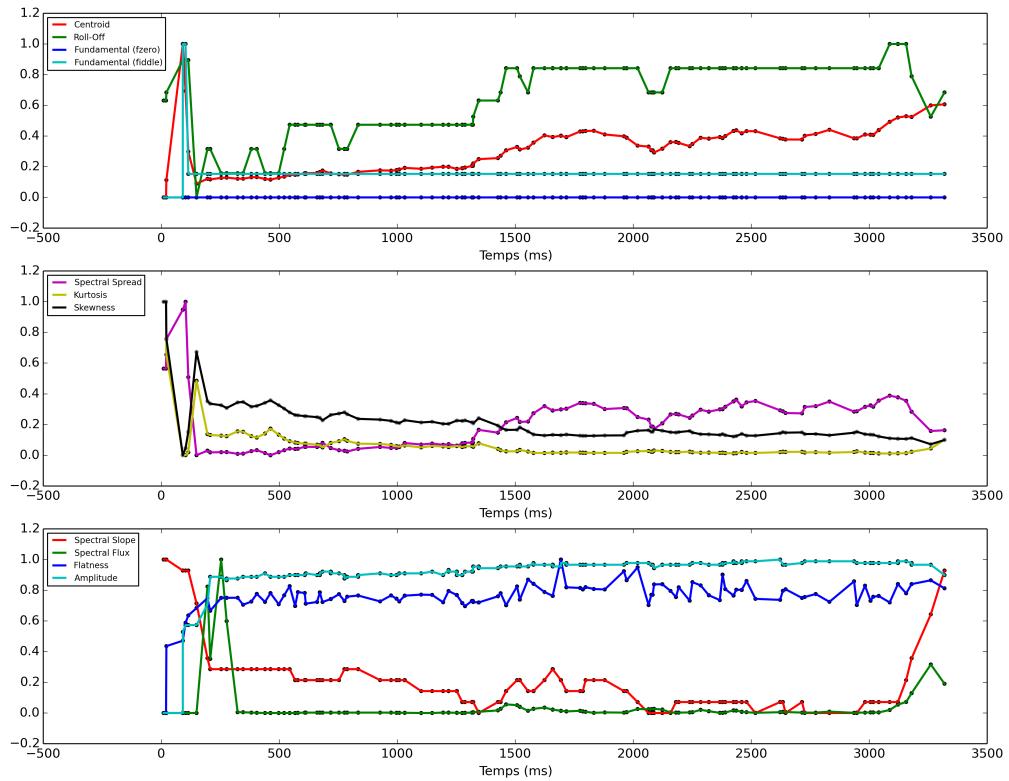
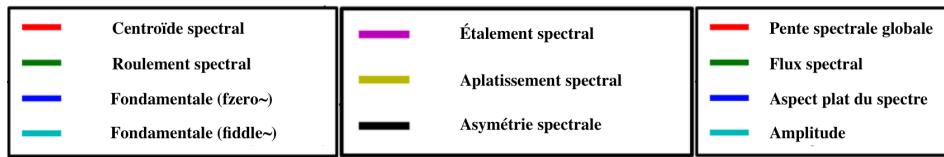


FIGURE 8.32 – **Do # – Rond à brillant, p** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *rond* et *brillant*, en nuance dynamique *piano* et jouée sur *Do#* (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

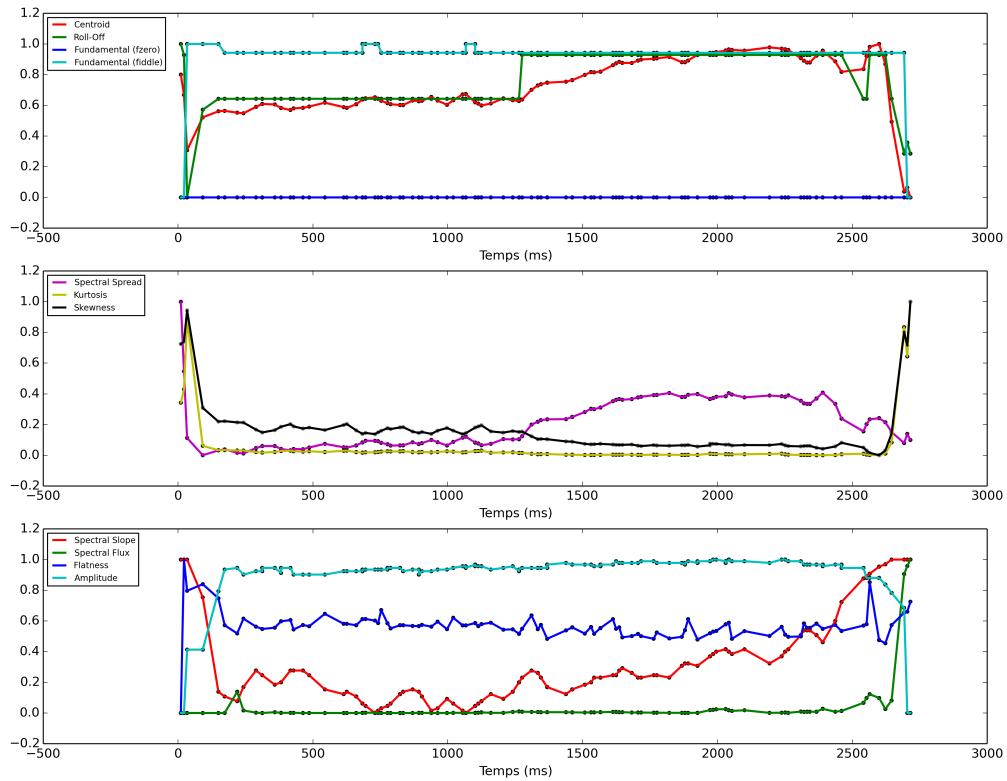
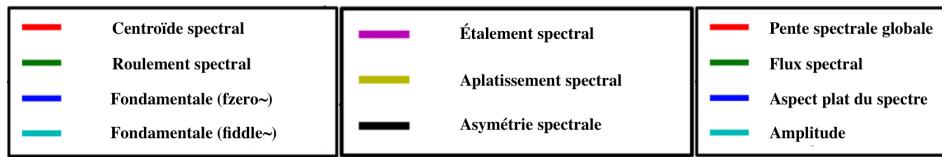


FIGURE 8.33 – *Fa # – Rond à brillant, p* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre les nuances de timbre *rond* et *brillant*, en nuance dynamique *piano* et jouée sur *Fa#* (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

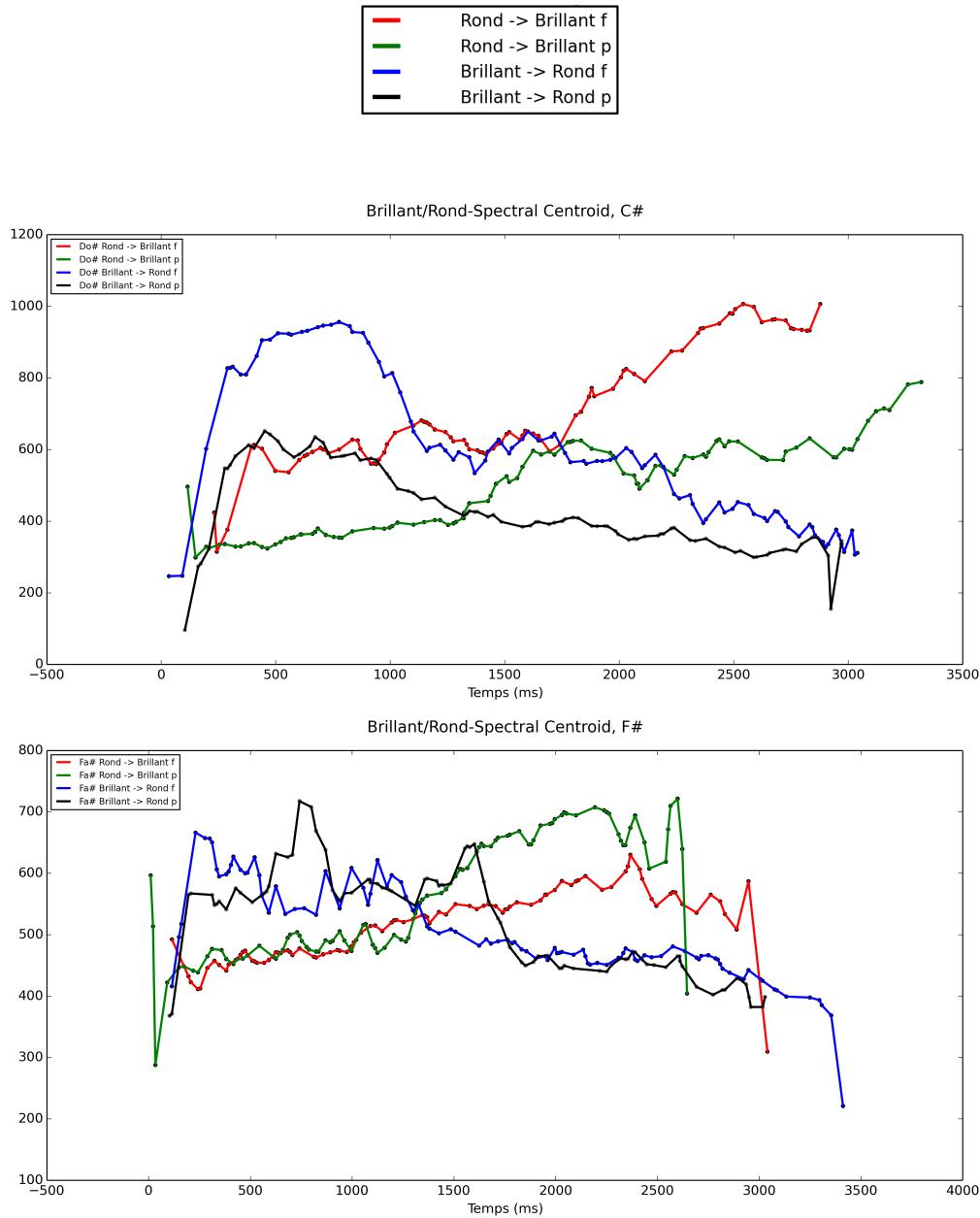


FIGURE 8.34 – **Brillant/Rond - Centroïde** – Le suivi des valeurs liées au centroïde spectral (en Hertz) pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

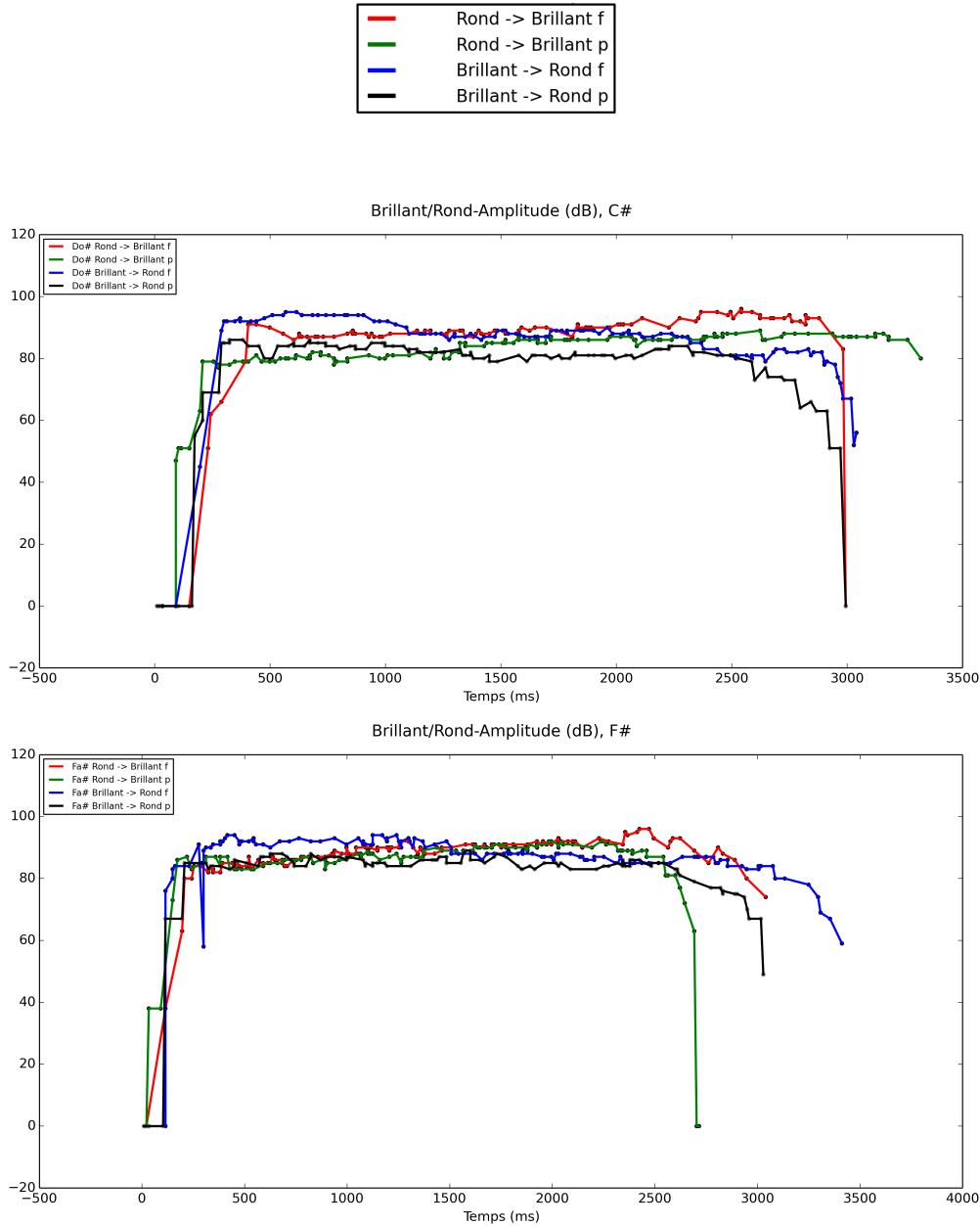


FIGURE 8.35 – **Brillant/Rond - Amplitude** – Le suivi des valeurs liées à l'amplitude (en dB) pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

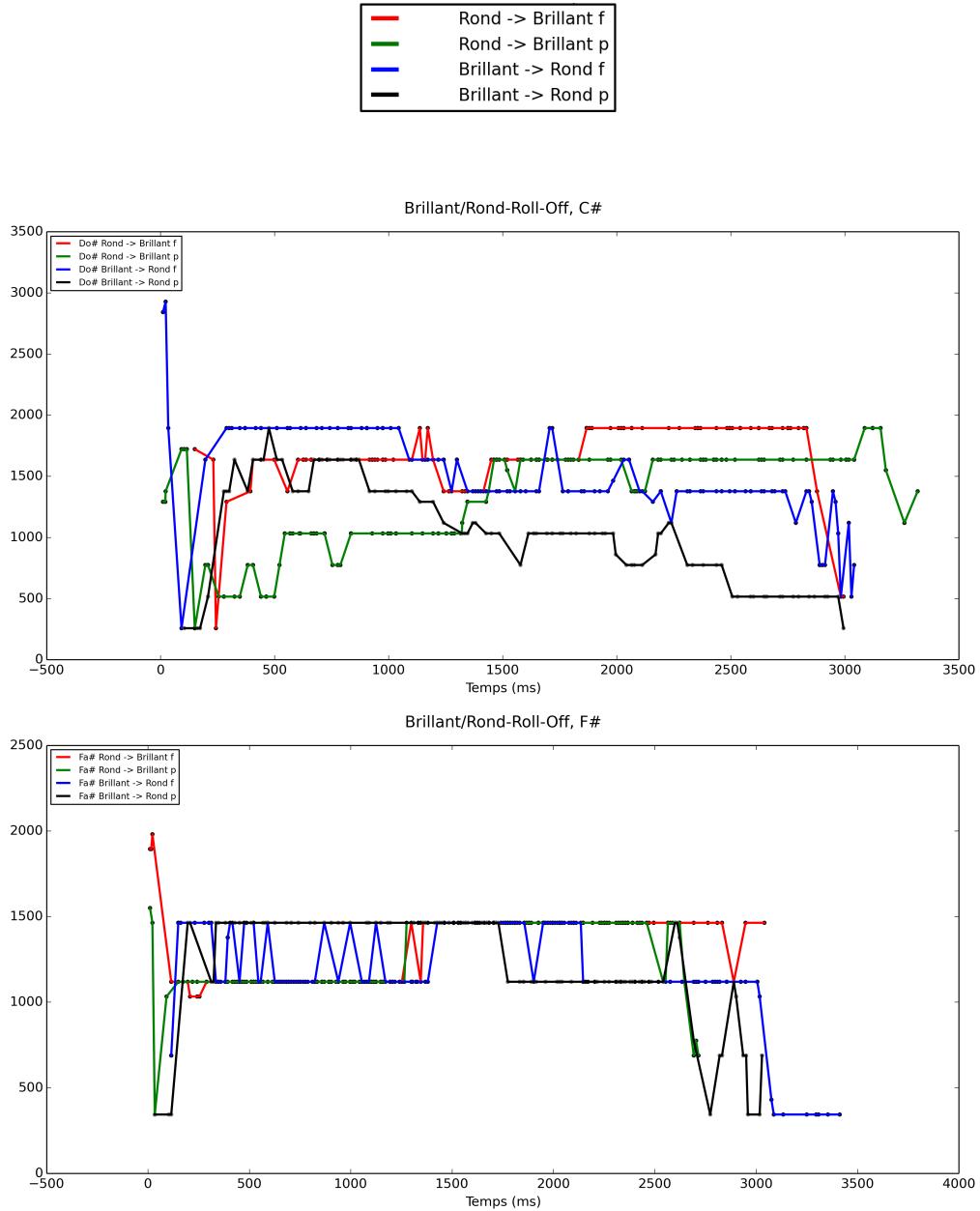


FIGURE 8.36 – Brillant/Rond - Roulement (Roll-Off) – Le suivi des valeurs liées au roulement spectral (en Hertz) pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

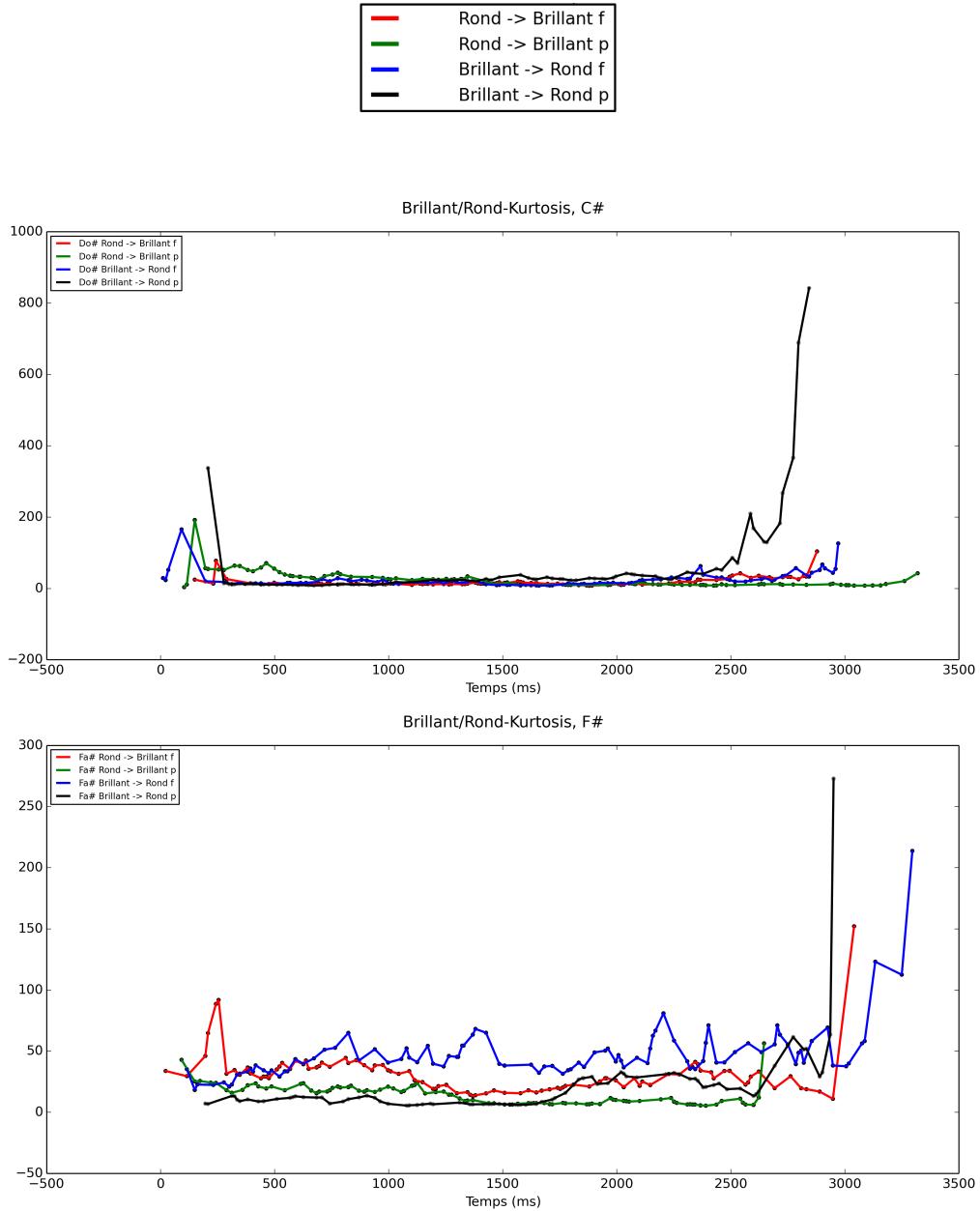


FIGURE 8.37 – **Brillant/Rond - Aplatissement (kurtosis)** – Le suivi des valeurs liées à l’aplatissement spectral pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

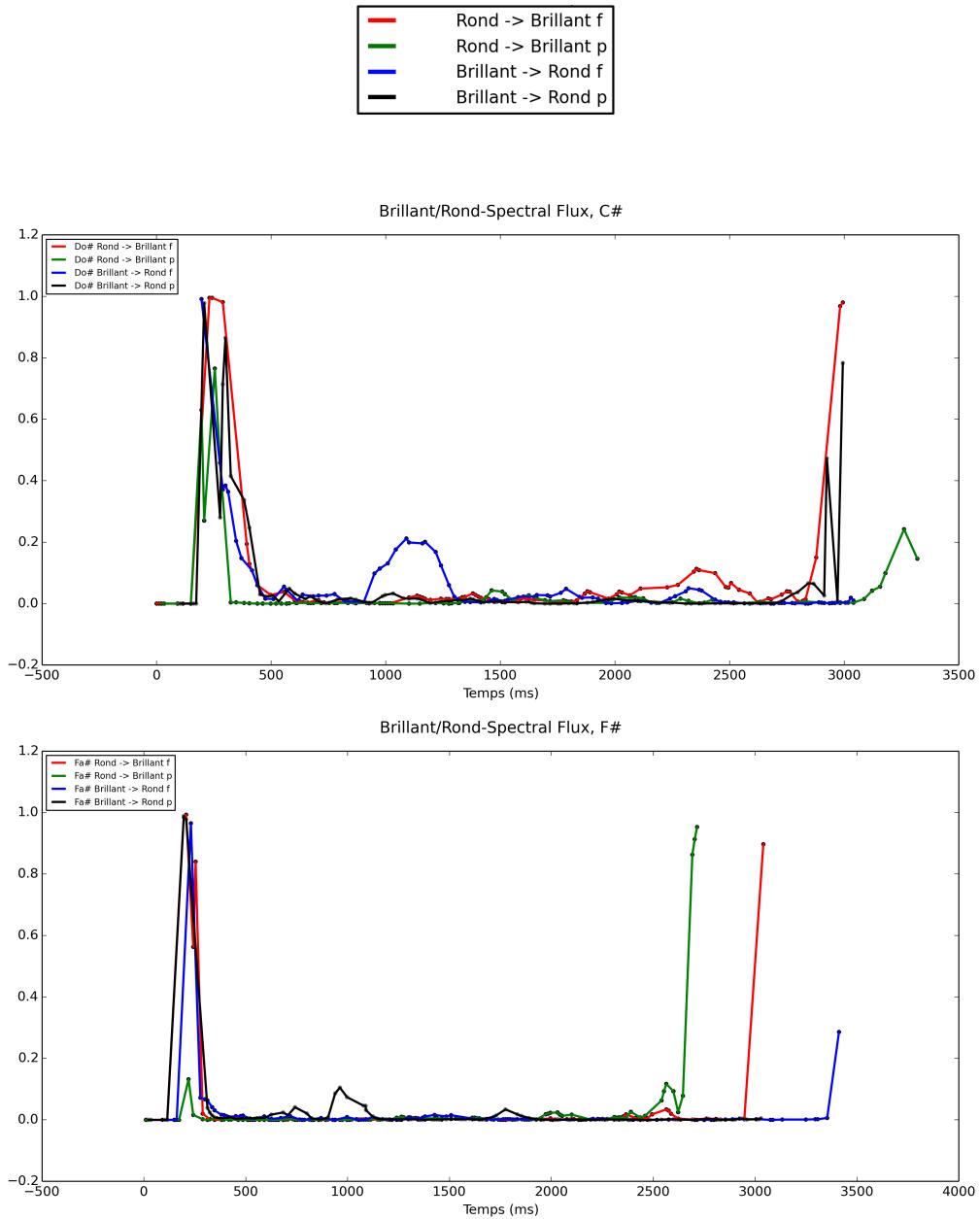


FIGURE 8.38 – Brillant/Rond - Flux spectral – Le suivi des valeurs liées au flux spectral (en Hertz) pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

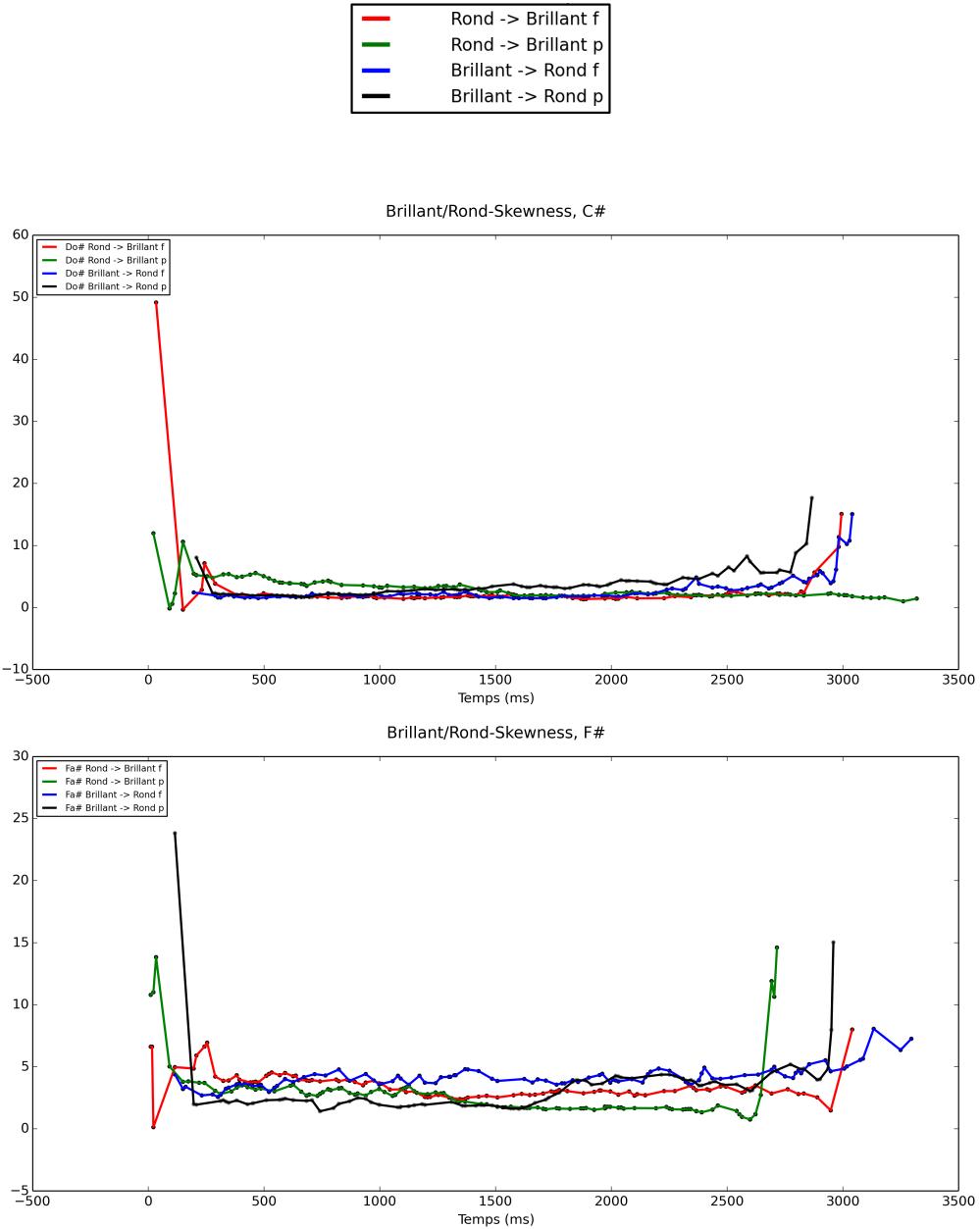


FIGURE 8.39 – **Brillant/Rond - Asymétrie (skewness)** – Le suivi des valeurs liées à l’asymétrie spectrale pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

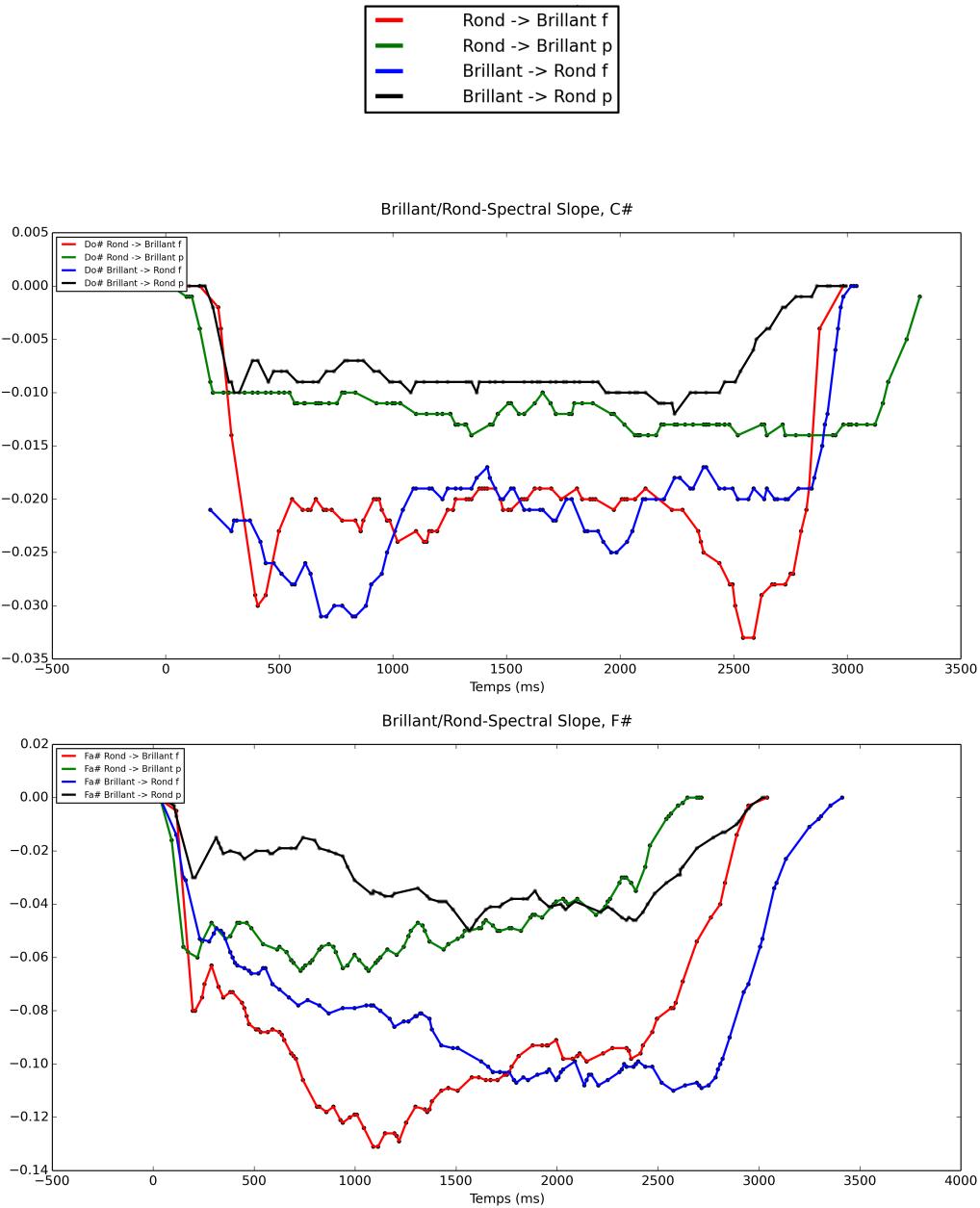


FIGURE 8.40 – **Brillant/Rond - Pente globale du spectre (slope)** – Le suivi des valeurs liées à la pente globale du spectre pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

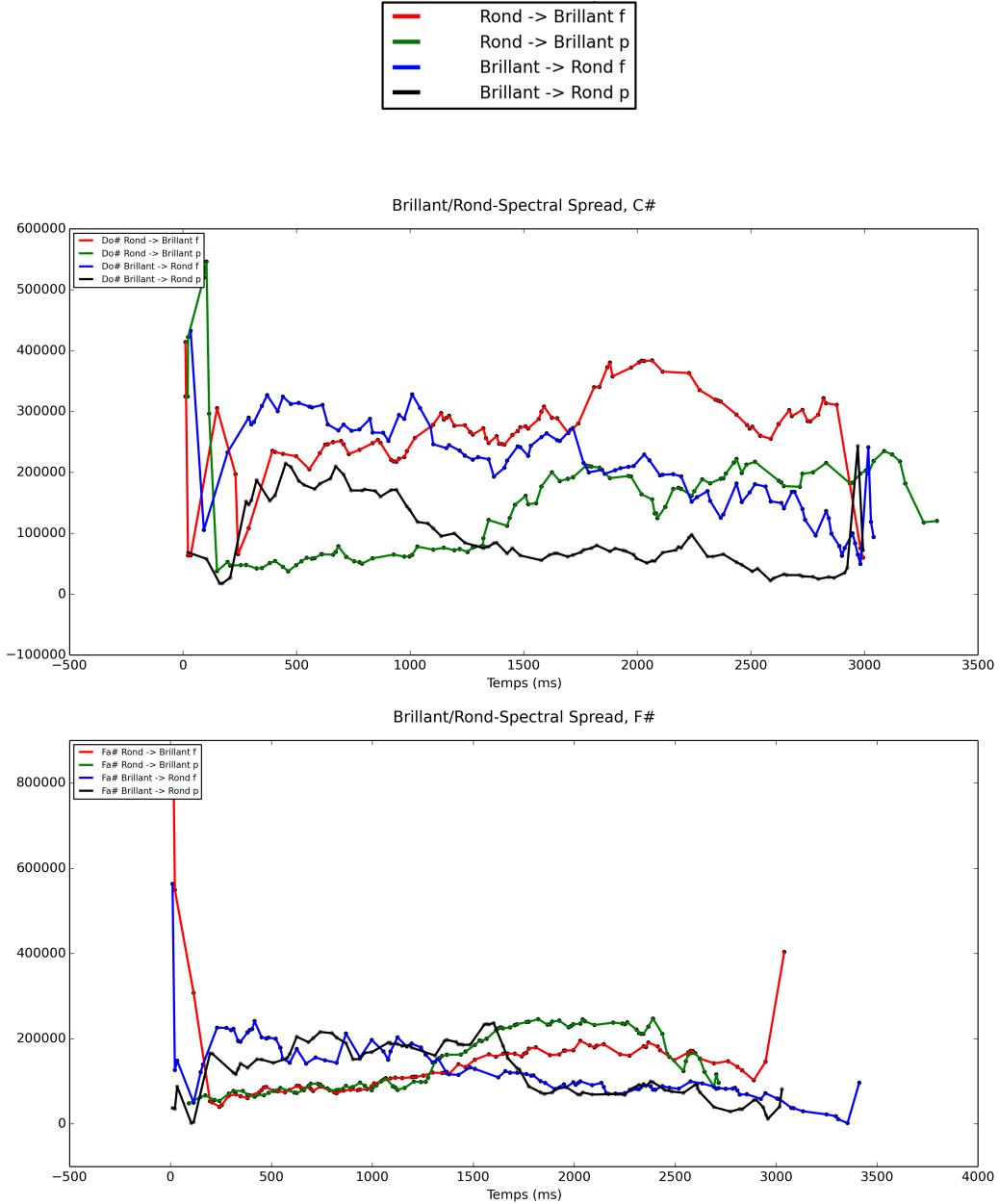


FIGURE 8.41 – **Brillant/Rond - Étalement (spread)** – Le suivi des valeurs liées à l'étalement spectral pour quatre types de transition entre des nuances de timbre (de *rond* à *brillant* en nuance *forte*, de *rond* à *brillant* en nuance *piano*, de *brillant* à *rond* en nuance *forte*, et de *brillant* à *rond* en nuance *piano*) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées sur *Do#* (278,44 Hz); sur le graphique du bas, elles ont été jouées sur *Fa#* (371,68 Hz). **Retour au texte : cliquez ici.**

5.4 Jet whistles

5.4.1 Observation des deux types de jet whistles

Changement de voyelle de [i] à [o]

Les courbes du centroïde, du roulement, de l’aplatissement et de l’asymétrie spectraux ont toutes une pente descendante correspondant au changement de voyelle. Le flux spectral et la courbe d’amplitude, pour leur part, ont une pente montante. Le descripteur *flatness* présente deux comportements différents selon le doigté choisi. Dans le cas du *Do#4*, la pente est montante, tandis que dans le cas du *Fa#4*, elle est plutôt constante. L’étalement spectral présente quant à lui deux courbes contraires : celle du *Do#4* descend et monte, tandis que celle du *Fa#4* monte et descend. Quand à celles de la pente spectrale, la courbe du *Do#4* suit celle de l’étalement spectral, tandis que celle du *Fa#4* est constante, hormis une chute de valeurs à mi-chemin (figures 8.42 pour *Do#4* et 8.43 pour *Fa#4*).

Changement de voyelle de [o] à [i]

Ici, on pourrait s’attendre à des courbes inversées par rapport au fichier sonore précédent. Ce n’est cependant pas ce qui se passe. Le centroïde et le roulement spectraux montent bel et bien comme on l’aurait prévu (pour les deux doigtés), suggérant une augmentation de la brillance du son entre les deux voyelles [o] et [i]. Cependant, l’étalement spectral adopte le même comportement que dans l’exemple précédent (dans le cas du *Do#4*), mais suit les courbes du centroïde et du roulement spectraux dans le cas du *Fa#4*. De plus, les courbes d’aplatissement et d’asymétrie spectrale descendent, exactement comme lors du changement de voyelle inverse, sauf au milieu où l’on remarque une petite remontée. La courbe de la pente spectrale se comporte également de manière similaire dans les deux exemples, et de manière inversée par rapport à l’aplatissement et à l’asymétrie spectraux : elle descend puis remonte. Le flux spectral est bas sur presque toute la durée du fichier sauf vers le milieu, exactement à l’endroit où les courbes d’aplatissement et d’asymétrie spectraux effectuent leur remontée. Cela suggère que certains descripteurs sont plus corrélés à la vitesse croissante de l’air qui est soufflé dans le tuyau – cette donnée reste similaire

peu importe la voyelle – qu’avec le changement de voyelle (figures 8.44 pour *Do#4* et 8.45 pour *Fa#4*).

5.4.2 Observations sur certains descripteurs

Centroïde et étalement spectraux

Si l’on observe les courbes du centroïde et de l’étalement spectraux, on remarque que les courbes de ce dernier descripteur suivent celles du centroïde dans le cas du *Fa#4*, mais que cela ne s’avère pas vrai dans le cas du *Do#4*. Il serait en fait nécessaire d’obtenir une courbe à plus haute résolution afin de vérifier ces tendances (figures 8.46 pour le centroïde et 8.47 pour l’étalement). De plus, il serait dans l’intérêt de cette recherche d’effectuer des analyses sur des sons enregistrés avec un ensemble plus complet de doigtés afin de pouvoir mieux observer les tendances propres aux techniques de *jet whistle*; cela sera à réaliser dans une expérience subséquente.

Aplatissement et asymétrie spectraux

En ce qui concerne l’aplatissement et l’asymétrie spectraux, les courbes des deux descripteurs correspondant au même doigté (*Do#4* ou *Fa#4*) suivent exactement les mêmes tendances. Et dans les deux cas, les courbes tendent à descendre, peu importe la voyelle de départ et d’arrivée. De façon approximative, ces deux descripteurs semblent donc avoir une valeur inversement proportionnelle à la vitesse de l’air soufflé dans le tuyau de l’instrument, qui croit en raison de la pression abdominale exercée pour expulser l’air et obtenir une pression suffisante à l’exécution du *jet whistle* (figures 8.48 pour l’aplatissement et 8.49 pour l’asymétrie).

Flux et pente spectrale globale

Le comportement du flux spectral pour les deux types de *jet whistle* apparaît plus clairement lorsqu’on l’isole des autres descripteurs. D’abord basses, les valeurs de ce descripteur montent extrêmement vite, fluctuent légèrement et redescendent vers la fin des fichiers sonores. De plus, il est similaire dans les deux cas de figure et pour les deux doigtés choisis, ce qui suggère que lui aussi soit indépendant du changement de voyelle. L’évolution de l’étalement spectral est

également plus clair lorsqu'on l'isole, et il semble aussi suivre cette voie d'indépendance : toutes les courbes pour ce descripteur suivent la même tendance, peu importe les paramètres. Elles affichent une forme en V : elles descendent puis remontent. La descente semble cependant se produire plus tôt lorsqu'on passe de la voyelle [i] à [o] que dans le cas inverse (figures 8.50 pour le flux spectral et 8.51 pour la pente globale).

Pour passer directement à la section suivante des résultats (sur les *pitch bends*), cliquez [ici](#).

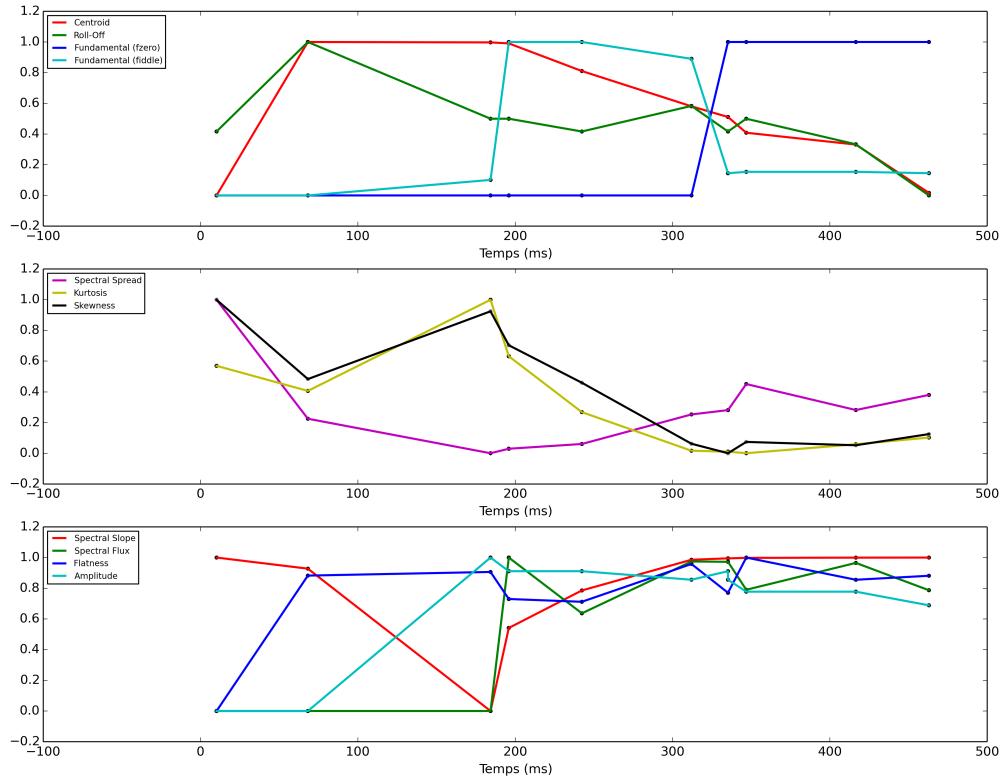
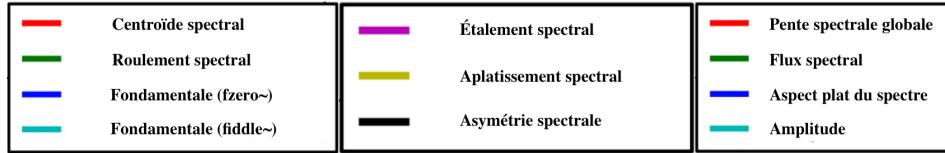


FIGURE 8.42 – *Do # – Jet whistle [i vers o]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *jet whistle* avec une transition entre les voyelles [i] et [o] et joué sur le doigté du *Do# grave*, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

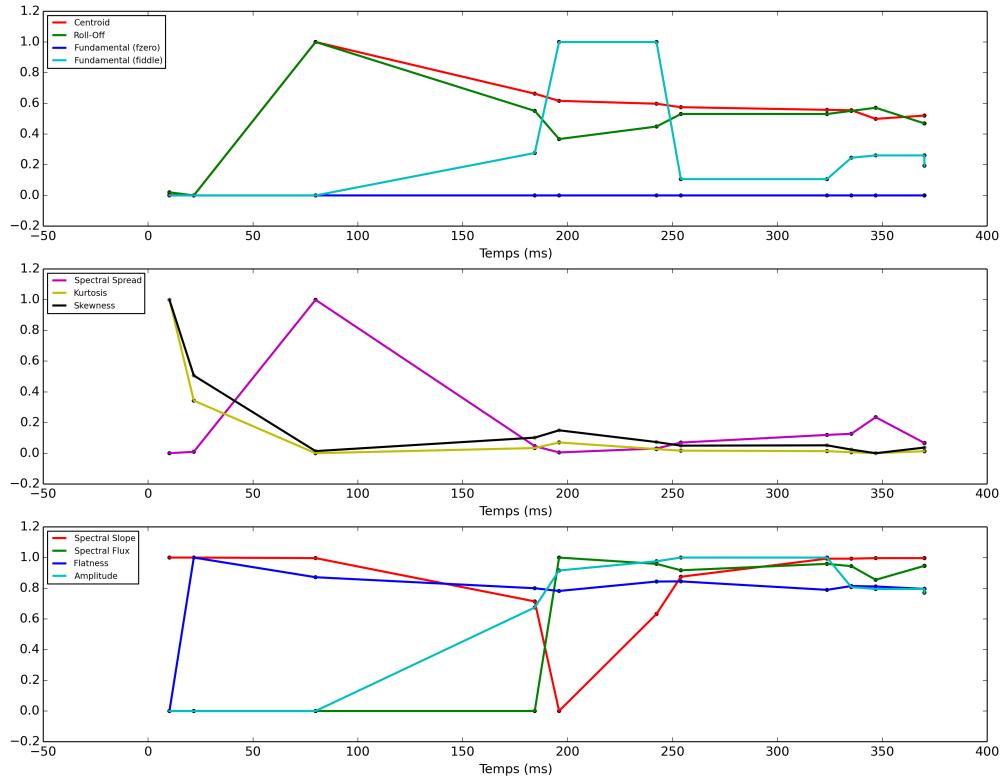
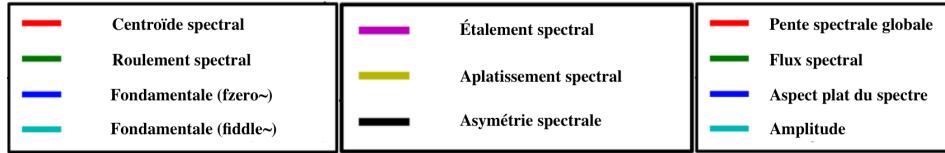


FIGURE 8.43 – *Fa # – Jet whistle [i vers o]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *jet whistle* avec une transition entre les voyelles [i] et [o] et joué sur le doigté du *Fa# grave*, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

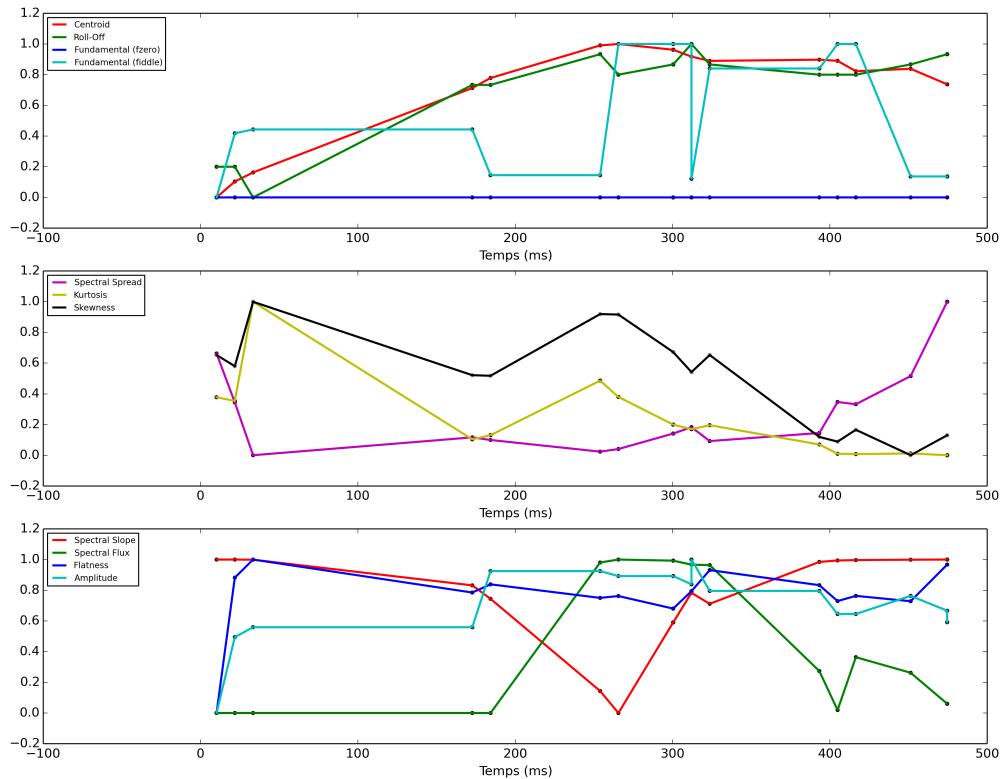
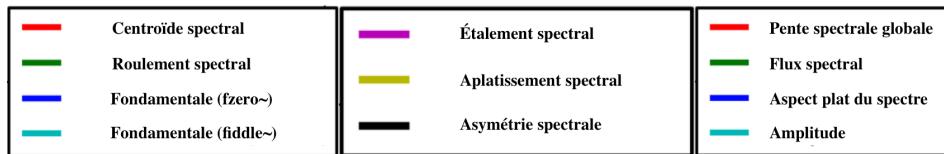


FIGURE 8.44 – *Do # – Jet whistle [o vers i]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *jet whistle* avec une transition entre les voyelles [o] et [i] et joué sur le doigté du *Do# grave*, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

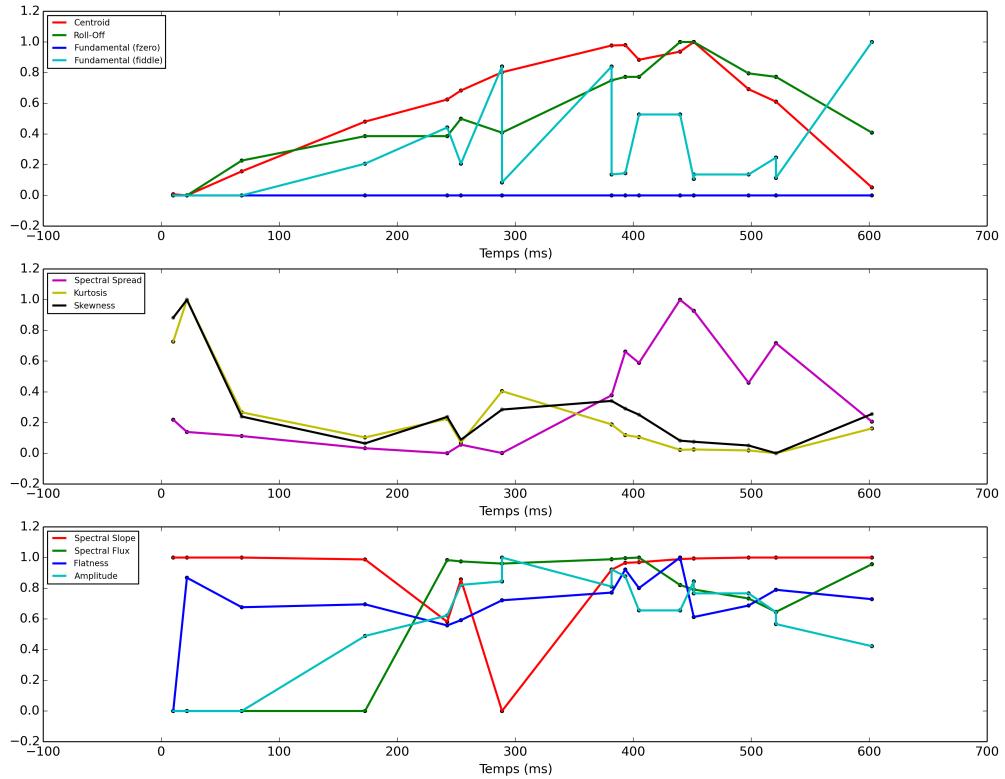
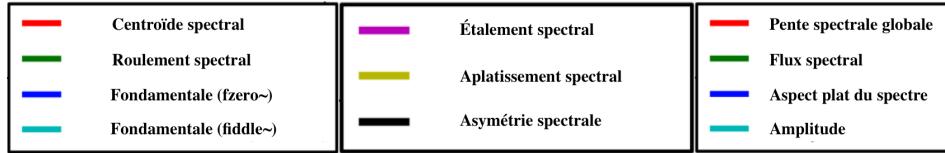


FIGURE 8.45 – *Fa # – Jet whistle [o vers i]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *jet whistle* avec une transition entre les voyelles [o] et [i] et joué sur le doigté du *Fa# grave*, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

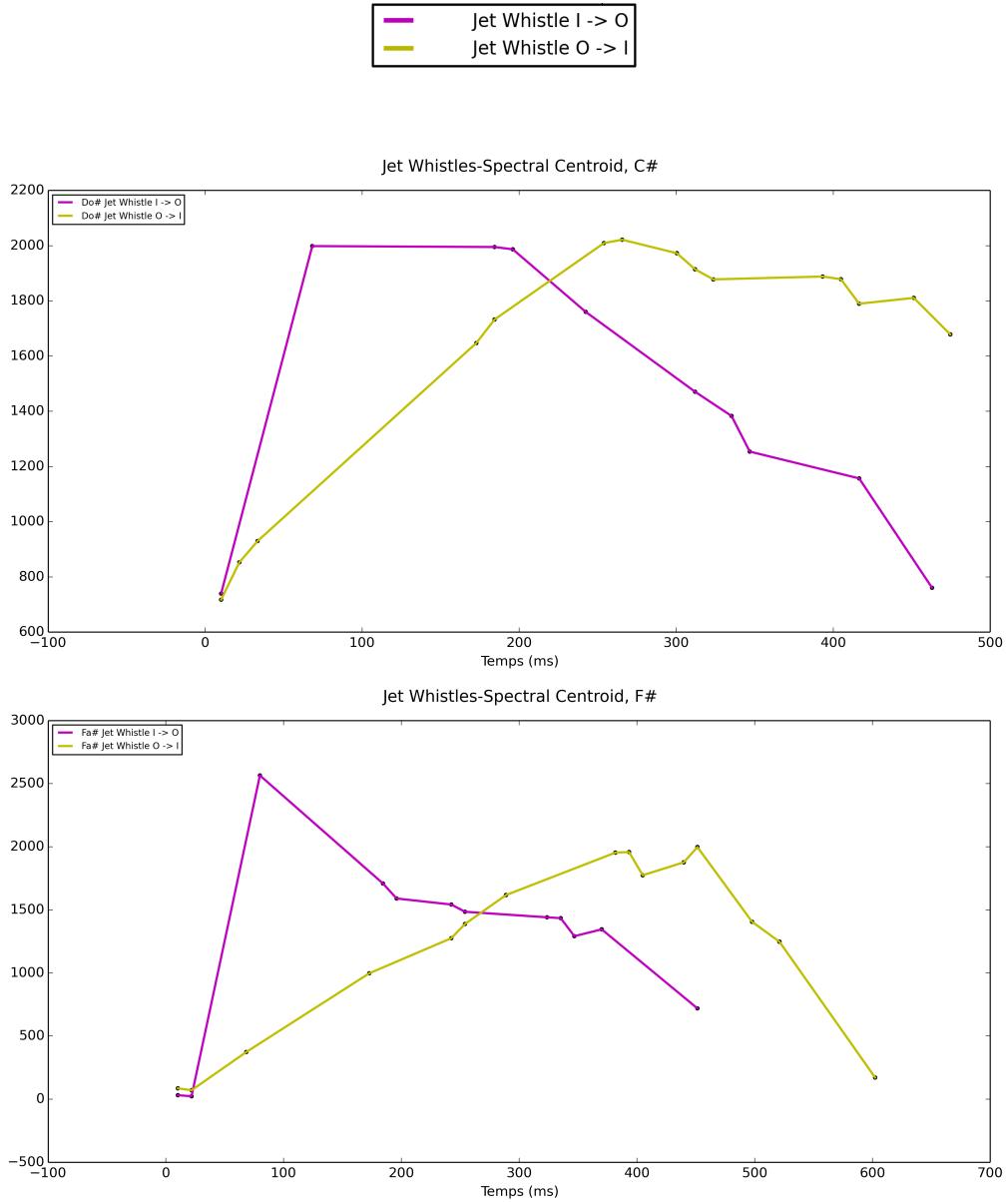


FIGURE 8.46 – **Jet whistle - Centroïde** – Le suivi des valeurs liées au centroïde spectral pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. Retour au texte : cliquez [ici](#).

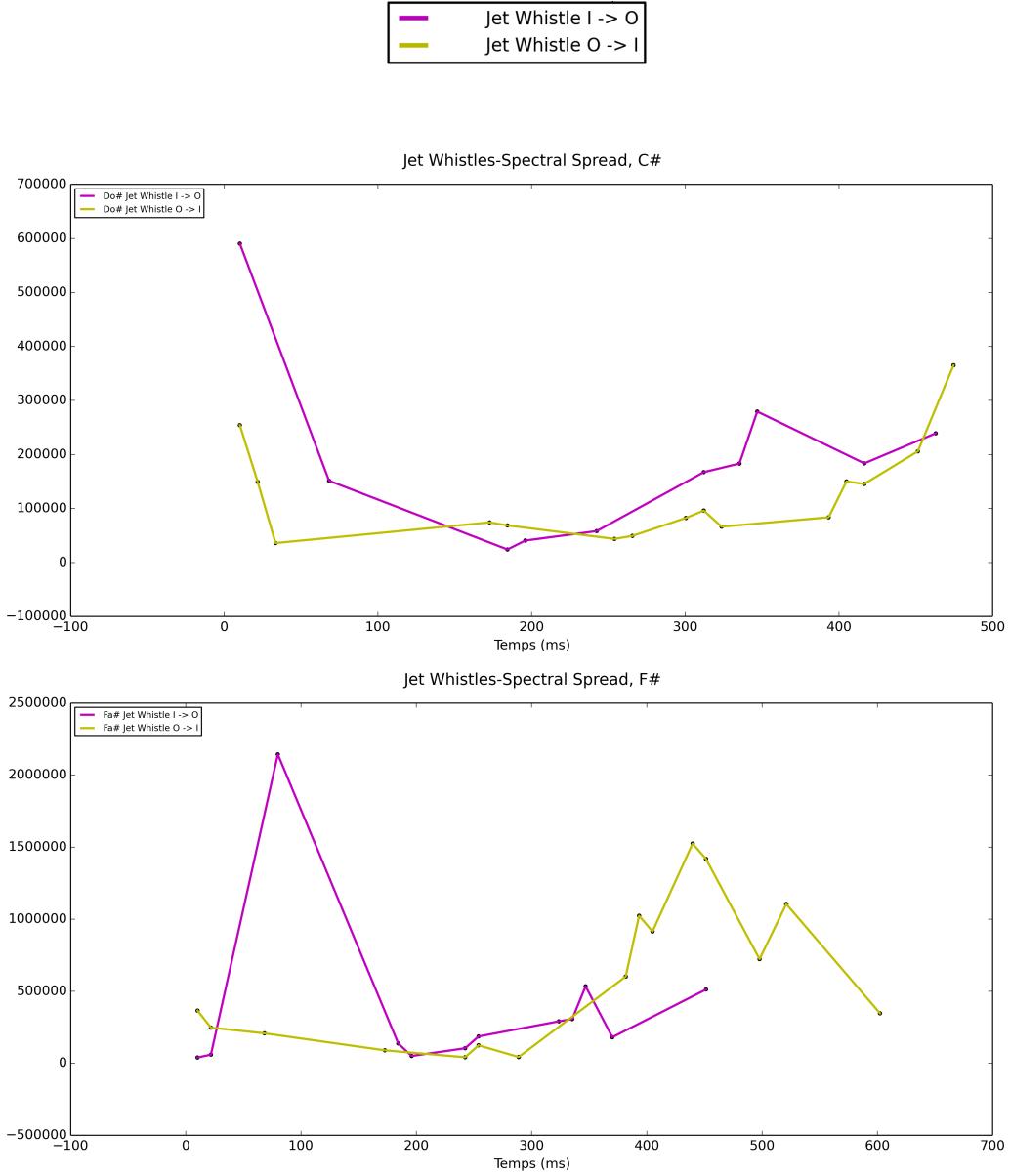


FIGURE 8.47 – **Jet whistle - Étalement (spread)** – Le suivi des valeurs liées à l'étalement spectral pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. **Retour au texte : cliquez ici.**

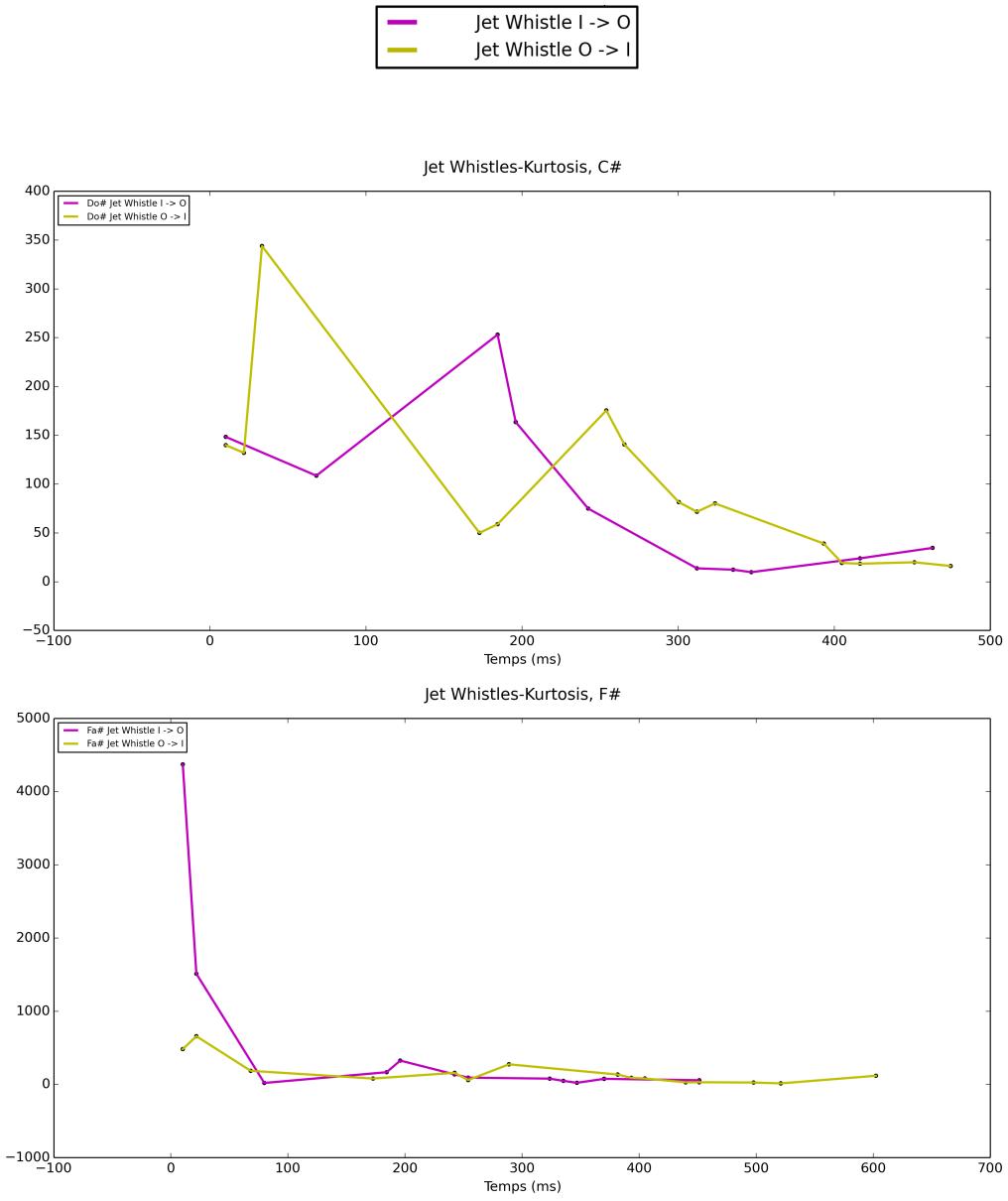


FIGURE 8.48 – **Jet whistle - Aplatissement (kurtosis)** – Le suivi des valeurs liées à l’aplatissement spectral pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

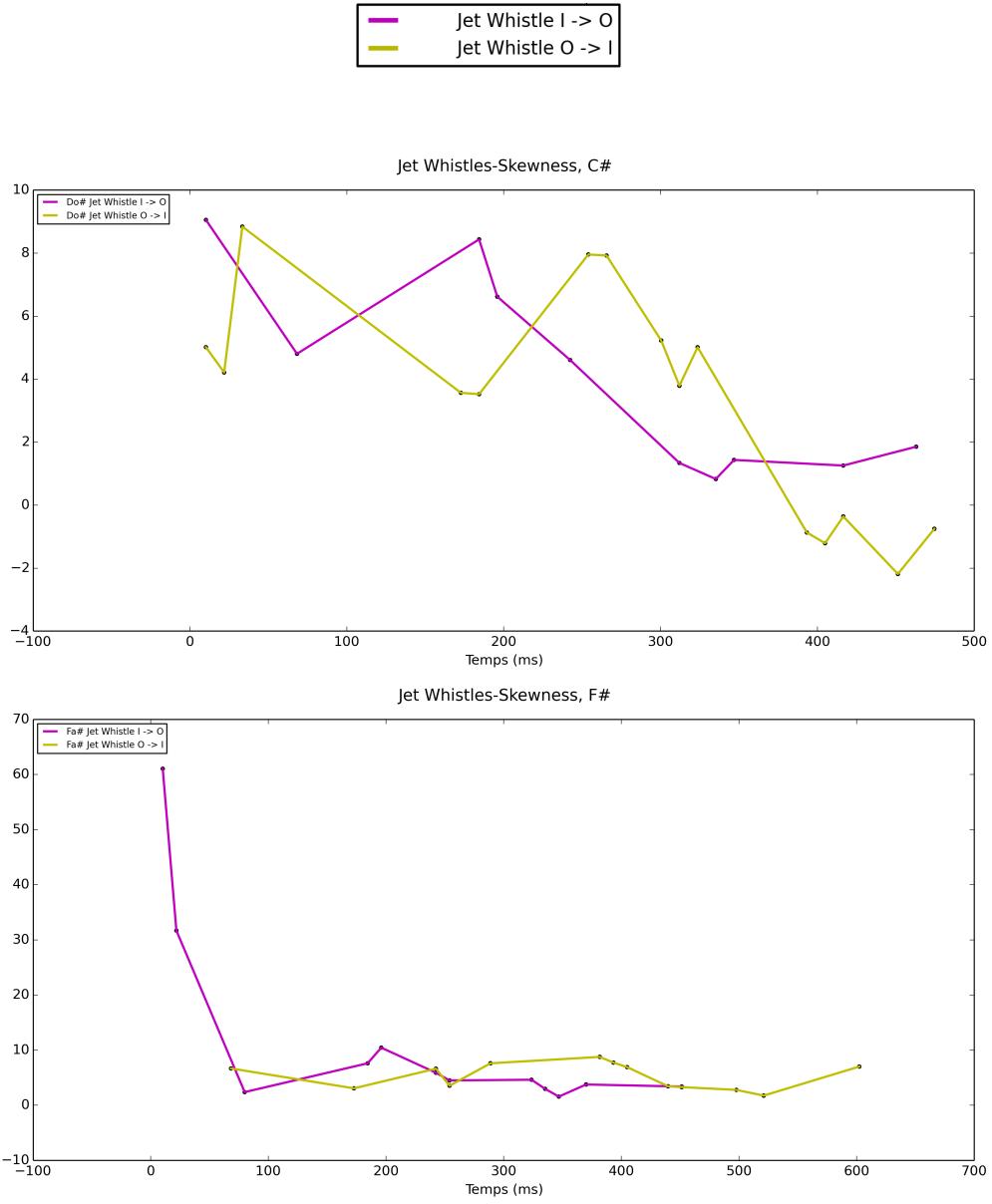


FIGURE 8.49 – Jet whistle - Asymétrie (*skewness*) – Le suivi des valeurs liées à l’asymétrie spectrale pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. Retour au texte : cliquez [ici](#).

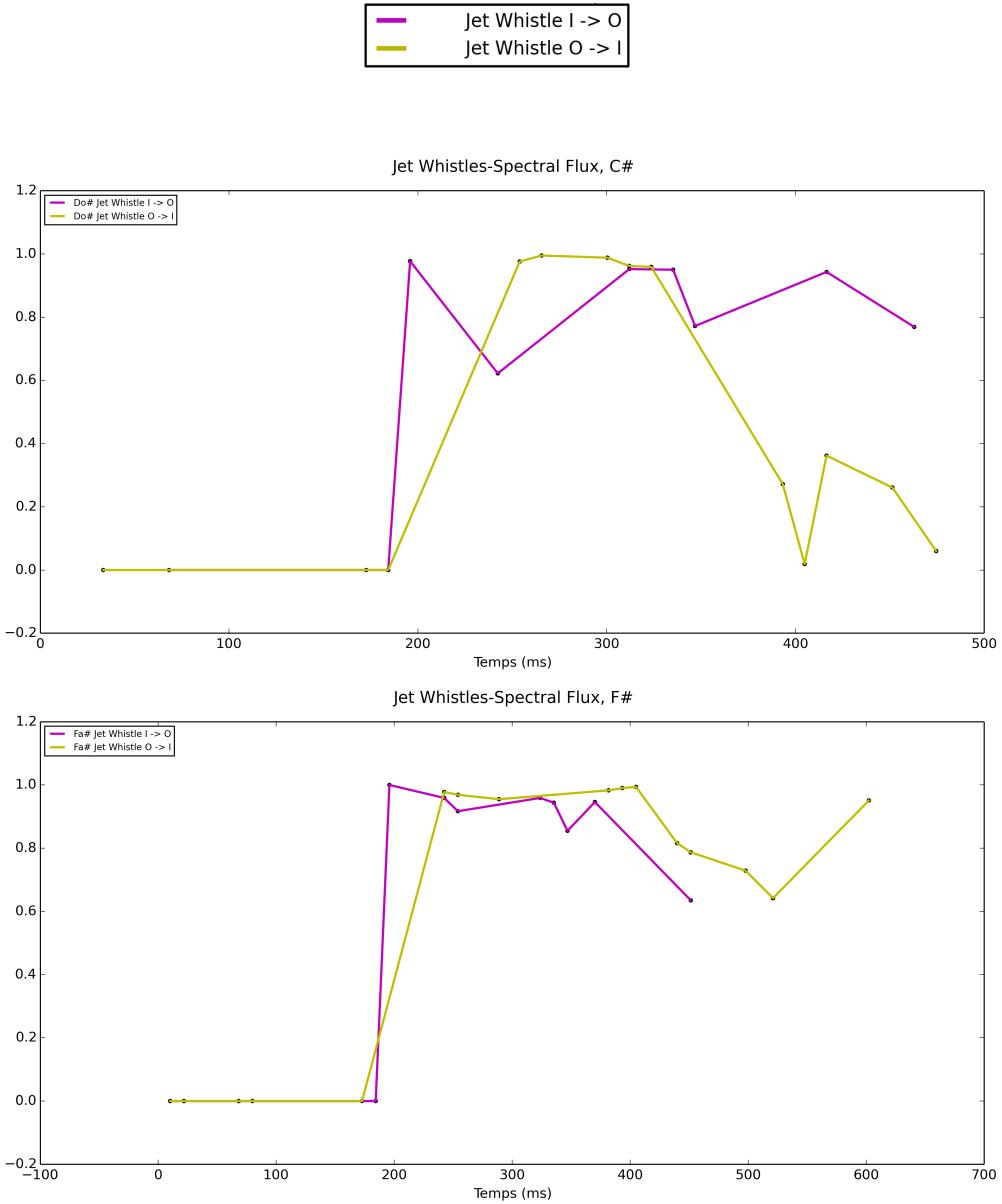


FIGURE 8.50 – Jet whistle - Flux spectral – Le suivi des valeurs liées au flux spectral pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. **Retour au texte : cliquez ici.**

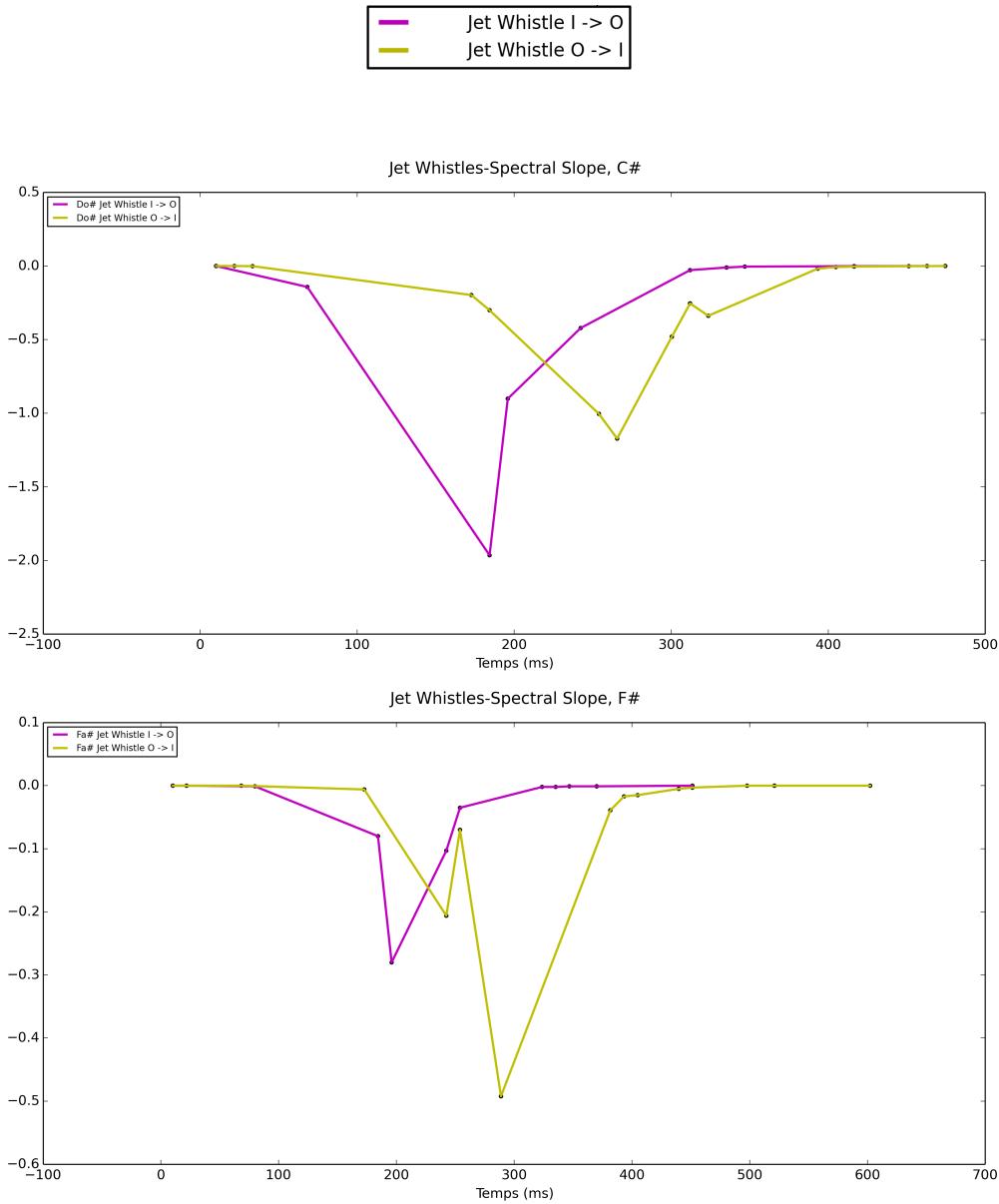


FIGURE 8.51 – Jet whistle - Pente spectrale globale (*slope*) – Le suivi des valeurs liées à la pente globale du spectre pour deux *jet whistles* avec transition entre deux voyelles (de [i] à [o] et de [o] à [i]) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. Retour au texte : [cliquez ici](#).

5.5 *Pitch bends*

5.5.1 Observation générale de deux types de *pitch bends*

Pitch bend couvrant

Pour le *pitch bend* qui s'effectue en couvrant progressivement l'embouchure à partir de la position centrale (figure 8.52), le centroïde et l'étalement spectraux suivent la même tendance : ils montent légèrement vers le milieu (ce qui correspond probablement au moment où le son est le plus « concentré ») pour redescendre vers la fin. Le roulement spectral semble, lui, constant sur la plus grande partie du fichier sonore, puis descend lui aussi vers la fin. La pente spectrale et l'asymétrie tendent à monter du début à la fin ; l'asymétrie spectrale le fait de manière moins marquée. Quant à l'amplitude, elle descend progressivement vers la fin du fichier. Le flux spectral et l'aspect plat du spectre n'ont pas de tendance marquée, sauf pour le fait que leur courbe devient plus accentuée durant la seconde moitié du son ; la courbe d'aplatissement spectral devra être examinée de plus près afin d'y déceler une tendance. Enfin, la fréquence fondamentale semble détectée de façon fiable par l'objet `fiddle~`, et correctement par l'objet `fzero~` à partir du premier tiers du fichier sonore.

Pitch bend découvrant

Le *pitch bend* découvrant (figure 8.53) consiste à découvrir progressivement l'embouchure à partir de la position centrale. Il ne s'agit donc pas du contraire de l'exemple précédent, mais simplement d'une autre technique. On observe d'ailleurs que le centroïde, l'étalement, le flux et le roulement spectraux se comportent à peu de choses près comme lors du *pitch bend* couvrant. L'asymétrie et l'aplatissement spectraux sont relativement constants et montent vers la fin, tandis que l'aspect plat du spectre augmente constamment, avec une courbe à l'allure plutôt accidentée. Quant à la fréquence fondamentale, elle est détectée de manière similaire à celle du *pitch bend* couvrant.

5.5.2 Observations sur certains descripteurs

Centroïde et pente spectrale globale

En comparant les quatre courbes, on constate ici que le centroïde et la pente spectrale globale suivent des tendances inverses l'un par rapport à l'autre, mais que ces tendances sont les mêmes pour les deux types de *pitch bend*. Le moment où la courbe de la pente spectrale arrive à son point le plus bas est cependant différent selon le type de technique (figures 8.54 pour le centroïde et 8.55 pour la pente spectrale globale).

Aspect plat du spectre et flux spectral

En y regardant de plus près, la tendance de la courbe de l'aspect plat du spectre se précise : les deux courbes tendent à monter avec le temps, quoique de manière assez accidentée. Quant à l'aspect de la courbe du flux spectral, il est effectivement très élevé durant les transitoires d'attaque (et probablement d'extinction aussi) ; la courbe tend à devenir plus accidentée durant la seconde moitié du fichier son et ce, pour les deux types de *pitch bends* (figures 8.56 pour l'aspect plat du spectre et 8.57 pour le flux spectral).

Aplatissement et asymétrie spectraux

Les courbes d'aplatissement et d'asymétrie spectraux ont une allure assez similaire et ce, dans le cas des deux types de *pitch bends*. En excluant les transitoires d'attaque, les valeurs les plus élevées se retrouvent vers la fin des fichiers sonores, vers le moment où l'angle de la colonne d'air soufflé atteint son point le plus extrême, que ce soit avec un trou d'embouchure presque complètement couvert ou découvert. L'augmentation des valeurs, pour les deux descripteurs, se produit plus tôt dans le cas du *pitch bend* couvert que du *pitch bend* découvert (figures 8.58 pour l'aplatissement et 8.59 pour l'asymétrie).

Roulement et étalement spectraux

Ici encore, le roulement spectral semble détecté de manière approximative. Toutefois, les deux courbes correspondant au roulement spectral suivent la même tendance que la courbe d'étalement spectral pour le *pitch bend* couvert. L'étalement spectral est le descripteur qui distingue le plus

les deux types de *pitch bend* : la courbe varie beaucoup plus lorsque l'on couvre l'embouchure que lorsqu'on la découvre (figures 8.60 pour le roulement et 8.61 pour l'étalement spectraux).

Pour passer directement à la section suivante des résultats (sur la transition entre sons standard et éoliens), cliquez [ici](#).

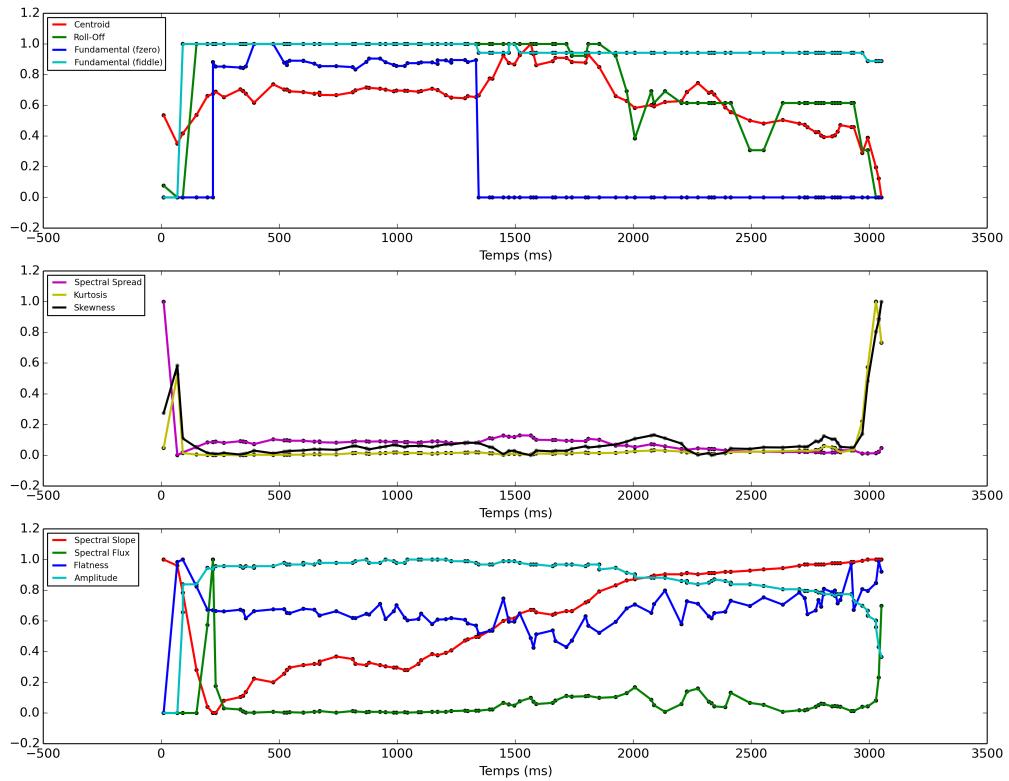
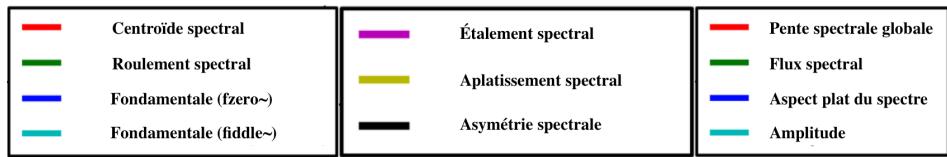


FIGURE 8.52 – **Fa # – Pitch bend couvrant** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *pitch bend* avec couverture progressive de l’embouchure et joué sur le doigté du *Fa#* grave, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

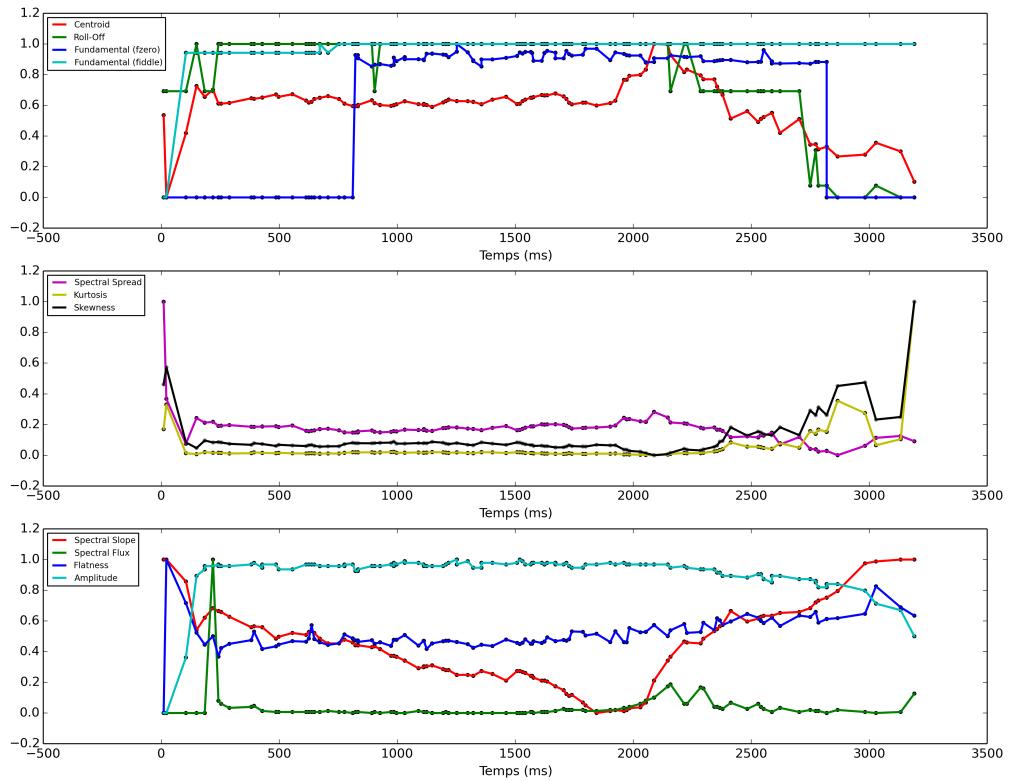
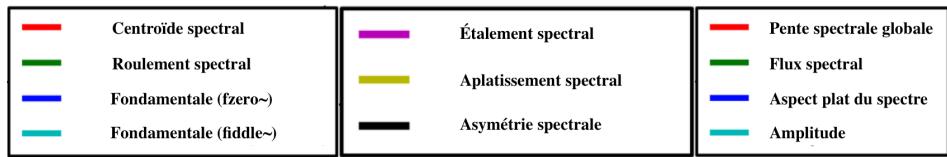


FIGURE 8.53 – *Fa # – Pitch bend découvrant* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant un *pitch bend* où on découvre progressivement l’embouchure et joué sur le doigté du *Fa#* grave, est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

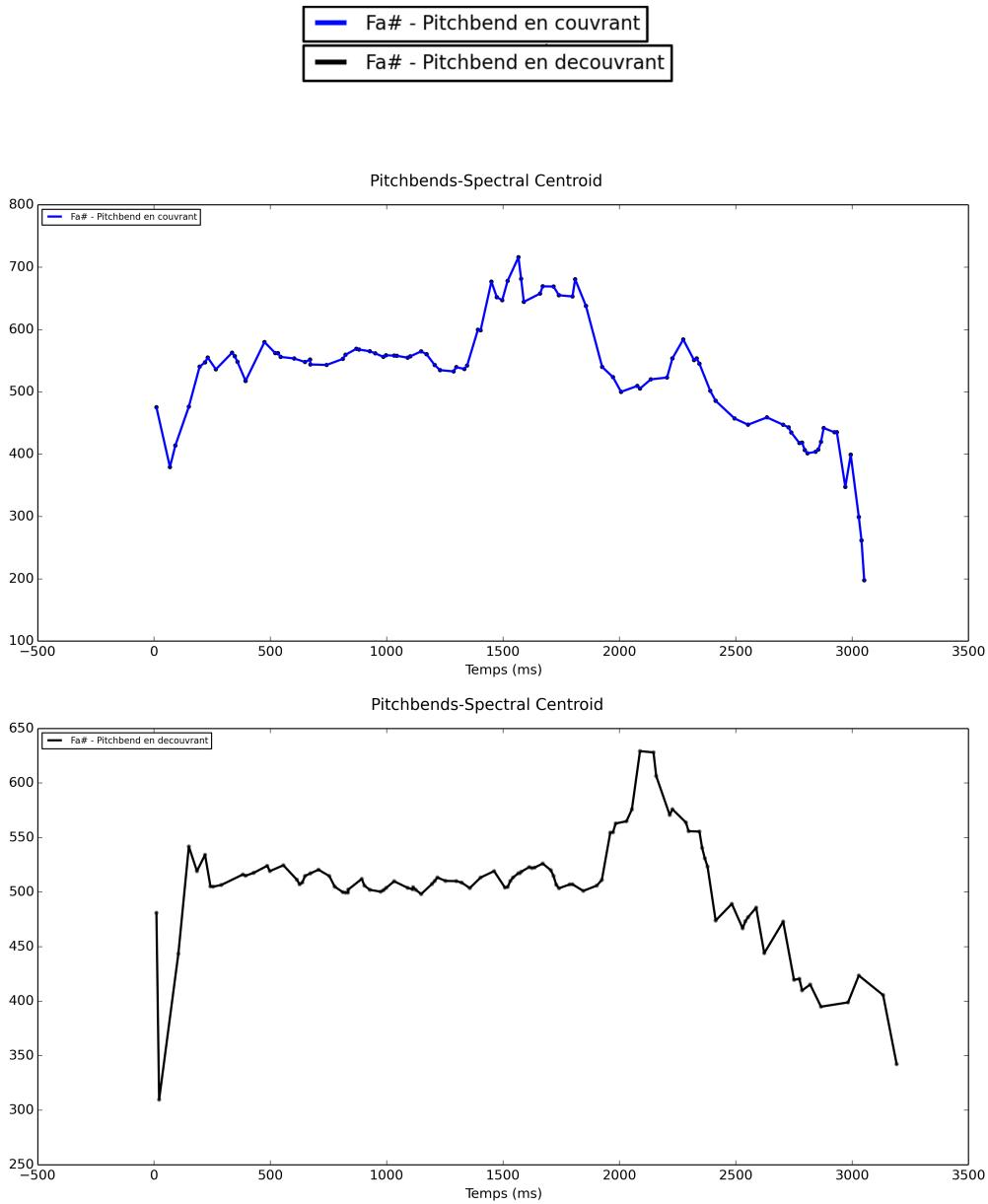


FIGURE 8.54 – Pitch bend - Centroïde – Le suivi des valeurs liées au centroïde spectral pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

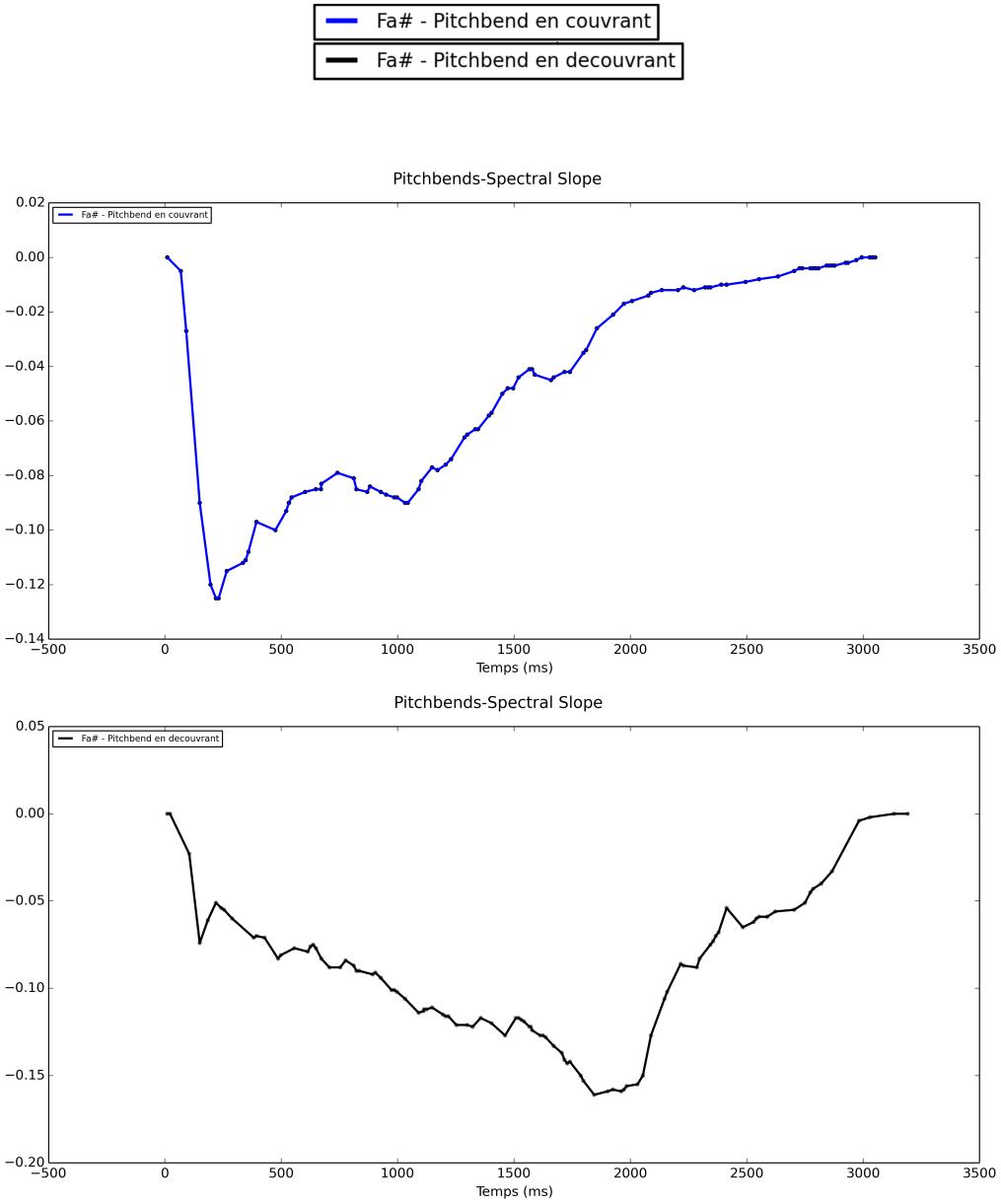


FIGURE 8.55 – Pitch bend - Pente spectrale globale (*slope*) – Le suivi des valeurs liées à la pente spectrale globale pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte :** [cliquez ici](#).

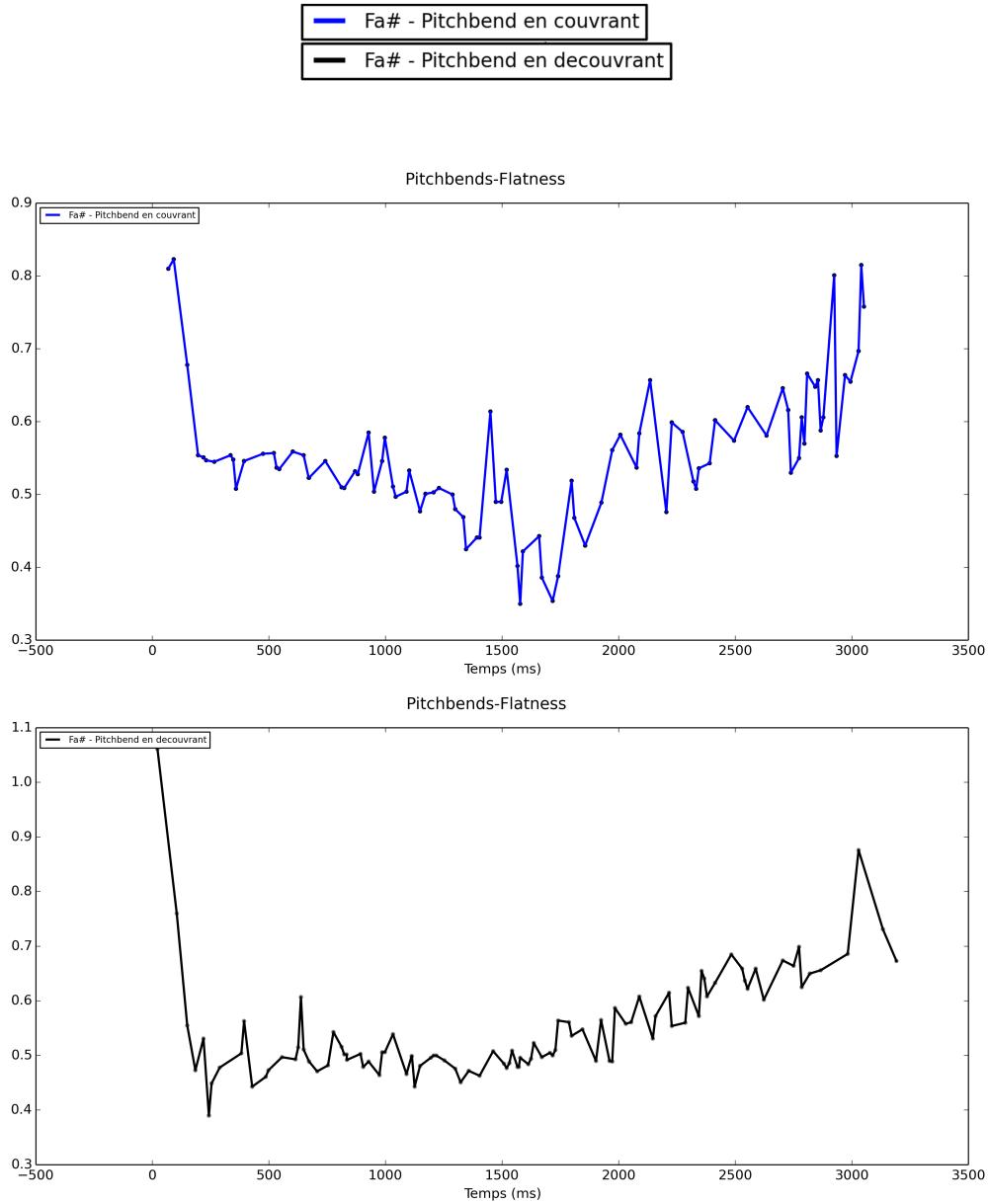


FIGURE 8.56 – **Pitch bend - Aspect plat du spectre (flatness)** – Le suivi des valeurs liées à l'aspect plat du spectre pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du Fa# grave. **Retour au texte :** [cliquez ici](#).

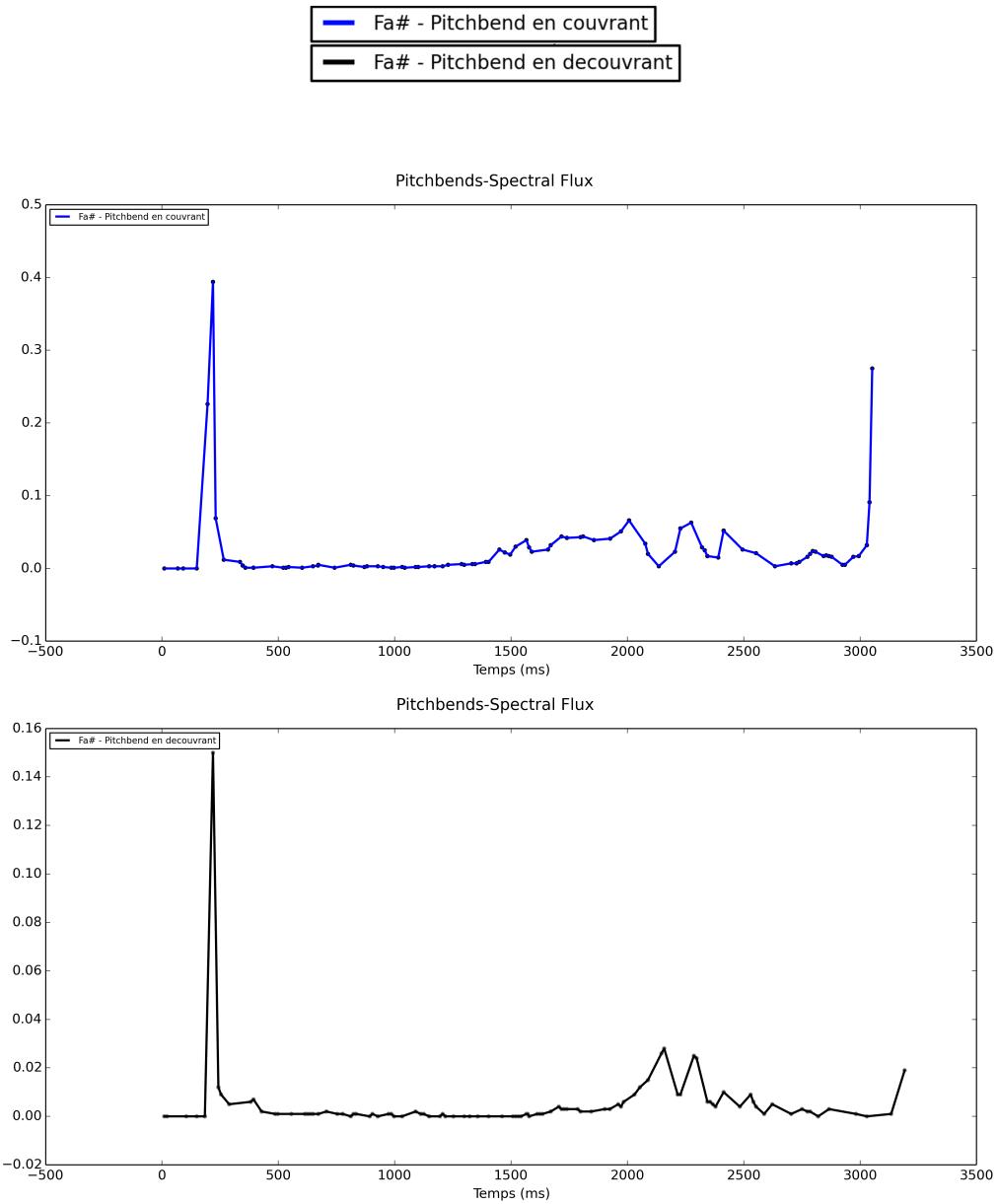


FIGURE 8.57 – **Pitch bend - Flux spectral** – Le suivi des valeurs liées au flux spectral pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du Fa# grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

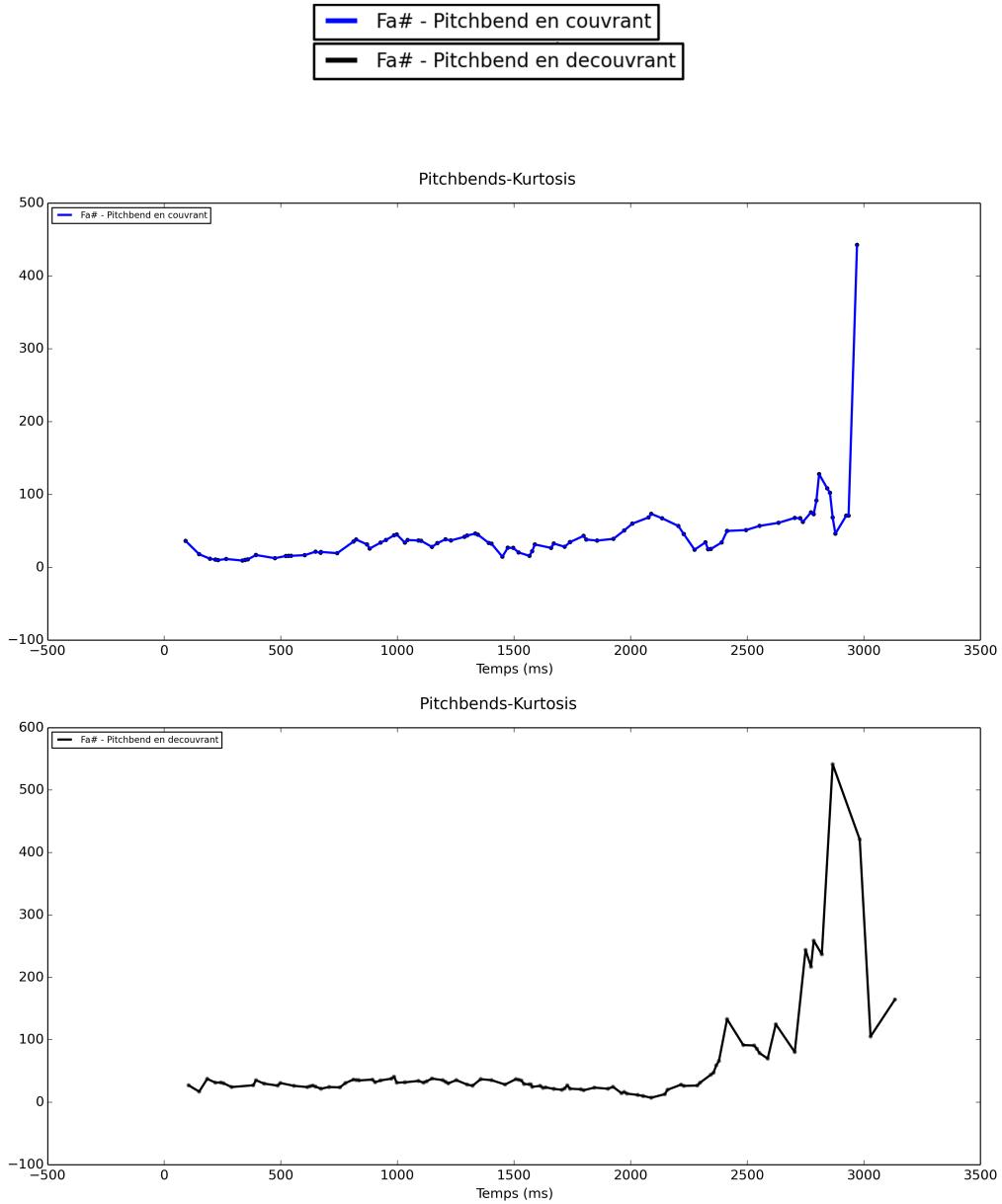


FIGURE 8.58 – Pitch bend - Aplatissement (kurtosis) – Le suivi des valeurs liées à l’aplatissement spectral pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu) ; sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

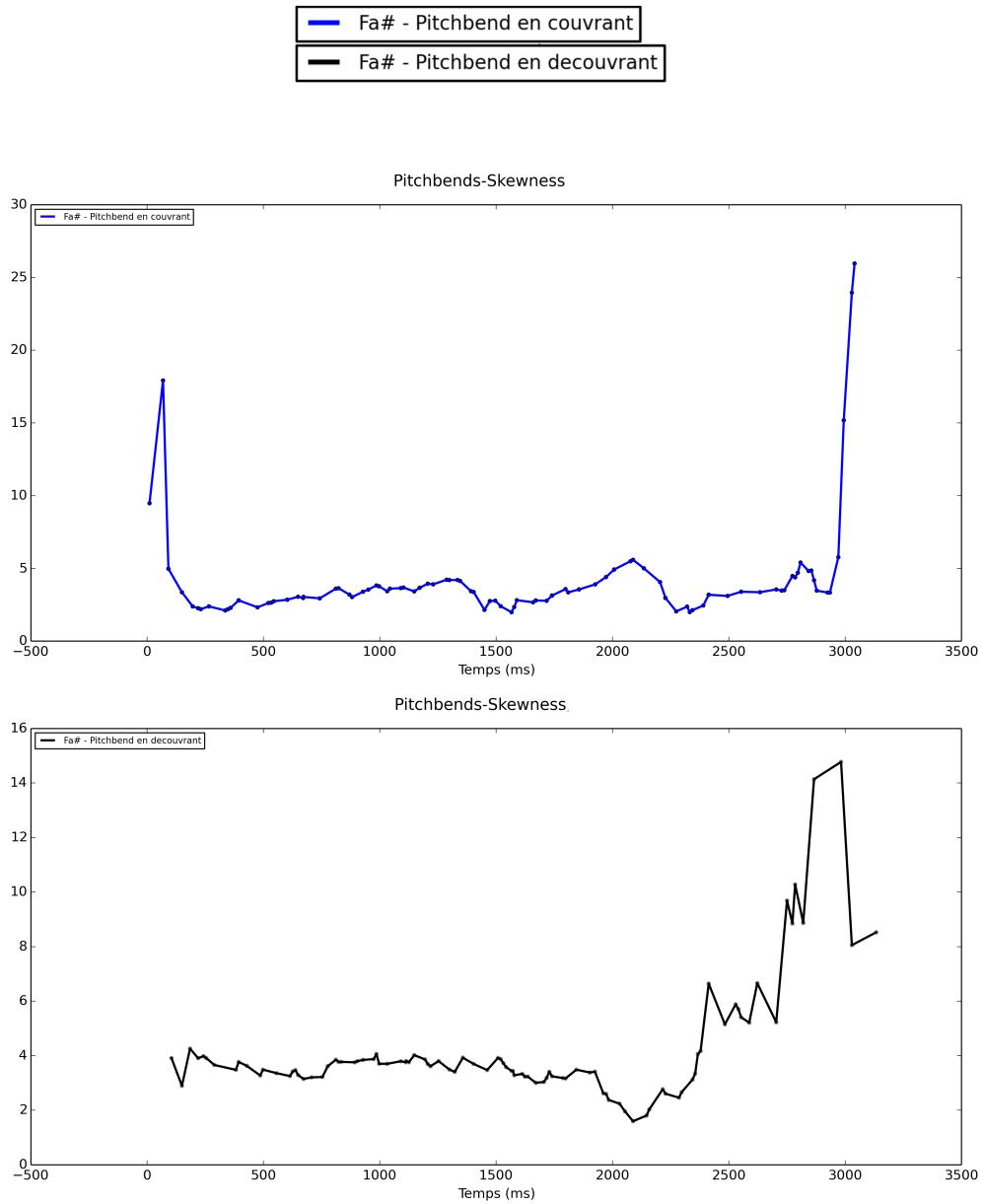


FIGURE 8.59 – **Pitch bend - Asymétrie (skewness)** – Le suivi des valeurs liées à l'asymétrie spectrale pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas; on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

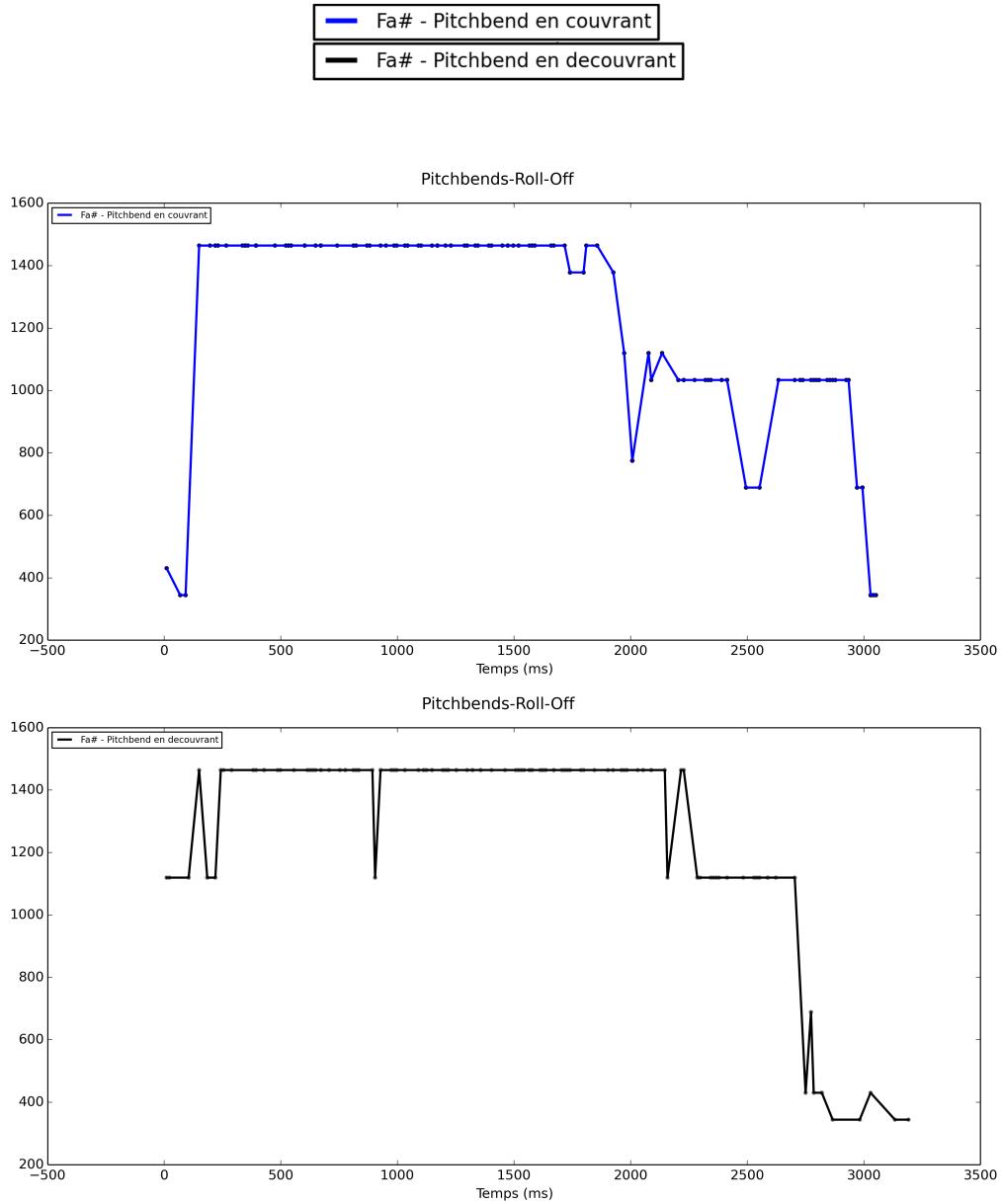


FIGURE 8.60 – **Pitch bend - Roulement (roll-off)** – Le suivi des valeurs liées au roulement spectral pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas; on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

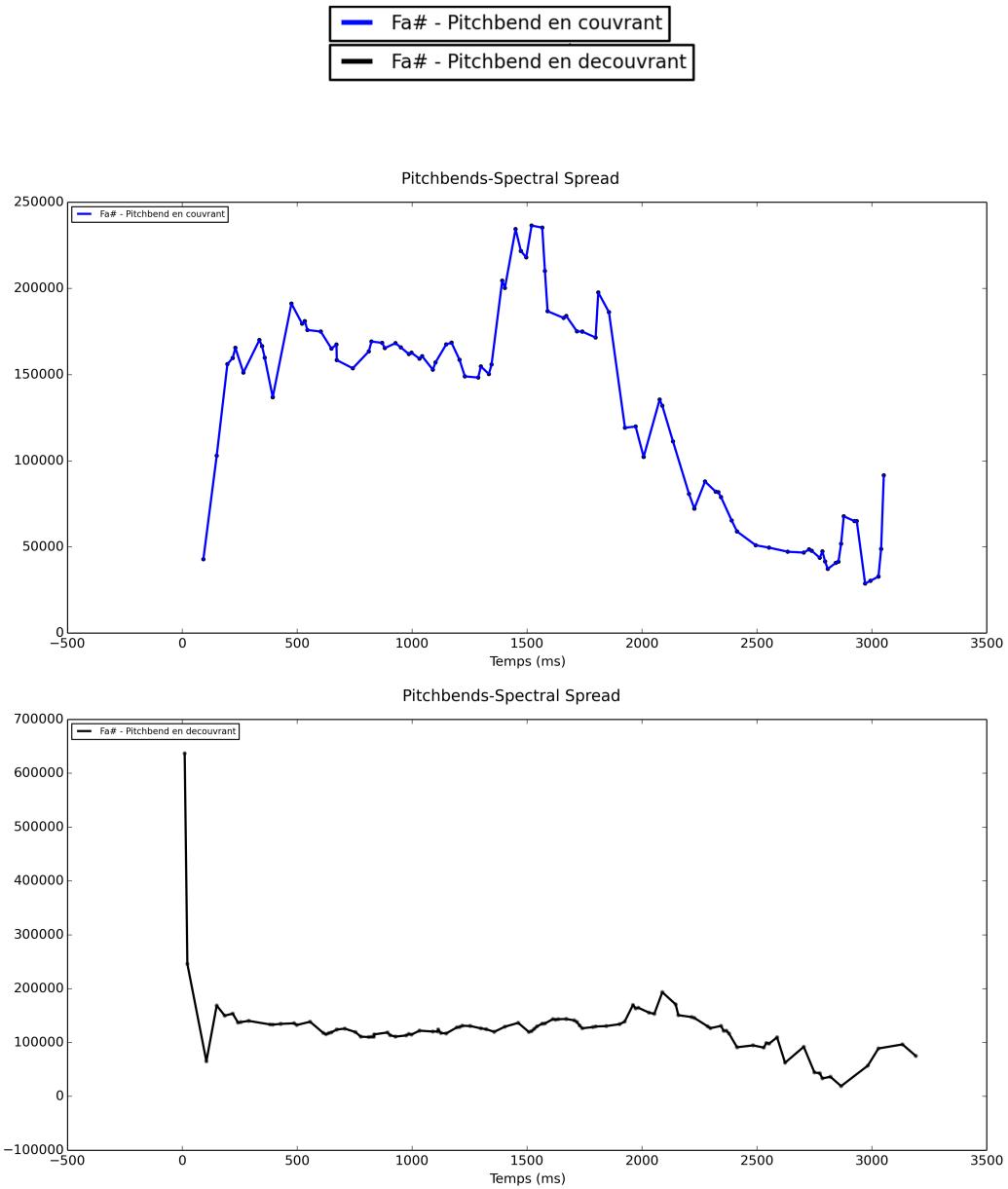


FIGURE 8.61 – **Pitch bend - Étalement (spread)** – Le suivi des valeurs liées à l'étalement spectral pour deux *pitch bends*, respectivement couvrant et découvrant, est représenté ici. Sur le graphique du haut, on peut observer le *pitch bend* couvrant (en bleu); sur le graphique du bas, on peut observer le *pitch bend* découvrant (en noir). Les deux ont été joués sur le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

5.6 Changements de timbre : sons standard et éolien

5.6.1 Observation générale des changements de timbres

Du son éolien au son standard

La première chose que l'on remarque est la présence d'une transition marquée entre l'état « éolien » et l'état « standard » du son. Les valeurs du centroïde, du roulement et de l'étalement spectraux sont toutes plutôt élevées et varient fortement durant la portion bruitée, baissent radicalement au moment de la transition et remontent à mesure que le son se précise (ce qui correspond à une augmentation progressive de la brillance). Le flux spectral est lui aussi passablement haut durant la première moitié du fichier, puis baisse et reste bas durant la portion « son » du fichier. Le suivi d'amplitude et l'évolution de la pente spectrale globale suivent des tendances contraires : la première monte linéairement, alors que la seconde descend. La valeur du descripteur *flatness* a un comportement contraire selon la note jouée : elle monte dans le cas du *Do#4* et descend dans le cas du *Fa#4*. Quant aux descripteurs aplatissement et asymétrie spectraux, leurs valeurs sont assez basses, excepté au moment de la transition entre les deux états sonores. Enfin, la fréquence fondamentale est détectée de façon un peu erratique durant les 500 premières millisecondes, puis de façon stable par l'objet `fiddle~`. L'objet `fzero~`, lui, ne détecte la fondamentale que durant la portion « son » du *Fa#4* (figures 8.62 pour *Do#4* et 8.63 pour *Fa#4*).

Du son standard au son éolien

Les descripteurs centroïde, étalement et roulement spectraux ainsi que la pente spectrale globale adoptent un comportement contraire à ce qui est observé durant le changement entre éolien et standard : les valeurs sont plutôt basses, puis montent d'un coup au moment de la transition vers la portion bruitée du fichier. Le flux spectral suit la même tendance, à l'exception du fait que sa courbe devient beaucoup plus accidentée, presque aléatoire, durant la portion bruitée. L'aspect plat du signal a un comportement conséquent avec ce que l'on retrouve dans les exemples précédents : avec cette transformation inversée, la tendance est également inversée. L'aplatissement et l'asymétrie spectraux ont des valeurs élevées uniquement lors de la transition entre les deux états sonores, qu'ils soulignent de la même manière. Enfin, ici aussi, l'amplitude diminue assez linéairement, et la fréquence fondamentale semble mieux détectée par l'objet `fiddle~` que par l'objet `fzero~` (figures 8.64 pour *Do#4* et 8.65 pour *Fa#4*).

5.6.2 Observations sur certains descripteurs

Centroïde et flux spectraux

En ce qui concerne le centroïde, la tendance contraire entre les deux types de transformation apparaît clairement. De plus, les valeurs varient de façon beaucoup plus marquée dans la portion bruitée du fichier sonore. Quant au flux spectral, il suit la même tendance, mais de manière amplifiée par rapport au centroïde : les valeurs basses restent au plancher tandis que l'écart entre les variations de la valeur durant la portion éolienne du son est beaucoup plus élevé que pour le centroïde (figures 8.66 pour le centroïde et 8.67 pour le flux spectral).

Pente globale et aspect plat du spectre

Élevée durant les transitoires d'extinction, la pente globale du spectre tend à obtenir des valeurs plus basses durant la portion du fichier occupée par le son standard. Il s'agit d'une tendance globale cependant : les courbes marquent plusieurs paliers dans leurs progressions respectives. La même tendance s'observe du côté de l'aspect plat du signal avec le *Fa#4*, mais c'est plutôt le contraire qui se produit dans le cas du *Do#4*. Dans ce cas précis, d'autres échantillons seraient nécessaires afin de déterminer de façon précise les tendances de ce descripteur (figures 8.68 pour la pente spectrale globale et 8.69 pour l'aspect plat du spectre).

Aplatissement et asymétrie spectraux

Placées côte-à-côte, les courbes de ces deux descripteurs affichent des tendances presque identiques. De plus, on remarque clairement à quel moment se produit la transition entre les deux états sonores, leurs valeurs augmentant alors brusquement, et diminuant de la même manière aussitôt la transition complétée (figures 8.70 pour l'aplatissement et 8.71 pour l'asymétrie).

Pour passer directement à la section suivante des résultats (sur les transitions de voyelles), cliquez [ici](#).

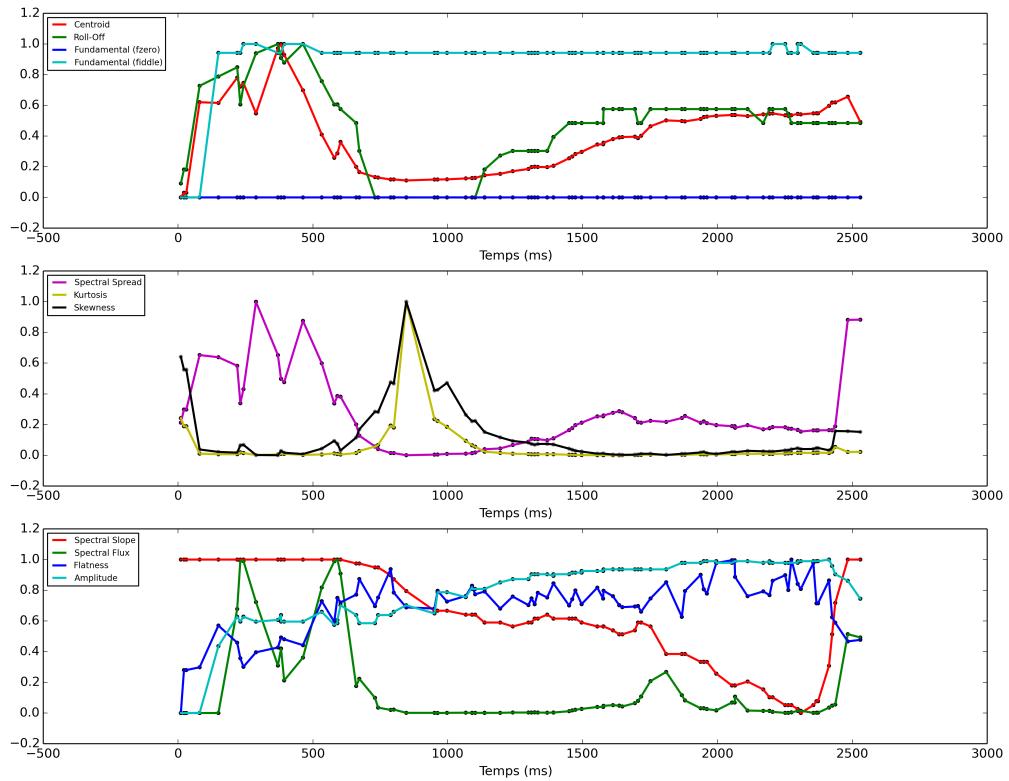
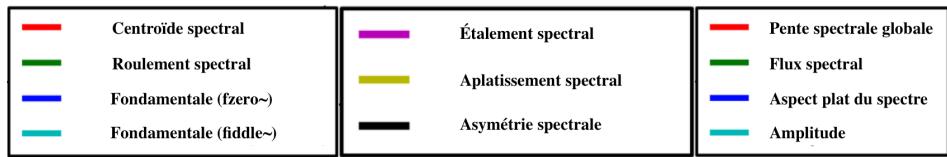


FIGURE 8.62 – Do # – Éolien vers standard – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre son éolien et son standard, jouée sur *Do#* grave (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

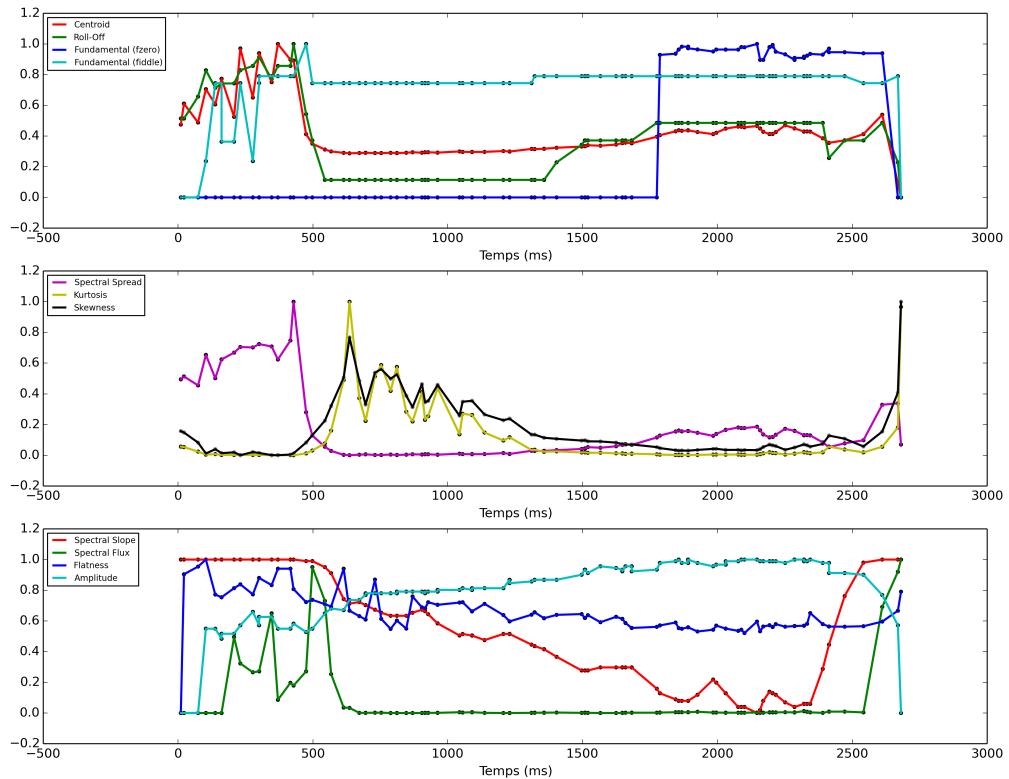
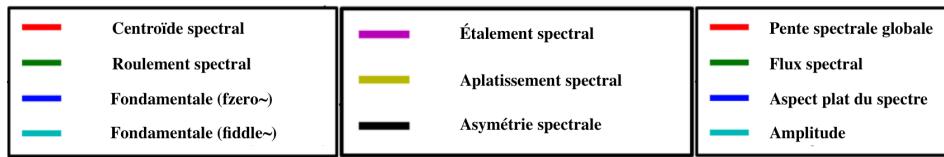


FIGURE 8.63 – *Fa # – Éolien vers standard* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre son éolien et son standard, jouée sur *Fa#* grave (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

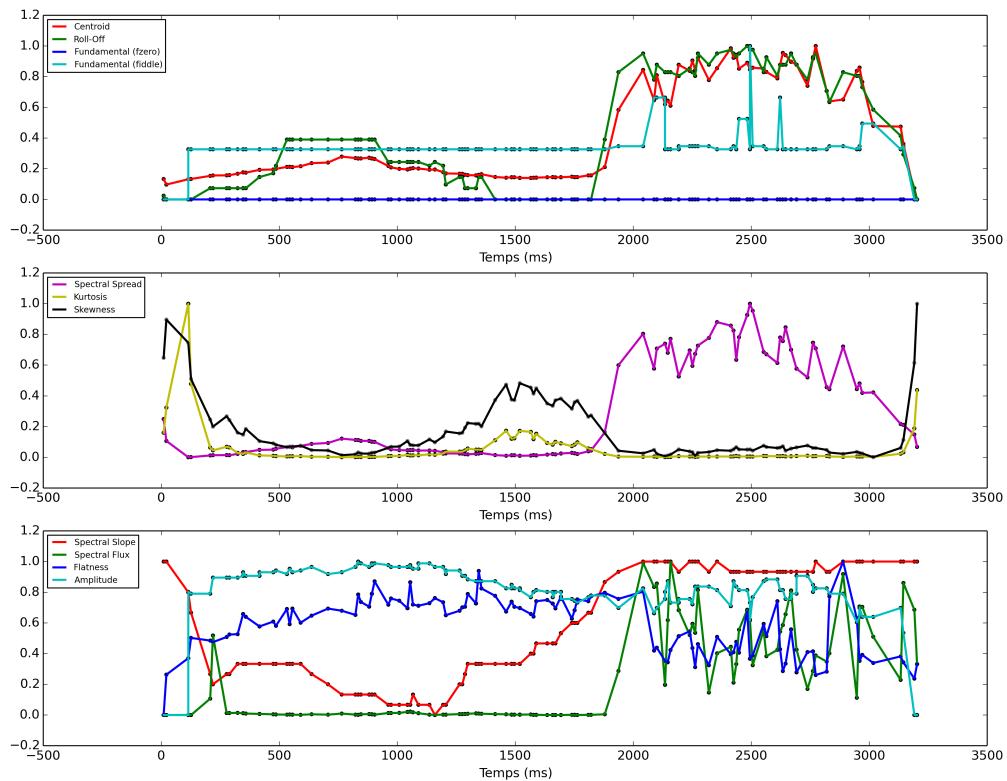
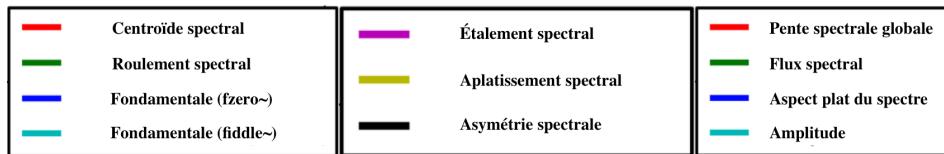


FIGURE 8.64 – **Do # – Standard vers éolian** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre son standard et son éolian, jouée sur *Do#* grave (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

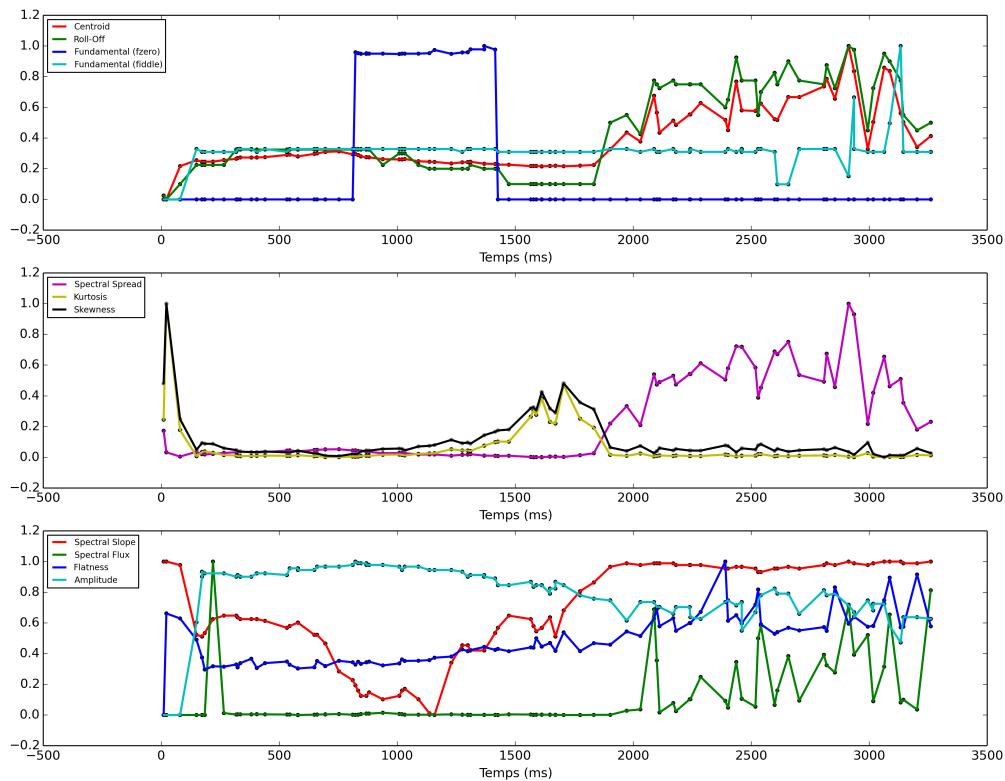
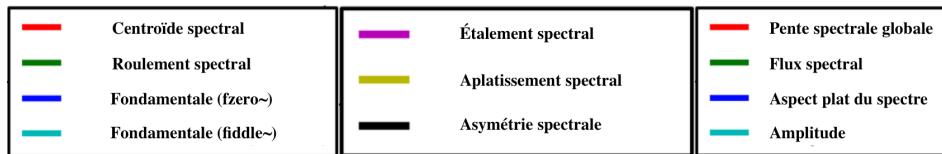


FIGURE 8.65 – **Fa # – Standard vers éolian** – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre son standard et son éolian, jouée sur *Fa#* grave (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étallement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

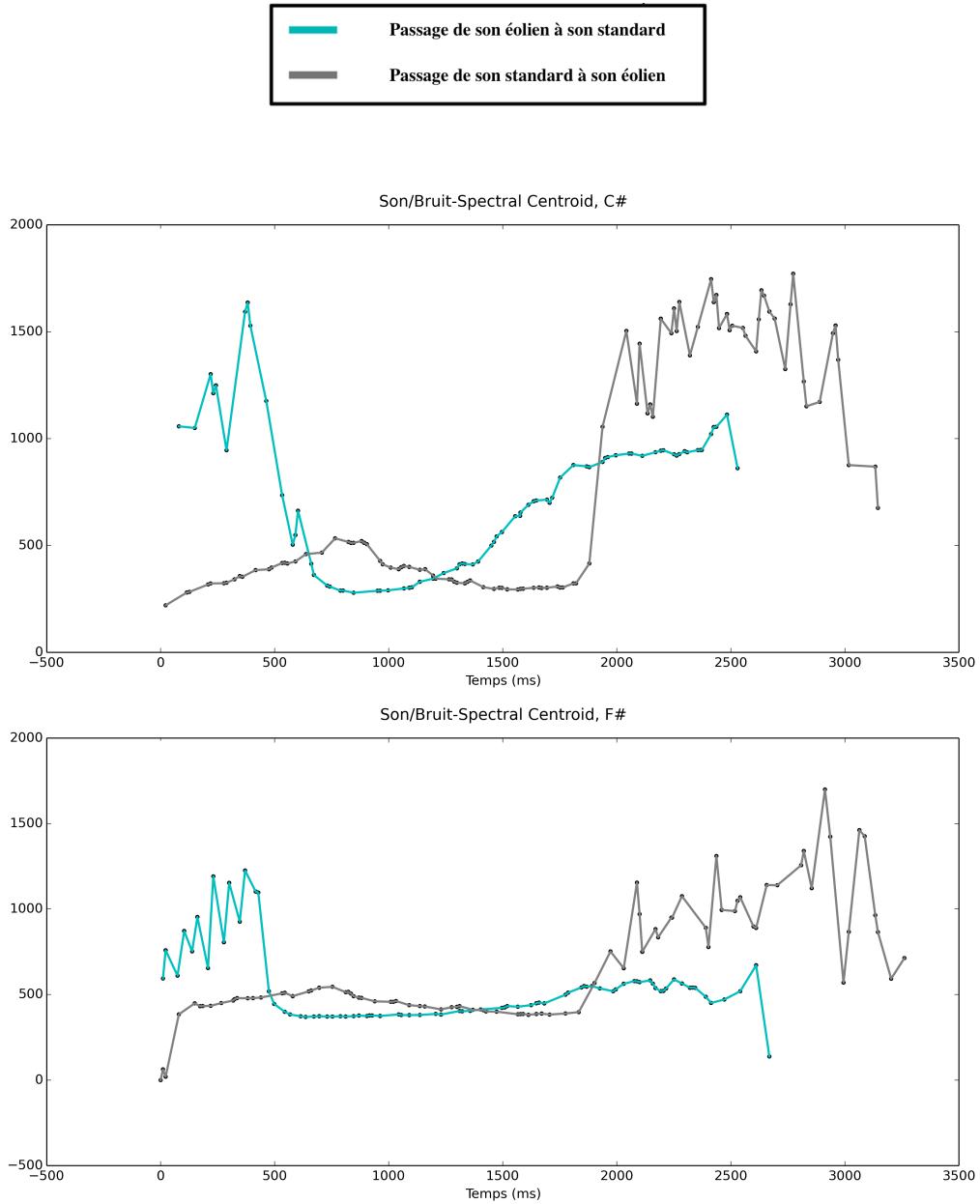


FIGURE 8.66 – Transition Son/Bruit - Centroïde – Le suivi des valeurs liées au centroïde spectral pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

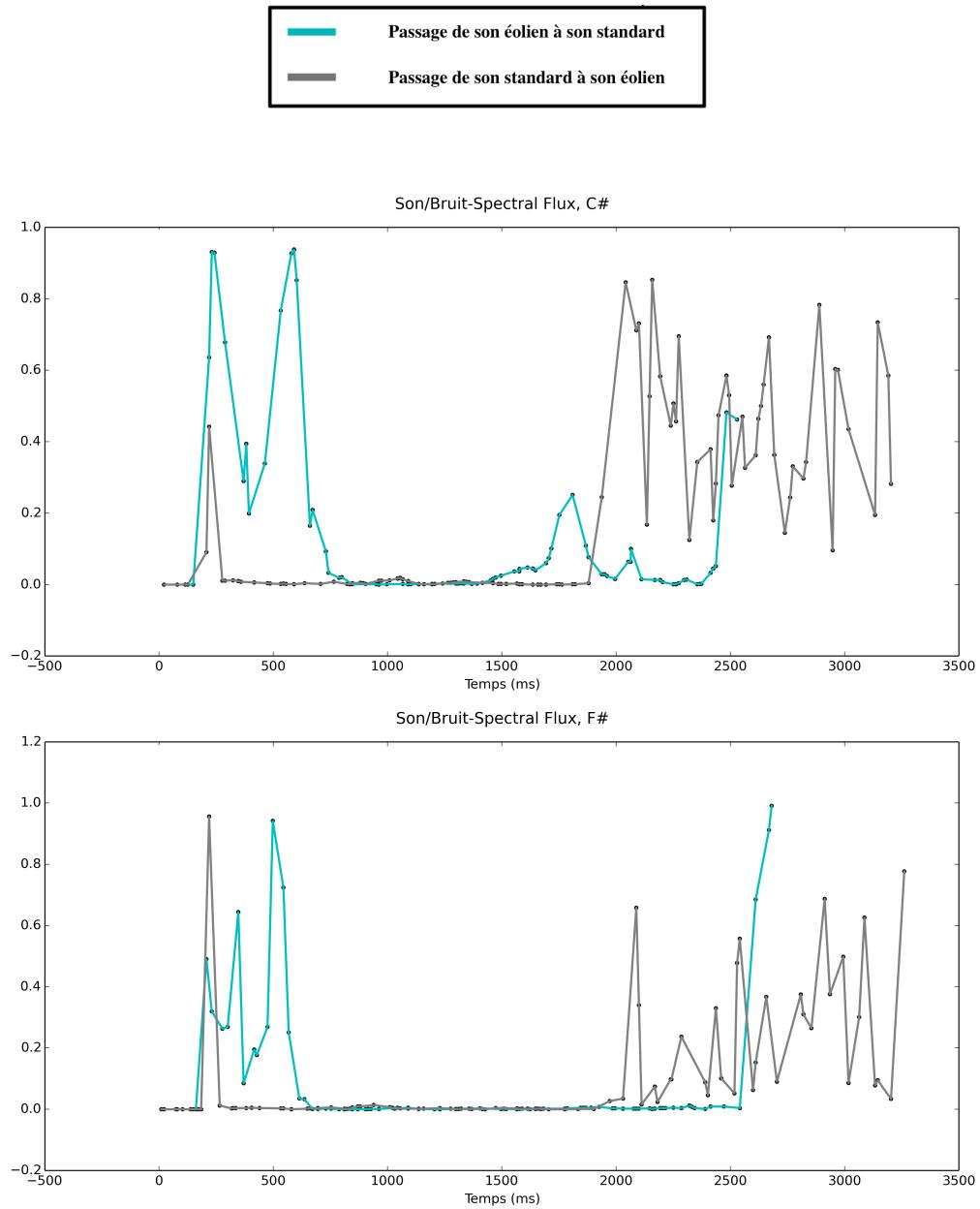


FIGURE 8.67 – **Transition Son/Bruit - Flux spectral** – Le suivi des valeurs liées au flux spectral pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

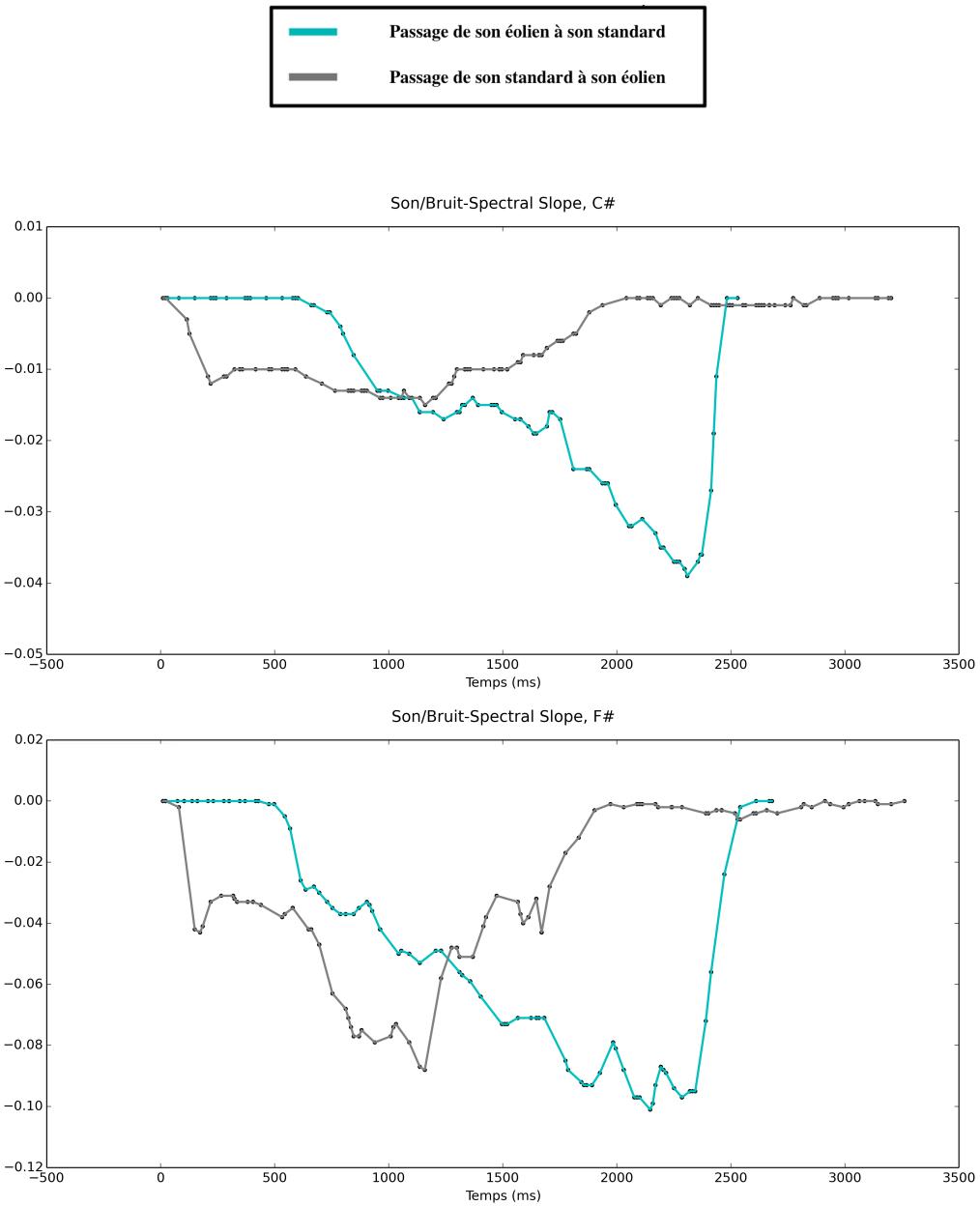


FIGURE 8.68 – Transition Son/Bruit - Pente spectrale globale (*slope*) – Le suivi des valeurs liées à la pente spectrale globale pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

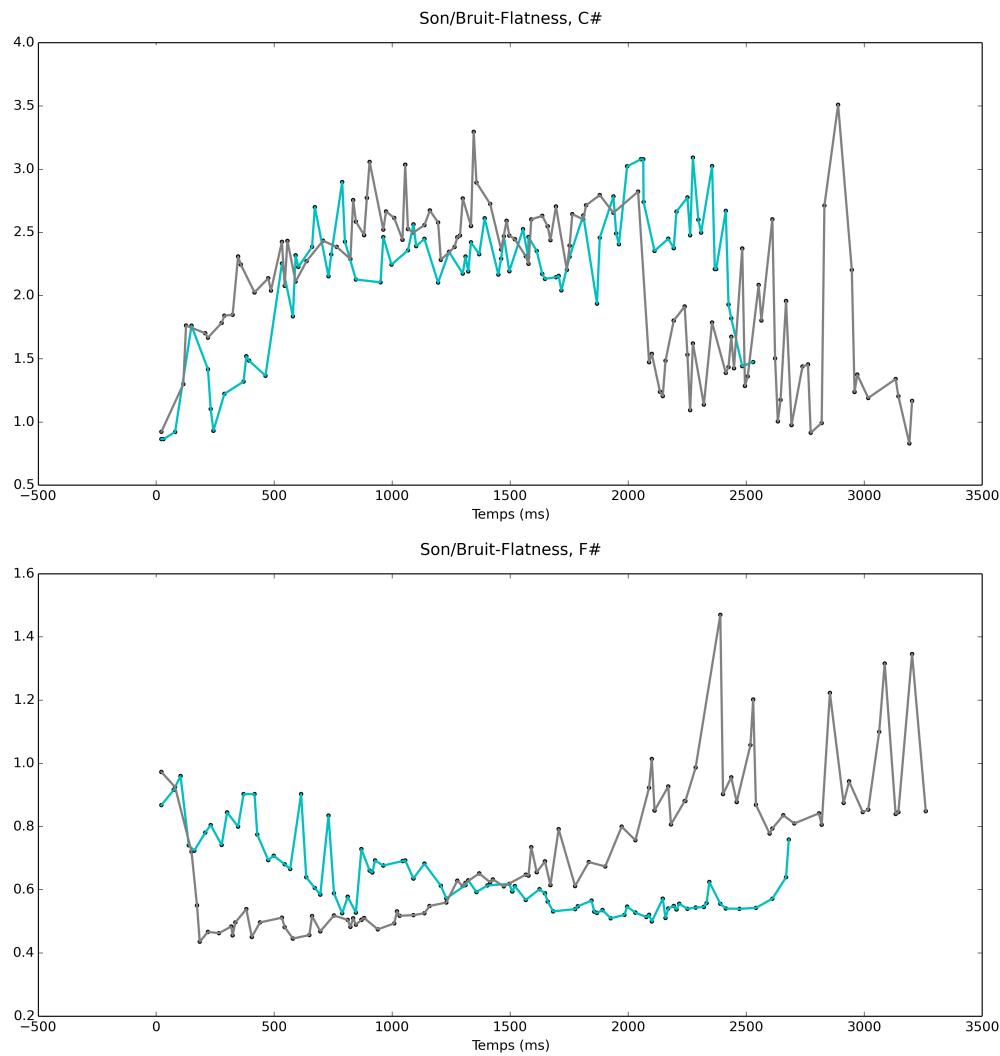
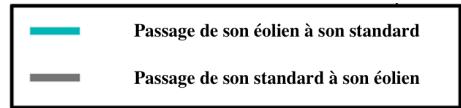


FIGURE 8.69 – Transition Son/Bruit - Aspect plat du spectre (*flatness*) – Le suivi des valeurs liées à l'aspect plat du spectre pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

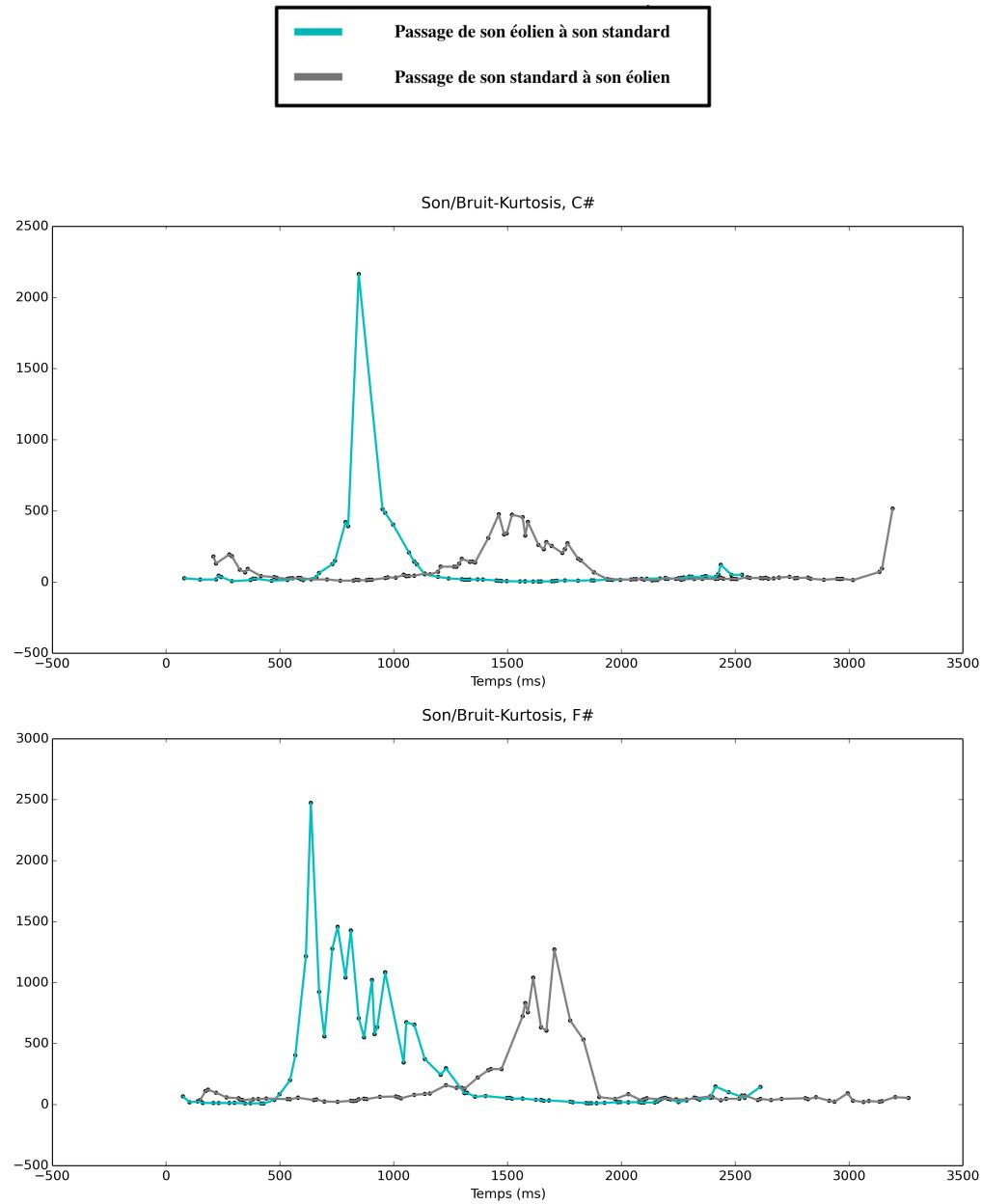


FIGURE 8.70 – Transition Son/Bruit - Aplatissement (*kurtosis*) – Le suivi des valeurs liées à l’aplatissement spectral pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

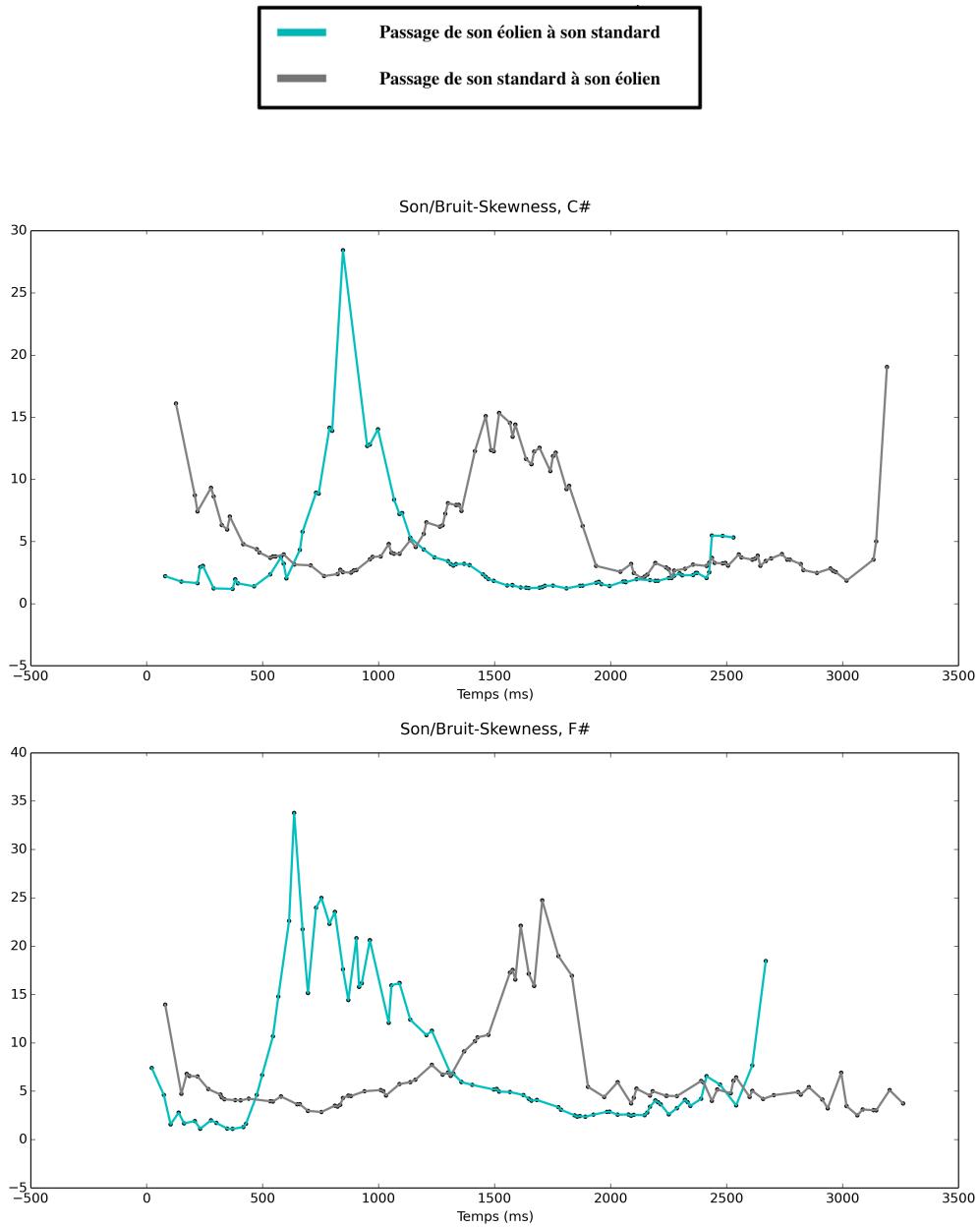


FIGURE 8.71 – Transition Son/Bruit - Asymétrie (*skewness*) – Le suivi des valeurs liées à l’asymétrie spectrale pour deux types de transition (entre son/standard et bruit/éolien, en gris, et entre bruit/éolien et son/standard, en cyan) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. **Retour au texte : cliquez ici.**

5.7 Changements de timbre : voyelles [i]/[o]

5.7.1 Observation générale des changements de timbres

Changement de voyelle : de [i] à [o]

Dans le cas de ce changement de voyelle, on remarque que les courbes du centroïde et de l'étalement spectral ont des tendances similaires, sans toutefois afficher de différence précise entre les deux voyelles. La courbe de la pente spectrale affiche une tendance contraire à celles des deux descripteurs précédents, spécialement durant la seconde partie du fichier sonore. Elle tend à être moins élevée durant le [o] que durant le [i]. Les valeurs d'aplatissement et de flux spectral sont basses en général sauf lors des transitoires d'attaque et d'extinction. Quant à l'asymétrie spectrale et à l'aspect plat du spectre, ils affichent des tendances contraires : la première monte légèrement vers le [o], tandis que le second descend (figures 8.72 pour *Do#4* et 8.73 pour *Fa#4*).

Changement de voyelle : de [o] à [i]

Ici, les tendances contraires entre le centroïde et la pente spectrale se confirment (et sont inversées par rapport au changement de voyelle précédent). Par contre, l'étalement spectral tend à descendre, contrairement au centroïde qui monte vers le [i]. Conséquemment par rapport au changement de voyelle inverse, ici, les courbes respectives de l'asymétrie et de l'aspect plat du spectre se comportent de manière inversée : la première descend vers le [i], alors que la seconde monte légèrement (figures 8.74 pour *Do#4* et 8.75 pour *Fa#4*). Dans les deux cas de changement de voyelles, le roulement spectral n'est détecté que de manière approximative ; la fréquence fondamentale est, comme presque toujours pour les sons de flûte, beaucoup mieux détectée par l'objet `fiddle~` que par l'objet `fzero~`.

5.7.2 Observations sur certains descripteurs

Centroïde, aspect plat et étalement du spectre

Proportionnellement, un son joué avec les résonateurs vocaux en position pour produire la voyelle [i] produit un centroïde plus élevé qu'un son joué en position [o]. La même tendance s'observe

lorsque l'on compare ces courbes avec celles de l'aspect plat du spectre. La corrélation apparaît même plus forte entre ces deux descripteurs qu'entre le centroïde et l'étalement spectral (figures 8.76 pour le centroïde, 8.77 pour l'aspect plat du spectre et 8.78 pour l'étalement spectral).

Flux et aplatissement spectraux

Les valeurs du flux spectral restent effectivement basses sauf lors des transitoires d'attaque et d'extinction, même lorsqu'on en isole les courbes. Par contre, en les observant attentivement, on constate une tendance similaire à celle suivie par le centroïde. Enfin, comme dans l'expérience sur le changement de brillance du son, l'aplatissement spectral se comporte de manière inversée par rapport au centroïde (figures 8.79 pour le flux spectral et 8.80 pour l'aplatissement spectral).

Pour passer directement à la section discussion de ce chapitre, cliquez [ici](#).

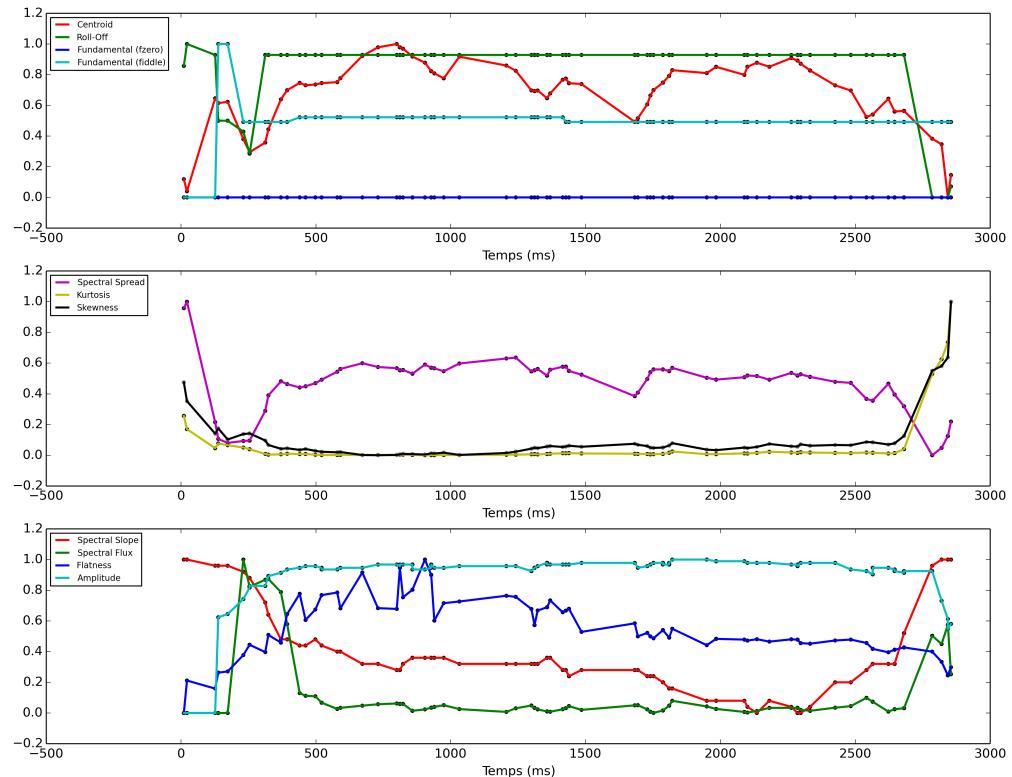
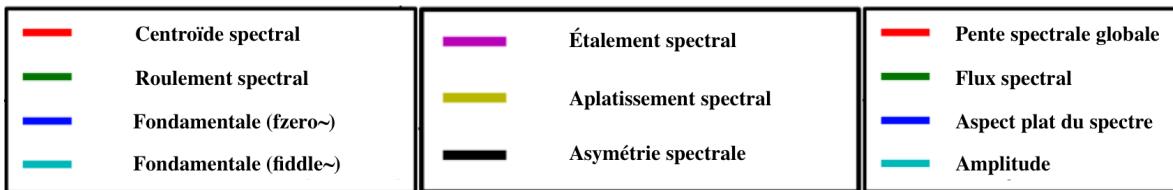


FIGURE 8.72 – *Do # – Voyelles : [i vers o]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre la voyelle [i] et la voyelle [o], jouée sur *Do#* grave (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). Retour au texte : [cliquez ici](#).

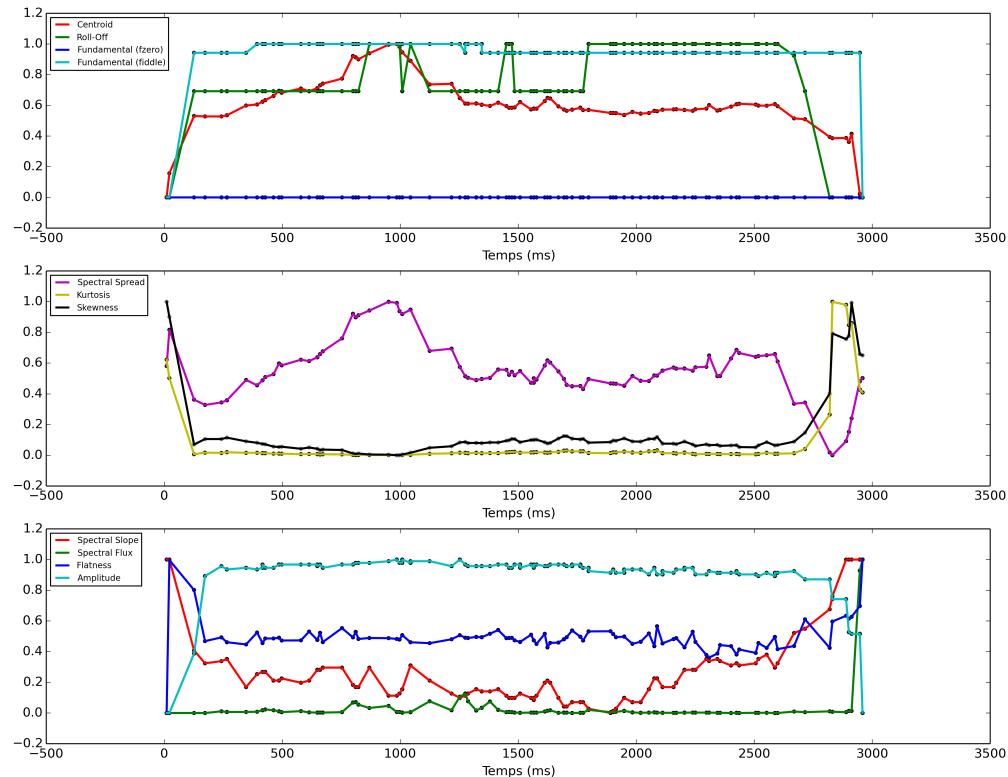
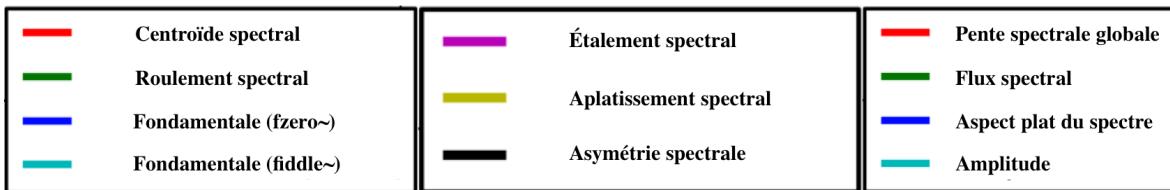


FIGURE 8.73 – *Fa # – Voyelles : [i vers o]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre la voyelle [i] et la voyelle [o], jouée sur *Fa#* grave (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets *fzero~* et *fiddle~*). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

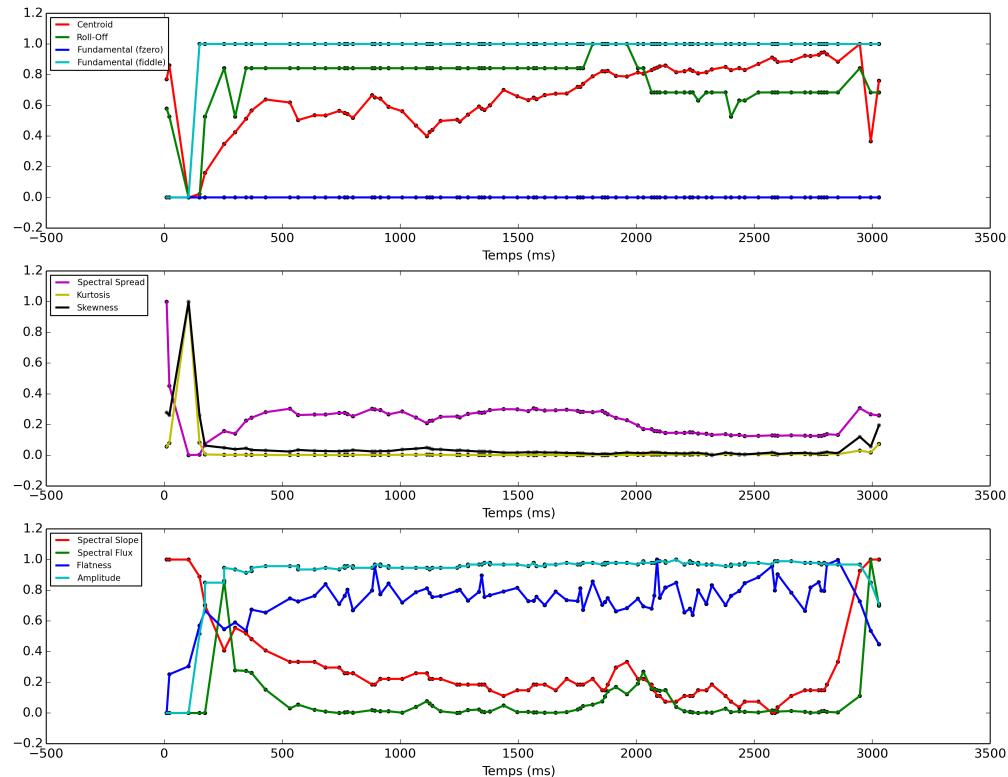
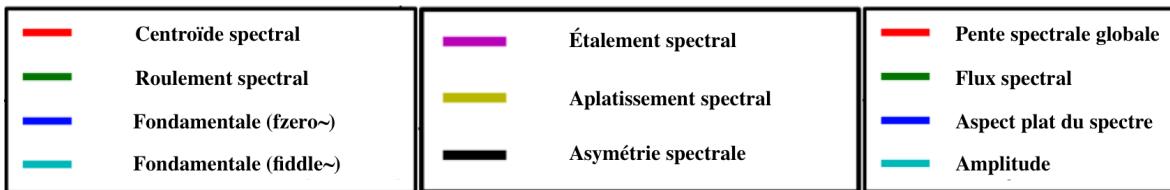


FIGURE 8.74 – *Do # – Voyelles : [o vers i]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre la voyelle [o] et la voyelle [i], jouée sur *Do#* grave (278,44 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

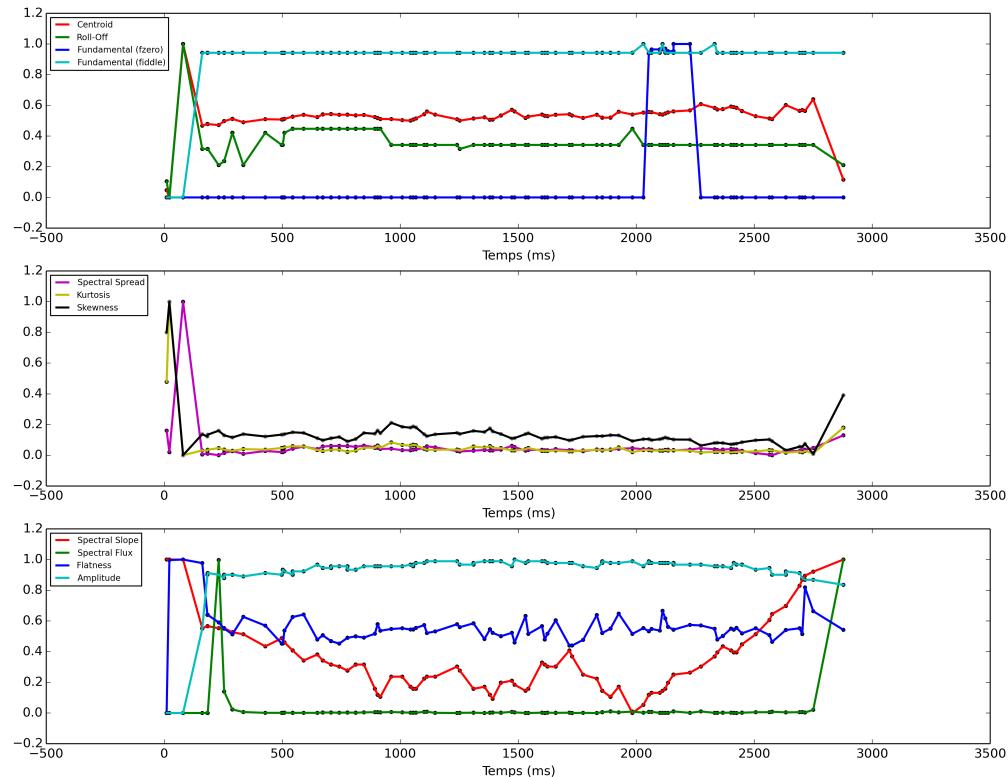
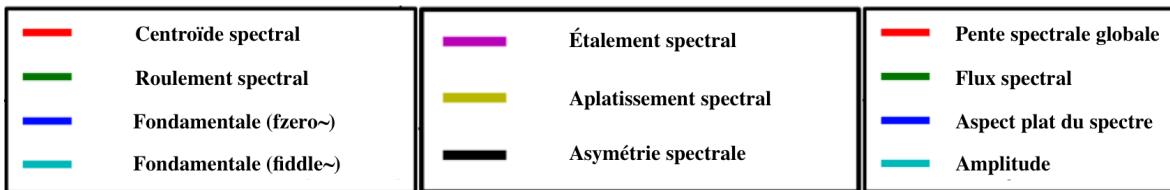


FIGURE 8.75 – *Fa # – Voyelles : [o vers i]* – Le suivi de 11 descripteurs du timbre durant une transition entre la voyelle [o] et la voyelle [oi], jouée sur *Fa#* grave (371,68 Hz), est représenté ici. Sur le graphique du haut : centroïde spectral, roulement spectral, fréquence fondamentale (objets `fzero~` et `fiddle~`). Sur le graphique du milieu : étalement spectral, aplatissement spectral et asymétrie spectrale. Sur le graphique du bas : pente spectrale globale (*slope*), flux spectral, aspect plat du spectre et amplitude (dB). **Retour au texte : cliquez ici.**

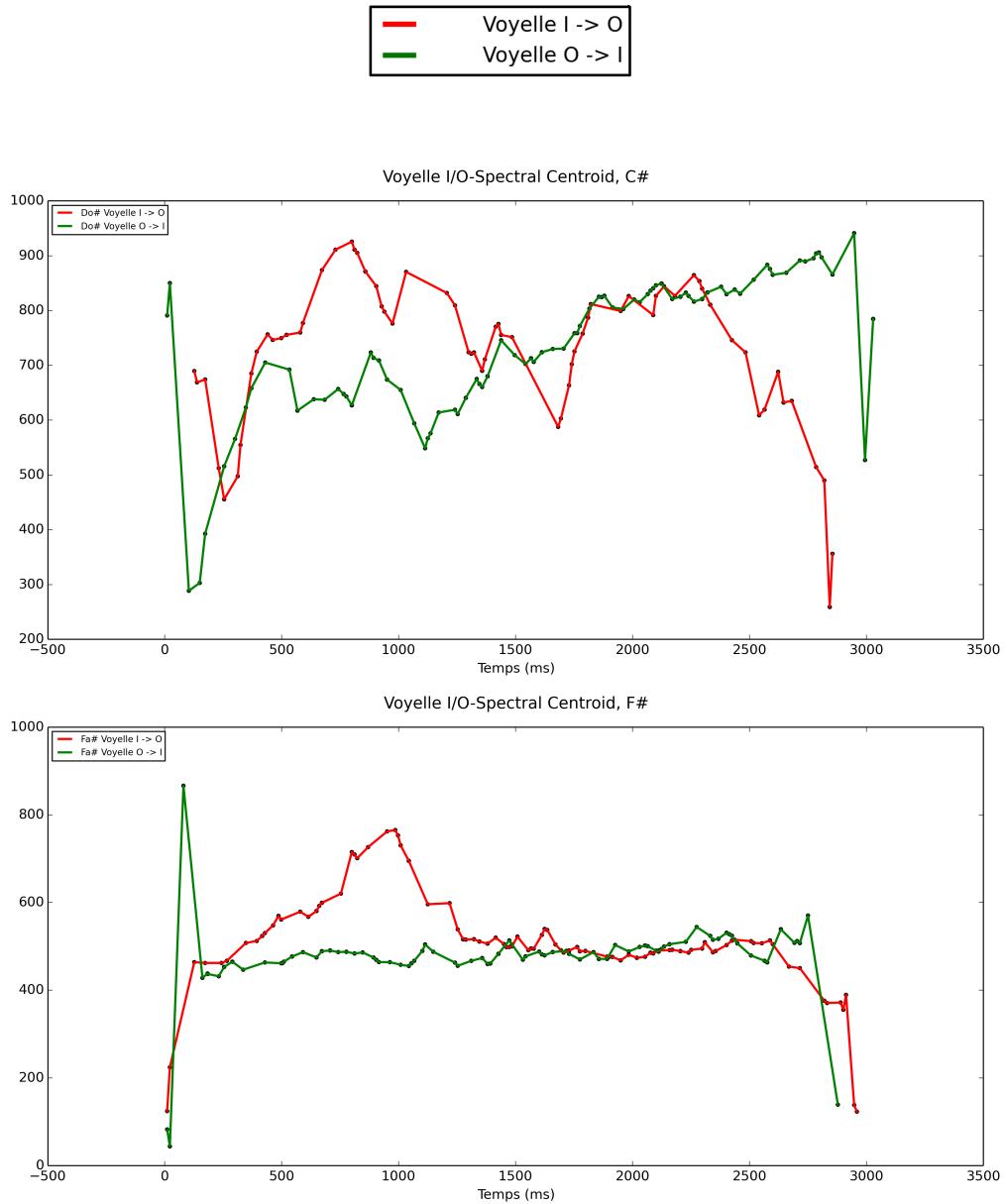


FIGURE 8.76 – **Transition de voyelles - Centroïde** – Le suivi des valeurs liées au centroïde spectral pour deux types de transition de voyelles (entre [i] et [o], en rouge, et entre [o] et [i], en vert) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du Do# grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du Fa# grave. **Retour au texte : cliquez ici.**



FIGURE 8.77 – Transition de voyelles - Aspect plat du spectre (*flatness*) – Le suivi des valeurs liées à l’aspect plat du spectre pour deux types de transition de voyelles (entre [i] et [o], en rouge, et entre [o] et [i], en vert) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

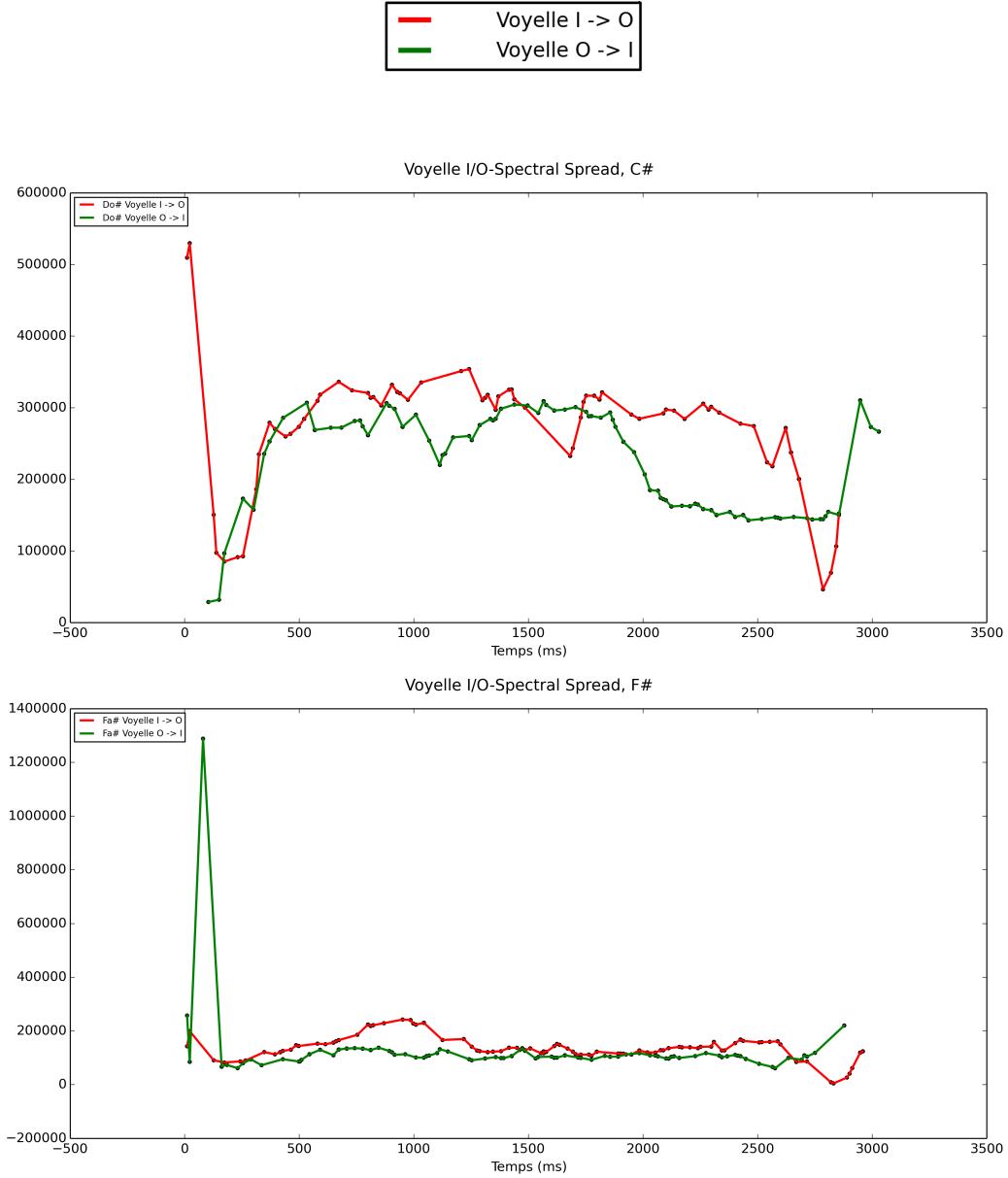


FIGURE 8.78 – **Transition de voyelles - Étalement (spread)** – Le suivi des valeurs liées à l'étalement spectral pour deux types de transition de voyelles (entre [i] et [o], en rouge, et entre [o] et [i], en vert) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do# grave*; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa# grave*. Retour au texte : [cliquez ici](#).

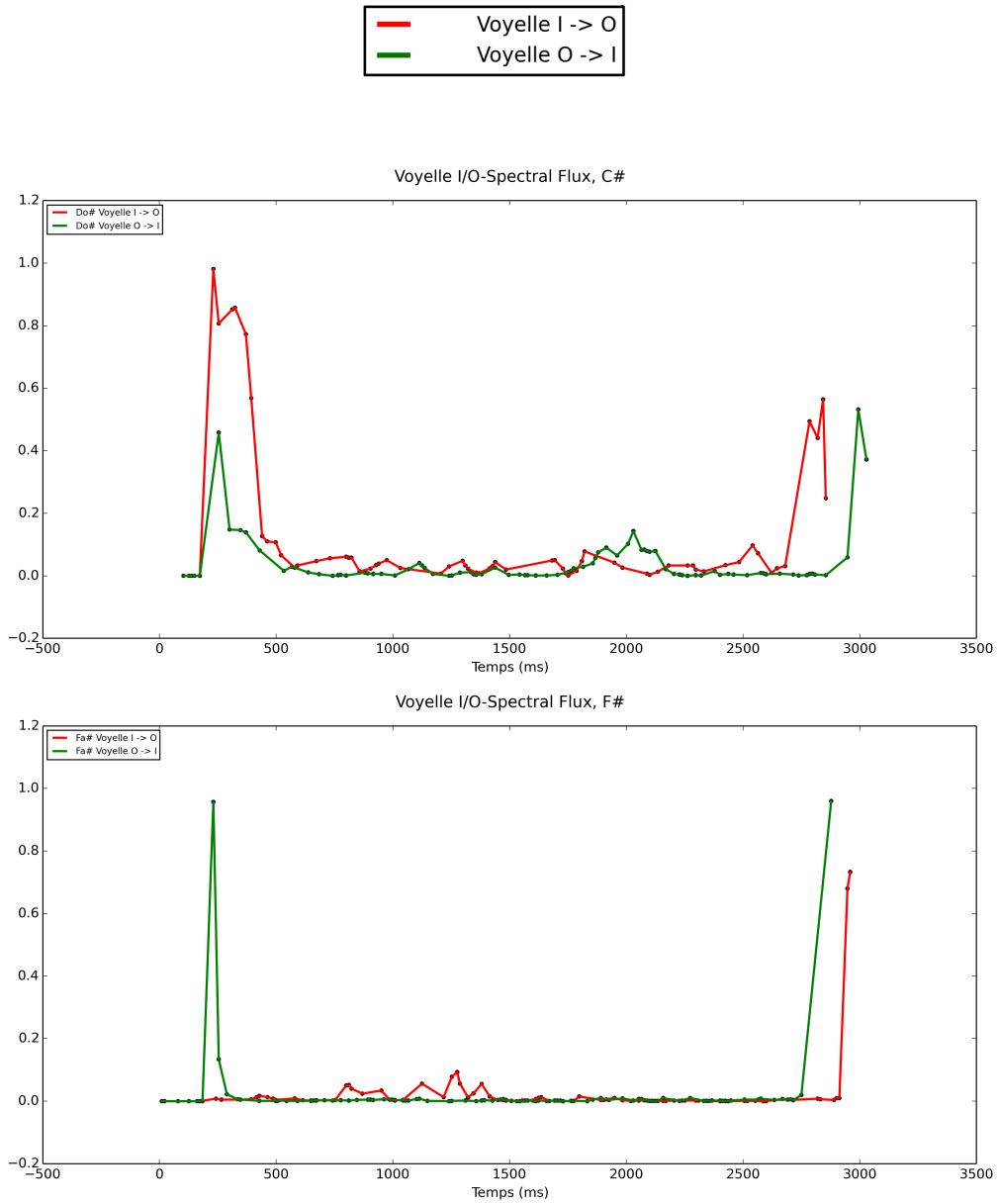


FIGURE 8.79 – **Transition de voyelles - Flux spectral** – Le suivi des valeurs liées au flux spectral pour deux types de transition de voyelles (entre [i] et [o], en rouge, et entre [o] et [i], en vert) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du Do# grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du Fa# grave. **Retour au texte : cliquez ici.**

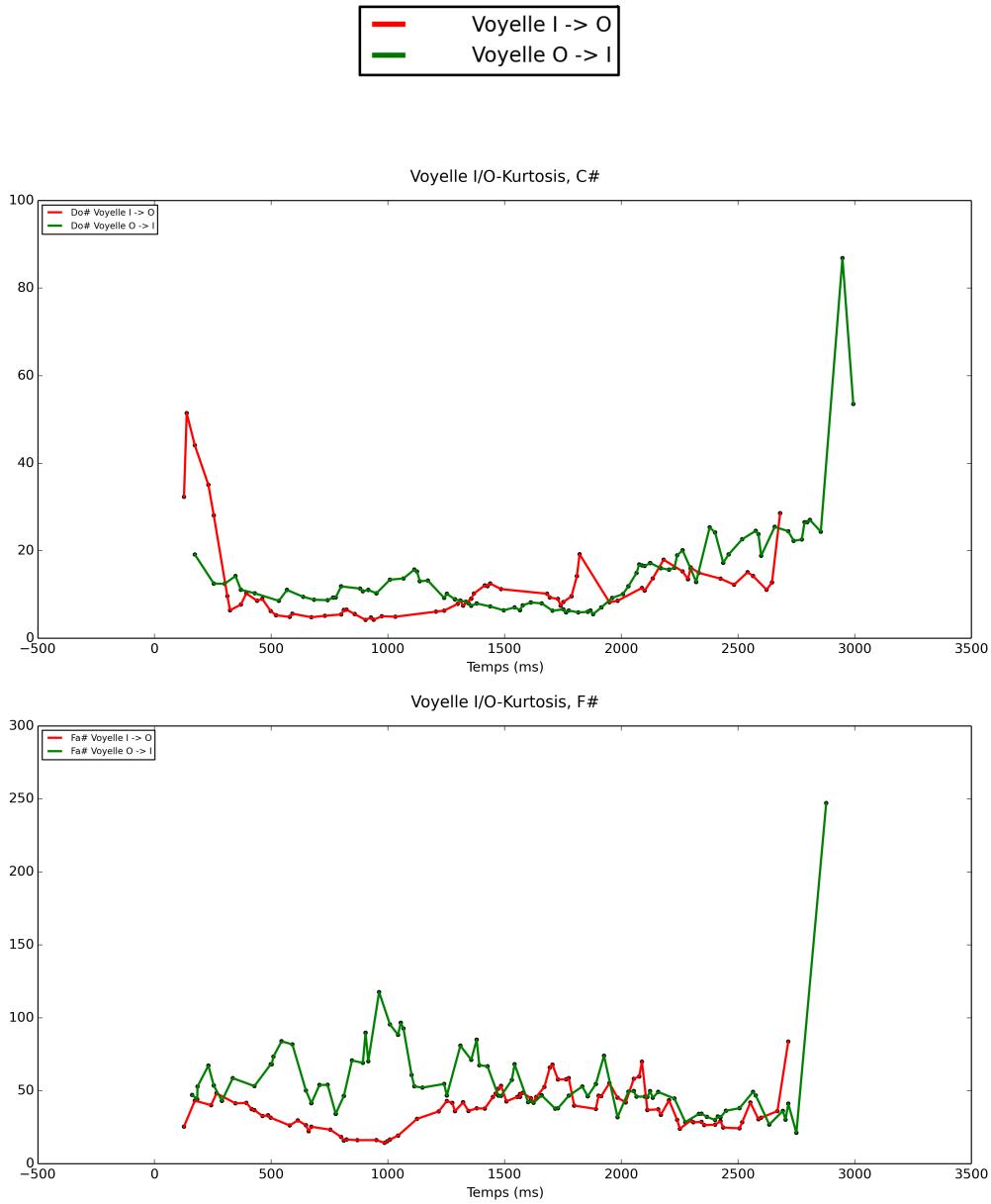


FIGURE 8.80 – Transition de voyelles - Aplatissement (kurtosis) – Le suivi des valeurs liées à l’aplatissement spectral pour deux types de transition de voyelles (entre [i] et [o], en rouge, et entre [o] et [i], en vert) est représenté ici. Sur le graphique du haut, les transitions ont été jouées avec le doigté du *Do#* grave ; sur le graphique du bas, elles ont été jouées avec le doigté du *Fa#* grave. **Retour au texte : cliquez [ici](#).**

6 Discussion

6.1 Remarques sur les descripteurs

Ces expériences nous ont permis d'arriver à plusieurs constats généraux. D'abord, le vibrato de la flûte se caractérise plus par des changements spectraux que par les modulations de fréquence et d'amplitude qui définissent habituellement le vibrato instrumental. Ces changements se reflètent dans le comportement du centroïde, du roulement et de l'étalement spectral, descripteurs qui sont tous les trois corrélés à la brillance perçue du son.

Le chevrottement se caractérise par des variations plus importantes de l'aplatissement, de l'asymétrie et de la pente du spectre, ainsi que du niveau d'intensité, alors que le vibrato abdominal-thoracique se définit davantage par une variation du centroïde et du roulement spectral. Avec le *fluttertongue*, on constate aussi des mouvements conjoints dans les courbes du centroïde, du roulement et de l'étalement de spectral, mais aussi beaucoup d'activité dans le comportement des autres descripteurs.

Par ailleurs, le changement de brillance du son est fortement corrélé aux changements dynamiques : les deux tendent même à se confondre. Le changement de voyelle se rapproche également d'un changement de brillance, le [i] étant plus brillant que le [o].

Le flux spectral a tendance à afficher des valeurs plus élevées lors des transitoires d'attaque et d'extinction, et à augmenter avec la turbulence du souffle, comme lorsque la vitesse de l'air insufflé dans le tuyau de la flûte augmente lors du *jet whistle*. Enfin, l'aplatissement et l'asymétrie spectraux se comportent souvent de manière contraire au trio centroïde/roulement/étalement spectral et marquent aussi bien les moments transitoires entre deux états sonores (comme le son standard et le son éolien, par exemple). Ils tendent à augmenter quand le bruit de souffle est plus important.

6.2 Limites de l'expérience

Ces expériences ont été réalisées sur un ordinateur MacBook Pro d'un certain âge²¹ dont les capacités ne sont pas exactement équivalentes à celles d'un ordinateur de l'année. En conséquence,

²¹MacBook Pro 13 pouces, mi-2010 ; processeur 2,4 GHz Intel Core 2 Duo ; Mémoire 16 Go 1067 MHz.

il se peut que le temps de calcul ait été plus élevé que sur un ordinateur plus puissant, et que l'équipement disponible ait atteint ses limites lors du calcul en temps réel des valeurs de descripteurs. Il est également possible que le choix des paramètres (fréquence d'échantillonnage, taille de fenêtre de la FFT, intervalle temporel de stockage des valeurs calculées en mémoire, etc.) puisse être optimisé afin d'augmenter l'efficacité du calcul des descripteurs, qui reste assez coûteux en termes de ressources informatiques. Toujours est-il que la latence liée au temps de calcul a souvent dépassé 20 millisecondes, la limite temporelle qui la rend perceptible aux sens humains (Cf. section 2.2.1, sur les définitions du temps réel).

De plus, l'échantillon testé n'est pas représentatif de l'ensemble des possibilités sonores de la flûte, et une partie de la variance a malheureusement été éliminée de l'expérience à cause de la méthodologie suivie : une seule personne jouant sur un seul instrument a été enregistrée, et une seule instance de chaque changement de timbre a été sélectionnée afin d'être analysée et comparée aux exemples des autres techniques. Aussi, certains de ces changements de timbres pourraient très bien ne jamais avoir été intégrés dans le langage instrumental d'une personne donnée ; cette personne pourrait toutefois présenter des stratégies différentes pour arriver à une manipulation adroite des timbres qu'elle produit. En fait, toutes ces variations timbrales s'inscrivent parmi les possibilités qui s'offrent aux flûtistes, tout comme l'émulation des timbres d'autres instruments. En résumé, comme chaque instrumentiste arrive avec son bagage personnel, sa technique et sa sonorité propres ainsi que ses opinions esthétiques, il sera important de répéter l'expérience avec d'autres participants afin de valider les résultats obtenus.

En outre, certains sons analysés, comme les *jet whistle*, étaient passablement courts, et les limites de la vitesse de calcul n'ont pas permis d'arriver à des courbes dont la résolution était suffisante afin d'observer de manière détaillée le comportement des différents descripteurs. Il serait également intéressant de refaire cette série d'expériences en direct avec l'objet externe `ircamdescriptor~`, afin de voir si l'implémentation du calcul des descripteurs y est mieux optimisée, ou encore de refaire le suivi de ces descripteurs en différé dans l'environnement MATLAB grâce à un échantillonnage préalable des fichiers sonores à analyser, et de comparer les résultats obtenus.

6.3 Remarques sur le suivi des `zsa.descriptors`

Si l'on désire effectuer un suivi de la fréquence fondamentale, il serait intéressant de tester d'autres objets Max (en supposant que l'on travaille dans cet environnement) effectuant ce calcul que `fzero~` et `fiddle~`. Le premier, on l'a vu, ne détecte pas efficacement la hauteur dans le cas de la flûte, et le second, même s'il fonctionne bien, présente l'inconvénient de retourner les hauteurs qu'il détecte en valeurs MIDI (que l'on convertit en Hertz par la suite). Cela convient si l'on utilise la hauteur des notes pour déclencher des événements, mais limite considérablement l'utilisation de ce descripteur dans un contexte microtonal ou extratonal.

Étant donné les valeurs très élevées retournées par des objets comme `zsa.flux~`, `zsa.kurtosis~` et `zsa.skewness~` (entre autres) en présence de transitoires d'attaques et d'extinction, on pourra penser à implémenter un limiteur ou à appliquer des filtres sur les résultats du calcul de ces descripteurs si l'on désire en détecter les variations fines. Par contre, si la détection d'attaques revêt une certaine importance dans le contexte musical, on pourra conserver ces valeurs extrêmes et les utiliser pour des déclenchements, par exemple. Aussi, une normalisation des données préalable au mappage pourrait faciliter celui-ci et éviter les mauvaises surprises.

Finalement, on aura aussi constaté que le comportement de certaines combinaisons de descripteurs présente une redondance. En effet, le centroïde, le roulement et l'étalement spectraux (par exemple) évoluent presque toujours conjointement. Si l'on considère les limites potentielles causées par le temps de calcul nécessaire à la détection en direct des descripteurs, il serait avisé de ne choisir que quelques paramètres à détecter. Dans le cas de la flûte traversière, on pourrait par exemple choisir le centroïde, l'aplatissement spectral, le flux spectral et la pente globale du spectre : ils évoluent tous de manière indépendante, et permettent de détecter la présence d'états transitoires, les changements de brillance ainsi que d'avoir une bonne idée du rapport bruit/énergie totale.

7 Conclusion

En situation de jeu musical, il est rare que les sons produits soient statiques : c'est plutôt leur dynamisme qui est garant de la conduite efficace du discours musical.

Les expériences réalisées dans ce chapitre ont permis tout particulièrement d'explorer ce *son en mouvement*, dans toute sa complexité. De plus, les courbes résultant du suivi des descripteurs ont pu nous renseigner sur les divers comportements de ce son évoluant temporellement.

En plus de fournir des informations supplémentaires sur des sons dynamiques et sur la teneur des changements de timbre qui les caractérisent, les descripteurs de timbre suivis en direct laissent la possibilité de transformer tous ces paramètres formels du son en paramètres expressifs. On a vu que les possibilités d'applications créatives étaient nombreuses : déclenchement de processus, contrôles de paramètres en musique mixte et mappages audiovisuels, entre autres.

Cela dit, lors du choix d'un descripteur pour un mappage, plusieurs éléments seront à considérer. D'abord, en ce qui a trait au timbre instrumental comme tel, on devra faire attention au registre choisi et au mode de production sonore. Ensuite, on devra vérifier s'il y a présence de modulations sur le son, et s'enquérir de la technique utilisée. Aussi, il faudra vérifier la présence plus ou moins accentuée de transitoires (attaques, articulations, extinctions), qui ont une influence directe sur certains descripteurs dont le flux spectral. Enfin, on devra effectuer ses choix de mappage en considérant les différentes combinaisons sonores utilisées ainsi que la complexité du *patch* ou du dispositif qui effectuera la détection et le suivi des descripteurs, et qui générera les processus à contrôler.

L'utilisation du suivi de descripteurs du timbre en création musicale et artistique mériterait une investigation plus poussée. En effet, elle entraîne des changements dans la manière d'articuler les variations de timbre et les paramètres des traitements acoustiques ou audiovisuels que le suivi permettra d'effectuer. Parallèlement aux découvertes scientifiques, c'est l'expérimentation en situation de jeu qui permettra aux musiciens s'intéressant à ces techniques de trouver les meilleurs gestes et combinaisons pouvant être intégrés à leur langage artistique.

Pistes de réflexion et apports du chapitre

- Pistes pour l'intégration du suivi en temps réel de descripteurs audio aux langages compositionnels et à la création artistique, de manière générale.
- Possibilité de développer des outils interactifs pour les instrumentistes qui désirent apprendre à contrôler les descripteurs audio à partir des paramètres de leur jeu.
- Meilleure compréhension de la nature de plusieurs techniques de jeu, des archétypes sonores et des états transitoires.

Chapitre 9

Conclusion

Sommaire

1	Retour sur l'interrogation de base	441
2	Retour sur les sujets abordés	442
3	Réflexion sur l'interdisciplinarité	444
4	Différentes pistes d'exploration	445

1 Retour sur l'interrogation de base

L'interrogation à l'origine de cette démarche se résume en quelques mots, par la question suivante : comment peut-on décrire le timbre de la flûte traversière ? Et, par extension, est-ce que la description non équivoque d'un timbre idéal est possible, est-ce que le secret et les subtilités d'une sonorité flexible et diversifiée peuvent être dévoilés ?

En y pensant, on se rend vite compte que la notion même de timbre est et reste floue. Elle reste difficile à définir même après avoir passé des années à étudier la question. Quant à celle du timbre parfaitement décrit, elle relève de l'utopie, tant les divergences d'opinion sont parfois importantes. Cela vient peut-être du fait que le vocabulaire et les moyens dont nous disposons pour décrire le timbre sont encore relativement pauvres.

Mais si on développe le sens de l'écoute, et même différents types d'écoute, si on réfléchit à la question, que l'on explore plusieurs approches et que l'on développe peu à peu sa sensibilité et

ses nuances, non seulement on arrive à mieux savoir ce que l'on veut, mais il est aussi possible d'effectuer une transmission efficace des savoirs développés.

2 Retour sur les sujets abordés

Le but de cette thèse était d'explorer le timbre de la flûte traversière à partir de différentes approches se regroupant en trois axes principaux : celui de l'expertise instrumentale, celui de la perception, et celui de l'informatique musicale.

Au chapitre 2, nous avons survolé l'histoire organologique de l'instrument, le développement de l'esthétique sonore liée à la pratique de la flûte de Boehm – basée sur l'homogénéité du timbre sur l'ensemble du registre, et sur l'adaptation de la pédagogie instrumentale à cet idéal timbral. Il s'agissait donc de comprendre de quelle manière s'était constituée l'identité de la flûte traversière moderne. Nous nous sommes aussi intéressés à la notion de technique étendue et à son évolution au cours de l'histoire de l'instrument, en avançant quelques pistes pour expliquer la marginalité relative de ces techniques de jeu moins pratiquées.

Au chapitre 3, le fonctionnement acoustique de la flûte a été expliqué ; puis l'ensemble des modes de jeu et des techniques étendues a été présenté et plusieurs outils de classification ont été proposés afin d'y mettre un peu d'ordre. Le premier élément exploité a été la typologie du geste de Cadoz et Wanderley, ce qui nous a permis de définir trois types de techniques étendues (gestes d'excitation sonore, gestes de sélection et gestes de modification paramétrique). Puis le système de Hornbostel et Sachs a été exploré afin de proposer une classification des modes d'excitation sonore, et la notion d'articulateur, calquée sur la linguistique, a permis de traiter les instances de timbres comme des phonèmes modifiables.

Au chapitre 4, nous nous sommes intéressés à différentes manières d'écouter, puis à la caractérisation du timbre grâce aux outils d'analyse perceptives de Pierre Schaeffer (typo-morphologie) et de Denis Smalley (spectromorphologie), d'abord conçus pour les musiques acousmatiques (et électroacoustiques). Le premier propose une écoute qui occulte complètement la source sonore, l'écoute réduite. En s'y exerçant, on peut arriver à considérer les sons de flûte (entre autres) comme des objets sonores, qu'on peut classifier (typologie), puis décrire (morphologie). Quant à Denis Smalley, il propose un type d'écoute élargi par rapport à celui de Schaeffer, qui permet et

même encourage le lien au geste, réel ou fictif, contenu dans le son. Les outils développés par Smalley nous sont utiles pour deux raisons : ses outils de description spectrale et morphologique permettent de décrire des nuances très fines, et sa conception de la morphologie sonore nous permet de considérer les sons comme des entités dynamiques, qui évoluent.

Au chapitre 5, nous avons fait une revue des expériences en psychoacoustique sur la perception du timbre. Nous sommes encore loin d'une étude consacrée à une variété de timbres issus d'un seul instrument, mais ces études ont pu nous renseigner sur le rôle important que jouaient certains descripteurs acoustiques du timbre comme le temps d'attaque (ou son logarithme), le centroïde spectral et, dans une moindre mesure, le flux et l'irrégularité spectraux. Le chapitre proposait également un survol des différentes approches computationnelles d'analyse du timbre, en passant par les sciences de la *Music Information Retrieval* et l'acoustique musicale, puis se terminait sur la définition d'une série de descripteurs acoustiques du timbre utiles pour le genre d'analyse auquel on se prête lors de l'étude du timbre instrumental.

Les expériences sur le timbre de la flûte traversière proposées dans les trois derniers chapitres de cette thèse s'inscrivent dans cet esprit de collaboration entre acousticien.ne.s, psychoacousticien.ne.s, informaticien.ne.s et musicien.ne.s.

Au chapitre 6, l'objectif était d'effectuer une analyse par composantes principales sur une série de 34 descripteurs du timbre, sur plusieurs séries de sons, afin de déterminer l'importance relative de ces descripteurs dans le processus de distinction entre les différents timbres, et de dégager des tendances entre les différents groupes de sons analysés. On a pu, par exemple, montrer l'existence d'un lien entre la brillance et la nuance dynamique, et des corrélations entre plusieurs descripteurs. Le rôle important des descripteurs spectraux pour les sons longs, et des descripteurs temporels pour les sons courts est à souligner.

Au chapitre 7, l'exploration s'est poursuivie en allant vers des aspects particuliers du timbre instrumental. L'objectif était de valider certains résultats obtenus dans les expériences du chapitre cinq, ainsi que de préciser le rôle de descripteurs particuliers dans certains contextes. Notamment, dans le cas des sons courts et des techniques percussives, le rôle du flux spectral a été confirmé. Le lien entre brillance et nuance dynamique a été précisé, et on a pu constater que les descripteurs relatifs à la répartition spectrale de l'énergie donnent de bons indices permettant de différencier

les modes de production sonore.

Enfin, au chapitre 8, l'objectif était double. D'abord, de voir dans quelle mesure la détection de descripteurs acoustiques en temps réel pouvait s'appliquer servir à une meilleure compréhension des techniques de modulation comme le vibrato et le *fluttermouth*, ainsi qu'à une observation des changements acoustiques qui se produisent lors de différentes transformations timbrales, comme le changement de brillance, le changement de voyelle, le *pitch bend*, le changement de voyelle durant un *jet whistle* et enfin, le changement du degré de bruit présent dans le son. Mais aussi, on a vu que la détection en temps réel de descripteurs du timbre peut s'inscrire dans une démarche créatrice où les paramètres formels du son sont transformés en paramètres expressifs grâce à une stratégie de mappage efficace. Dans cette optique, il a été intéressant d'observer le comportement des descripteurs lors des variations timbrales et d'identifier ceux dont le suivi en temps réel permet d'obtenir des flux de données intéressants : le centroïde, l'aplatissement spectral, le flux spectral et la pente globale du spectre.

3 Réflexion sur l'interdisciplinarité

Le timbre instrumental est certainement un concept, un phénomène et un outil auquel s'intéressent plusieurs types de chercheur.se.s : en premier lieu les instrumentistes, mais aussi les musicien.ne.s de tout acabit, y compris ceux qui écrivent ou qui improvisent ; les spécialistes en acoustique, en psychoacoustique, en psychologie de la musique, en informatique et en *Music Information Retrieval* ; enfin, il peut faire partie de la réalité de toute personne un tant soit peu sensible aux sons musicaux.

Cela dit, cette thèse est une première tentative de concilier plusieurs visions et fonctionnements différents. Chaque discipline vient avec son bagage et ses prémisses de base, ce qui donne parfois quelques erreurs de traduction lorsque l'on se consacre à un travail de nature multidisciplinaire. Un des buts de cette réflexion était de proposer des ponts entre les disciplines, d'attirer l'attention de certains types de personnes et de chercheur.se.s sur la réalité des autres, et de tenter de voir si un sens commun ne pourrait pas émerger de ce tout parfois chaotique.

Vouloir mener une recherche dont les résultats soient à la fois scientifiquement solides et valables d'un point de vue artistique comporte des défis importants. Il est nécessaire non

seulement de maîtriser plusieurs vocabulaires et concepts fondamentaux appartenant à des disciplines différentes, mais aussi de considérer l'objet d'étude lui-même comme une entité changeante, définie à chaque fois différemment selon les aspects de cet objet que l'on souhaite observer et étudier. Cette thèse considère ainsi le timbre comme un objet à plusieurs facettes, qui peut être circonscrit de plusieurs manières distinctes, à partir de paramètres fondamentalement différents.

Ensuite, ma position en tant qu'instrumentiste devenue chercheuse m'amène à adopter une position hybride, se situant à mi-chemin entre des préoccupations artistiques et d'autres scientifiques. Au début du projet de recherche, j'ai sincèrement cru à une approche scientifique classique, en me disant que j'allais concevoir le travail de manière rigoureuse et que je n'aurais pas de difficulté à le faire puisque je n'étais impliquée dans aucun projet de recherche-création. Toutefois, j'ai constaté que je ne pouvais m'empêcher de penser le timbre sonore comme une musicienne, donc comme un médium de création et d'expression. Mon projet de recherche, en son cœur même, a donc été fortement influencé par mon vécu d'artiste. On le remarque, par exemple, au large nombre d'échantillons sonores analysés dans les expériences ayant recours aux descripteurs acoustiques du timbre, destiné à représenter un ensemble d'instances de timbres aussi complet que possible, ou encore dans le souci de situer le timbre dans une vision artistique, donc en tant que matériau utilisable dans une démarche compositionnelle et analysable grâce à des outils perceptifs.

Cette démarche en est donc une de compromis, et ne prétend pas couvrir tout ce qui concerne le timbre de la flûte traversière. Plusieurs aspects soulevés dans cette thèse mériteraient d'être davantage circonscrits et investigués. Par contre, l'avantage de cette manière d'approcher les choses est de fournir un grand nombre et une grande variété de pistes de réflexion, et aussi de pouvoir servir d'interface entre les disciplines.

4 Différentes pistes d'exploration

La combinaison de toutes ces approches au cœur de notre démarche, fort heureusement, nous fournit toute une panoplie d'outils pouvant servir à catégoriser le timbre. On peut en décrire les propriétés physiques et acoustiques ainsi que les dimensions perceptives. On peut le définir en tant

qu'objet, qu'il soit fixe et abstrait, résultat d'une dépense d'énergie ou phénomène morphologique. On peut le rattacher à une technique de jeu précise, à un mode de production sonore et en décrire les inflexions subtiles grâce au jeu des articulateurs. Enfin, on peut le comparer à d'autres timbres instrumentaux, ou proposer des analogies avec d'autres sons, ou avec des phénomènes se produisant sur d'autres modalités sensorielles.

4.1 Retombées en recherche fondamentale

Au terme de cette thèse, on peut affirmer que les résultats de recherche qui y sont présentés permettront une meilleure compréhension des caractéristiques timbrales intra-instrumentales de la flûte, notamment en termes de descripteurs acoustiques. À partir du portrait général qui a été dressé, on pourra sélectionner des groupes timbraux particuliers, en définir les limites et les propriétés, et les investiguer à partir d'un échantillon composé de sons enregistrés, par exemple, sur tout le registre de l'instrument, ou par un grand nombre d'instrumentistes. Ainsi, l'étude d'aspects particuliers du timbre pourra déboucher sur une recherche systématique en acoustique, en modélisation sonore ou encore en psychoacoustique.

On aura par ailleurs la possibilité de rattacher certaines de ces caractéristiques à des paramètres gestuels précis, dans le cadre d'une étude se concentrant sur ces aspects de la production sonore. On pensera, par exemple, aux effets des changements de forme de l'embouchure, aux facteurs affectant la vélocité du souffle, ou à l'étude de la position des résonateurs vocaux lors de la production de *jet whistles* sifflés, un mode de jeu qui a été relativement peu étudié.

De plus, cette recherche constitue un travail préalable à l'élaboration de méthodes d'analyse pour les musiques instrumentales basées sur le timbre, ainsi qu'à l'étude de la perception du timbre intra-instrumental en lien avec l'utilisation de traitements audionumériques en musique mixte. Une connaissance approfondie et interdisciplinaire du timbre pourra également être utile au moment d'étudier l'influence de l'acoustique des salles sur le jeu des instrumentistes. Enfin, la diversité des techniques et modes de jeu présentée ici ouvre la voie à de nombreuses possibilités de modélisation sonore, et constitue une contribution importante aux connaissances en orchestration.

4.2 Retombées en recherche-création

Du point de vue compositionnel, on pourra considérer l'ensemble des techniques et modes de jeu présentés à la fois comme une riche palette de couleurs, comme des indications sur des gestes sonores, mais aussi comme la proposition de pistes de réflexion quant à leur intégration dans un langage compositionnel. Ceci vaut également pour l'improvisation musicale, où la maîtrise d'un large répertoire de gestes sonores est à l'avantage de la personne qui s'exprime à travers le son instrumental.

Le chapitre 8 (Suivi de changements continus du timbre en temps réel) a ouvert la porte à l'utilisation du suivi en direct de descripteurs acoustiques du timbre pour l'utilisation de celui-ci comme contrôleur dans un contexte de musique mixte ou d'œuvre transdisciplinaire, puisque ce genre de moyen permet le contrôle d'à peu près tous les types de paramètres numériques à partir de flux de données. Toutefois, il s'agit également d'un travail préalable au développement d'outils pour le développement du contrôle gestuel fin de paramètres acoustiques, qui seront utiles à la fois aux instrumentistes désireux.ses de diversifier et de raffiner leur répertoire timbral et aux créateurs.trices sonores travaillant avec l'intégration de traitements audionumériques en temps réel dans leur démarche.

Par ailleurs, il me paraît important de souligner le caractère créatif du rôle des instrumentistes-interprètes dans le cadre de processus de création ou de recréation d'œuvres. Dans le premier cas, l'instrumentiste partage son idiome musical personnel, effectue un travail visant à comprendre et à expliciter les balises timbrales de la personne qui compose (que ce soit lui.elle-même ou quelqu'un d'autre), et suggère ensuite des timbres et des gestes musicaux qui pourront être intégrés à l'écriture de la pièce musicale. Dans le second cas, celui de la recréation d'œuvres, il y a en plus de tous les travaux préalables d'analyse et de familiarisation avec les œuvres, un travail important d'appropriation du geste de production sonore. Celui-ci devient alors éminemment personnel et est à l'origine, par conséquent, d'un geste créateur permettant de concrétiser la production sonore nécessaire à la transmission de l'essence de l'œuvre.

Enfin, une étude approfondie et détaillée du timbre permettra non seulement de fournir des outils descriptifs aux instrumentistes et compositeurs.trices pour l'optimisation de leur travail collaboratif en contexte de création, mais leur permettra aussi de développer des moyens de

travailler leur écoute musicale, de cartographier leur conception du timbre sonore et d'en raffiner et d'en diversifier les nuances.

4.3 Combiner recherche et pratique instrumentale

Pour terminer, il me semblait approprié de mentionner que cette recherche aura eu des impacts considérables sur ma pratique musicale et instrumentale. À vrai dire, le processus s'est effectué sur plusieurs années, à partir de mes premiers cours d'acoustique musicale (2010-2011), à travers ma découverte de la musique mixte et des musiques électroacoustiques, et finalement au long de toutes les investigations qui sont à la base de cette thèse.

Avant tout cela, comme instrumentiste, j'avais l'impression que ma « sonorité » était un bloc monolithique, qui changeait selon les circonstances et selon mon niveau d'énergie. À présent, je suis capable d'en distinguer les composants : les paramètres du geste, les phénomènes physiques à la base de la production sonore, et enfin, la réponse acoustique de la salle. La première conséquence de cette meilleure compréhension de mon jeu instrumental a été de m'enlever une certaine pression due à l'impression d'un manque de contrôle, et de me donner les clés pour réagir à une grande variété de situations susceptibles de se présenter en contexte de jeu. Je constate l'existence de liens de cause à effet entre les aspects techniques du geste instrumental, l'environnement dans lequel l'action sonore se produit, et les paramètres du timbre.

Une autre conséquence liée à l'acquisition de ces connaissances et de cette conscience du timbre s'est manifestée lors d'expériences en musique de chambre et à l'orchestre. Avant d'effectuer cette recherche, je ne pouvais nommer clairement que la hauteur, la durée et l'intensité des sons. Si la plupart des ajustements à l'instrument se font de manière presque instinctive et semi-consciente, dans le non-verbal et dans la gestuelle, le fait de pouvoir décrire verbalement une grande variété de paramètres timbraux de manière détaillée m'a permis de décupler mes possibilités de modulation sonore et d'adaptation au jeu des autres musicien.ne.s. Un phénomène en apparence simple, qui constitue un bon exemple de ce que j'avance ici, est l'accord. Lorsque deux instrumentistes s'appliquent à jouer juste ensemble, il ne suffit pas qu'ils.elles ajustent la fréquence fondamentale perçue de leurs deux sonorités. Ce ne sont pas deux notes qu'ils.elles combinent : ce sont deux spectres sonores, dans toute leur complexité. Autrement dit, pour

parvenir à une bonne fusion sonore, il faut non seulement ajuster la hauteur perçue du son, mais aussi le plus grand nombre de partiels possible afin de limiter la rugosité produite par la combinaison des deux timbres, les paramètres de l'attaque et les modulations internes du son.

Finalement, en ce qui me concerne, l'investigation à caractère scientifique s'accompagne généralement de son équivalent artistique. La recherche sur le timbre, particulièrement celui de mon instrument, s'est traduit en un processus d'émancipation musicale. De simple interprète, d'exécutante, je me suis donné l'autorisation d'adopter un rôle plus créatif, puisque je suis de ceux et celles qui manient le son, la manifestation physique de l'expression musicale. Puis, au fur et à mesure que je découvrais la nature complexe du timbre, j'en suis venue à prendre conscience des possibilités infinies de création qu'il recelait. Ainsi, ma démarche en tant que musicienne se rapproche de plus en plus de la composition musicale, que ce soit à travers l'improvisation ou l'écriture d'œuvres. Mon idéal sonore s'est raffiné, parce qu'il faut concevoir pour pouvoir créer, et le timbre n'est plus seulement un paramètre multidimensionnel, mais un monde de textures, de couleurs, de morphologies et de micro-possibilités. Évidemment, cela n'affecte pas que ma perception du timbre de la flûte traversière, mais vaut aussi pour l'ensemble des timbres instrumentaux et des sons de la vie courante.

Je ne suis sans doute pas parvenue à faire tous les liens possibles entre les connaissances étayées dans cette thèse et dans les documents qui ont servi à en construire la réflexion. Mais si j'ai pu réussir à inspirer ou à effectuer ce qu'un seul branchement menant à la naissance d'une idée dans l'esprit d'une des personnes qui liront cette thèse, j'aurai accompli ma mission.

Bibliographie

- ALLAIN-DUPRÉ, Philippe. 2004. « Les grands facteurs de flûtes traversières avant Boehm ». *Traversières Magazine* 80. p. 36–38. (Cf. p. 14, 15).
- ALTÈS, Joseph-Henry. 1880. *Méthode complète de flûte*. 1re édition. T. 2 et 3. Paris : Millereau. 429 p. (Cf. p. 22, 30, 31).
- . 1956. *Célèbre méthode complète de flûte*. 3e édition. T. 2. Paris : Alphonse Leduc. 374 p. (Cf. p. 23, 32, 34, 44, 45, 75).
- AMERICAN STANDARDS ASSOCIATION. 1960. *American Standard Acoustical Terminology*. New York : American Standards Association. (Cf. p. 139).
- ARTAUD, Catherine, Pierre-Yves et Dale. 1993. « Aspects of the flute in the twentieth century ». *Contemporary Music Review* 8 (2). p. 131–216. (Cf. p. 40).
- ARTAUD, Pierre-Yves, et Gérard GEAY. 1995. *Flûtes au présent*. The french flutists propose. Paris : Billaudot. 131 p. (Cf. p. 51, 55, 56, 72, 74, 76, 78, 81, 84).
- BARTHET, Mathieu. 2008. « *De l'interprète à l'auditeur : une analyse acoustique et perceptive du timbre musical* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Aix-Marseille II. 269 p. (Cf. p. 149, 157).
- BARTOLOZZI, Bruno. 1969. *Neue Klänge für Holzbläser*. 2^e éd. Mainz : B. Schott' Söhne. 81 p. (Cf. p. 37, 38, 45, 46, 51, 75, 79).
- BENADE, Arthur. 2000a. « Les bois ». Dans *Sons et musique*, sous la dir. de Vern Olivier KNUDSEN, Johan SUNDBERG et Gabriel WEINREICH. Pour la science. Paris : Diffusion Belin. p. 50–59. (Cf. p. 94).
- . 2000b. « Les cuivres ». Dans *Sons et musique*, sous la dir. de Vern Olivier KNUDSEN, Johan SUNDBERG et Gabriel WEINREICH. Pour la science. Paris : Diffusion Belin. p. 76–88. (Cf. p. 96).
- BERNAYS, Michel. 2013. « *The expression and production of piano timbre : gestural control and technique, perception and verbalisation in the context of piano performance and practice* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université de Montréal. 317 p. (Cf. p. 173).
- BLANC, François. 2009. « *Production de son par couplage écoulement/résonateur : Étude des paramètres de facture des flûtes par expérimentations et simulations numériques d'écoulements* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Pierre et Marie Curie - Paris VI. 181 p. (Cf. p. 63, 64).

- BOEHM, Theobald. 1871. *Die Flöte und das Flötenspiel*. Munich : Joseph Aibl. 29 pages et annexes. (Cf. p. 18, 19, 20, 25, 28, 29).
- BREAUULT, Marie-Hélène. 2013. « *Du rôle de l'interprète-chercheur en création et re-création musicale : théories, modèles et réalisations d'après le cas de Kathinkas Gesang (1983-1984) de Karlheinz Stockhausen et La Machi (2007-2011) d'Analia Llugdar* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université de Montréal. 471 p. (Cf. p. 67, 68).
- BULLOCK, Jamie. 2007. « LibXtract : A lightweight library for audio feature extraction ». Dans *Actes de la 2007 International Computer Music Conference*. Londres, Royaume-Uni. Repéré le 14 mai 2018 à l'URL, <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.470.6831&rep=rep1&type=pdf>. (Cf. p. 153).
- CACLIN, Anne, et al. 2005. « Acoustic correlates of timbre space dimensions : a confirmatory study using synthetic tones ». *Journal of the Acoustical Society of America* 118 (1). p. 471–482. (Cf. p. 144, 145, 147, 148, 255).
- CADOZ, Claude, et Marcelo M. WANDERLEY. 2000. « Gesture - Music ». Dans *Trends in gestural control of music*, sous la dir. de Marcelo M. WANDERLEY et Marc BATTIER. Paris : Ircam - Centre Pompidou. p. 71–94. (Cf. p. 55, 87, 88).
- CARPENTIER, Grégoire. 2008. « *Approche computationnelle de l'orchestration musicale* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Paris VI. 247 p. (Cf. p. 150).
- CASTELLENGO, Michèle, et Danielle DUBOIS. 2007. « Timbre ou timbres ? Propriété du signal, de l'instrument ou construction(s) cognitive(s) ? » *Les Cahiers de la Société québécoise de recherche en musique* 9 (1-2). p. 25–38. (Cf. p. 141).
- CASTELLENGO, Michèle, Benoît FABRE et Catherine DALE. 1994. « The contemporary transverse flute and the shakuhachi : convergences ». *Contemporary Music Review* 8 (2). p. 217–237. (Cf. p. 58, 95).
- CESARI, Matteo. 2015. « *Déchiffrer les horloges : l'interprétation du temps dans L'orologio di Bergson de Salvatore Sciarrino et Carceri d'Invenzione IIb de Brian Ferneyhough* ». Thèse de doctorat, Conservatoire national supérieur de musique et de danse de Paris/Université Paris-Sorbonne. 326 p. (Cf. p. 83).
- CHÂTEAU-LYON, Pierre-Louis d'Aquin de. 2005. *Siècle littéraire de Louis XV ou Lettres sur les hommes célèbres*. Réimpression de l'édition de 1754. Brooklyn : AMS Press. 288 p. (Cf. p. 13).
- COCKOS INCORPORATED. (s.d.) [site web]. « Reaper – Digital Audio Workstation ». <https://www.hairersoft.com/pro.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 juin 2018. (Cf. p. 169).
- COLTMAN, John W. 1979. « Acoustical analysis of the Boehm flute ». *Journal of the Acoustical Society of America* 65 (2). p. 499–506. (Cf. p. 57).
- CRAWFORD, Frank S. 1974. « Singing corrugated pipes ». *American Journal of Physics* 48. p. 278–288. (Cf. p. 97, 98).

- DE CHEVEIGNÉ, Alain, et Hideki KAWAHARA. 2002. « YIN, a fundamental frequency estimator for speech and music ». *Journal of the Acoustical Society of America* 111 (4). p. 1917–1930. (Cf. p. 325).
- DE LA CUADRA, Patricio. 2005. « *The sound of oscillating air jets : physics, modeling and simulation in flute-like instruments* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Stanford University. 165 p. (Cf. p. 63, 64).
- DE LUSSE, Charles. 1761. *L'art de la flûte traversière*. Réimpression en fac-similé de l'édition de 1760, non modifiée, avec introduction et notes de Greta Moens-Haenen (1980). Buren : Frits Knuf. 38 p. (Cf. p. 42, 43, 44).
- DICK, Robert. 1986. *Tone development through extended techniques*. New York : Multiple Breath Music Company. 60 p. (Cf. p. 29, 40, 51, 67, 68).
- . 1987. *The other flute : a performance manual of contemporary techniques*. New York : Multiple Breath Music Company. 144 p. (Cf. p. 51, 56, 70, 71, 72, 76, 77, 79, 80, 82, 85).
- . 2012. « Acoustics : Real life, real time - Why the flutist and flute had to evolve ». *Leonardo Music Journal* 22. p. 15–16. (Cf. p. 41).
- DOUGHERTY, N.S., B.L. LIU et J.M. O'FARRELL. 1994. « Numerical simulation of the edge tone phenomenon (NASA Contractor Report 4581) ». <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19940029392.pdf>. Repéré en ligne le 26 septembre 2018, en format PDF. (Cf. p. 59).
- GABARON, Nicolas. 2005. « *L'enseignement de la flûte traversière, histoire de la constitution d'une discipline d'excellence en France* ». Mémoire (Diplôme d'État de professeur de musique), CEFEDEM Rhône-Alpes (Lyon). 32 p. (Cf. p. 24, 33, 39).
- GÄRTNER, Jochen. 1981. *The vibrato : with particular consideration given to the situation of the flutist : historical development, new physiological discoveries, and presentation of an integrated method of instruction*. Regensburg : G. Bosse Verlag. 172 p. (Cf. p. 73, 331).
- GREY, John M. 1975. « An exploration of musical timbre ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Stanford University. 143 p. (Cf. p. 139, 146, 255).
- . 1977. « Multidimensional perceptual scaling of musical timbres ». *Journal of the Acoustical Society of America* 61 (5). p. 1270–1277. (Cf. p. 146, 148, 255).
- GUILLAUME, Philippe. 2006. *Music and acoustics : from instrument to computer*. Hoboken : Wiley. 199 p. (Cf. p. 89).
- GÜMBEL, Martin. 1958. *Lern- und Spielbuch der Flöte*. Kassel : Bärenreiter. 122 p. (Cf. p. 26, 32, 34).
- . 1974. *Neue Spieltechniken in der Querflöte-Musik nach 1950*. Kassel : Bärenreiter. 24 p. (Cf. p. 26, 51, 55, 56, 73, 74, 75, 77).
- HAIRER, Martin (HairerSoft). (s.d.) [site web]. « Amadeus Pro ». <https://www.hairersoft.com/pro.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 juin 2018. (Cf. p. 169).

- HAJDA, John M., et al. 2004. « Methodological issues in timbre research ». Dans *Perception and cognition of music*, sous la dir. d'Irene DELIEGE et John A. SLOBODA. Londres, Royaume-Uni : Psychology Press. p. 253–306. (Cf. p. 140, 141, 145, 146, 147, 316).
- HATTWICK, Ian, et al. 2014. « Unsounding Objects : Audio feature extraction for the control of sound synthesis ». Dans *Actes de la 14th International Conference on New Interfaces for Musical Expression (NIME)*. Londres, Royaume-Uni. Repéré le 21 mai 2018 à l'URL, https://www.researchgate.net/publication/282977028_Unsounding_Objects_Audio_Feature_Extraction_for_the_Control_of_Sound_Synthesis. (Cf. p. 328).
- HEISS, John. 1966. « For the Flute : A List of Double-Stops, Triple-Stops, Quadruple-Stops, and Shakes ». *Perspectives of New Music* 5 (1). p. 139–141. (Cf. p. 45).
- . 1968. « Some Multiple-Sonorities for Flute, Oboe, Clarinet, and Bassoon ». *Perspectives of New Music* 7 (1). p. 136–142. (Cf. p. 45).
- . 1972. « The flute : new sounds ». *Perspectives of New Music* 10 (2). p. 153–158. (Cf. p. 47, 48, 49, 50, 51, 78, 81, 82).
- HORNBOSTEL, Erich M. von, et Curt SACHS. 1914. « Systematik der Musikinstrumente. Ein Versuch ». *Zeitschrift für Ethnologie* 46 (4-5). p. 553–590. (Cf. p. 55, 87, 90, 91).
- HOTTETERRE, Jacques. 1982. *Principes de la flûte traversière, ou flûte d'Allemagne, de la flûte à bec, ou flûte douce et du haut-bois : divisez par traitez*. Réimpression de l'édition d'Amsterdam (1728). Kassel : Bärenreiter. 44 p. (Cf. p. 13).
- HOWELL, Thomas. 1974. *The avant-garde flute : A handbook for composers and flutists*. Berkeley : University of California Press. 290 p. (Cf. p. 47, 48, 49, 50, 69, 70, 71, 75, 79, 80, 81, 85).
- HUNTER, J. D. 2007. « Matplotlib : A 2D graphics environment ». *Computing In Science & Engineering* 9 (3) : 90–95. doi :[10.1109/MCSE.2007.55](https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55). (Cf. p. 176, 240, 338).
- INGARDEN, Roman. 1989. *Qu'est-ce qu'une œuvre musicale ?* Paris : Christian Bourgois Éditeur. 215 p. (Cf. p. 110).
- IRCAM. 2003 [site web]. « Projet Cuidado (Équipe Analyse-Synthèse/Modélisation et transformation du son) ». <http://anasynth.ircam.fr/home/english/projects/cuidado>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 29 mai 2018. (Cf. p. 151).
- . (s.d.) [site web]. « MSP Externals (Ircam) - yin ». http://imtr.ircam.fr/imtr/Max/MSP_externals. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 21 mai 2018. (Cf. p. 325).
- IRCAM, Forumnet. (s.d.) [site web]. « Max Sound Box, Forumnet IRCAM ». <http://forumnet.ircam.fr/fr/produit/max-sound-box/>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 21 mai 2018. (Cf. p. 326).
- JEHAN, Tristan. 2001 [site web]. « Tristan Jehan's Max/MSP stuff ». <http://web.media.mit.edu/~tristan/maxmsp.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 21 mai 2018. (Cf. p. 325).

- KAZAZIS, Savvas, et al. 2017. « A performance evaluation of the Timbre Toolbox and the MIRToolbox on calibrated test sounds ». Dans *Actes du 2017 International Symposium on Musical Acoustics*. Montréal, Canada. p. 144–147. (Cf. p. 154, 175).
- KIRBY, Percival R. 1957. « Captain Gordon, the flute maker ». *Music & Letters* 38 (3). p. 250–259. (Cf. p. 18).
- KRANTZ, Larry. (2007) [site web]. « Robert Dick – Composer and Flutist ». <http://www.larrykrantz.com/rdick.htm>. Date de la dernière mise à jour : 6 septembre 2007 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 40).
- KRIMPHOFF, Jochen, Stephen MCADAMS et Suzanne WINSBERG. 1991. « Caractérisation du timbre des sons complexes. II. Analyses acoustiques et quantification psychophysique ». *Journal de Physique (Paris)* IV. p. 625–628. (Cf. p. 146, 164, 165).
- KRUMHANSL, Carol L. 1989. « Why is musical timbre so hard to understand ? » Dans *Structure and perception of electroacoustic sound and music*, sous la dir. de S. NIELZÉN et O. OLSSON. Amsterdam : Excerpta Medica. p. 43–53. (Cf. p. 142, 143, 145, 146, 255).
- LARTILLOT, Olivier, et Petri TOIVAINEN. 2007. « A MATLAB toolbox for musical feature extraction from audio ». Dans *Actes de la 10th International Conference on Digital Audio Effects (DAFx-07)*. Bordeaux, France. Repéré le 6 janvier 2018 à l'URL, <http://dafx.labri.fr/main/papers/p237.pdf>. (Cf. p. 153).
- LE ROY, René. 1966. *Traité de la flûte : historique, technique et pédagogique*. Paris : Éditions musicales transatlantiques. 103 p. (Cf. p. 24, 45, 75).
- LEVINE, Carin, et Christina MITROPOULOS-BOTT. 2002. *The techniques of flute playing - Die Spieltechnik der Flöte*. Kassel : Bärenreiter. 143 p. (Cf. p. 51, 54, 55, 56, 69, 71, 72, 74, 76, 77, 81, 83).
- LORIEUX, Grégoire. 2012. « Brakhage Series II [Notice technique] ». Repéré le 21 mai 2018 à l'URL, http://gregoirelorieux.net/gregoire_lorieux_compositeur/Works/Media/pdf/docs/LORIEUX-BS2-doc.pdf. (Cf. p. 328).
- MALT, Mikhail, et Marta GENTILUCCI. 2015. « Real time vowel tremolo detection using low level audio descriptors ». https://www.researchgate.net/publication/284578987_Real_Time_Vowel_Tremolo_Detection_Using_Low_Level_Audio_Descriptors. Repéré en ligne le 21 mai 2018 (format PDF). (Cf. p. 326).
- MALT, Mikhail, et Emmanuel JOURDAN. 2015 [site web]. « Zsa.descriptors ». <http://www.e--j.com/index.php/what-is-zsa-descriptors/>. Dernière mise à jour : décembre 2015 ; repéré le 25 juin 2018. (Cf. p. 329).
- . 2008. « Zsa.Descriptors : a library for real-time descriptors analysis ». Dans *Actes de la 5th Sound and Music Computing conference (SMC)*. Berlin. Repéré le 29 mai 2016 à l'URL, http://www.smc-conference.net/smc08/images/proceedings/session7_number3_paper45.pdf. (Cf. p. 325, 326).

- . 2009. « Real-time uses of low level sound descriptors as event detection functions using the Max/MSP Zsa. descriptors library ». Dans *Actes du Brazilian Symposium on Computer Music (SBCM)*. Recife, Brésil. Repéré le 29 mai 2016 à l'URL, <http://compmus.ime.usp.br/sbcm/2009/proceedings-SBCM2009.pdf>. (Cf. p. 327).
- MAROZEAU, Jérémie. 2004. « *L'effet de la fréquence fondamentale sur le timbre* ». Thèse de doctorat (Ph.D.), Université Pierre et Marie Curie – Paris IV. 171 p. (Cf. p. 70, 139, 143, 144, 145, 146).
- MATHWORKS. (s.d.) [site web]. « MATLAB ». <https://fr.mathworks.com/products/matlab.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 juin 2018. (Cf. p. 174).
- « Max Object Database – yin ». (s.d.) [site web]. http://maxobjects.com/?v=objects&id_objet=3391. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 21 mai 2018. (Cf. p. 325).
- MCADAMS, Stephen. 1999. « Perspectives on the contribution of timbre to musical structure ». *Computer Music Journal* 23 (3). p. 85–102. (Cf. p. 144, 145).
- . 2013. « Musical timbre perception ». Dans *The psychology of music (Third edition)*, sous la dir. de Diana DEUTSCH. Londres : Elsevier. p. 36–68. (Cf. p. 140, 242, 315, 316).
- MCADAMS, Stephen, et Jean-Christophe CUNIBILE. 1992. « Perception of timbral analogies ». *Philosophical Transactions of the Royal Society* 336. p. 1–14. (Cf. p. 161).
- MCADAMS, Stephen, et Bruno GIORDANO. 2010. « La psychoacoustique dévoile le potentiel musical du timbre ». Dans *Actes du 10ème Congrès Français d'Acoustique*. Lyon, France. Repéré le 7 janvier 2018 à l'URL, http://www.brunolgiordano.net/SMC_BLG_2010_CFA10.pdf. (Cf. p. 140, 141, 144, 148).
- . 2013. « The perception of musical timbre ». Dans *The Oxford handbook on music psychology*, sous la dir. de S. HALLAM, Ian CROSS et M. THAUT. Oxford : Oxford University Press. p. 72–80. (Cf. p. 141).
- MCADAMS, Stephen, et al. 1995. « Perceptual scaling of synthesized musical timbres : common dimensions, specificities, and latent subject classes ». *Psychological Research* 58 (3). p. 177–192. (Cf. p. 142, 143, 144, 145, 147, 148, 255).
- MCENNIS, Daniel, et al. 2005. « jAudio : A feature extraction library ». Dans *Actes de la 6th International Conference on Music Information Retrieval (ISMIR 2005)*. Londres, Royaume-Uni. Repéré le 18 mai 2018 à l'URL, https://www.researchgate.net/profile/Ichiro_Fujinaga/publication/220723083_jAudio_An_Feature_Extraction_Library/links/09e415111170e09c40000000/jAudio-An-Feature-Extraction-Library.pdf?origin=publication_detail. (Cf. p. 152).
- MCGEE, Terry. (s.d.) [site web]. « A guide to the lengths of flutes ». <http://www.mcgee-flutes.com/flutelengths.htm>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 septembre 2018. (Cf. p. 57).

- MERSENNE, Marin. 1637. « Des instrumens à vent (Partie II, Livre V) ». Dans *Harmonie Universelle*. Première édition. Paris : Pierre Ballard. p. 225–308. Disponible en ligne à l'URL, http://petrucci.mus.auth.gr/imglinks/usimg/c/c1/IMSLP77451-PMLP156089-MersenneM_HarmUniv_Pt2_08.pdf. (Cf. p. 11, 12, 42).
- MEYER, Jürgen. 2009. « Tonal characteristics of musical instruments ». Dans *Acoustics and the performance of music*. Collection Musique / Passé / Présent. New York : Springer. p. 45–128. (Cf. p. 66, 75, 99, 204, 330).
- MOFFAT, David, David RONAN et Joshua D. REISS. 2015. « An evaluation of audio feature extraction toolboxes ». Dans *Actes de la 18th Conference on Digital Audio Effects (DAFx-15)*. Trondheim, Norvège. Repéré le 14 mai 2018 à l'URL, https://www.ntnu.edu/documents/1001201110/1266017954/DAFx-15_submission_43_v2.pdf / 06508f48-9272-41c8-9381-7639a0240770. (Cf. p. 149, 150, 152, 153).
- MOYSE, Marcel. 1932. *24 Petites Études Mélodiques*. Paris : Alphonse Leduc. 17 p. (Cf. p. 24).
- . 1934. *De la sonorité : art et technique*. Paris : Alphonse Leduc. 27 p. (Cf. p. 24, 32).
- . 1974. *Comment j'ai pu maintenir ma forme*. Édité par Nikolaus Delius. Mainz : Schott. 80 p. (Cf. p. 31, 32).
- « Norme "MPEG-7 - ISO/IEC 15938" ». (s.d.) [site web]. <http://mpeg7.org/audio-descriptors/>. Dernière mise à jour : 2017 ; repéré le 19 mai 2018. (Cf. p. 151).
- OFFERMANS, Wil. 1992. *For the contemporary flutist : Twelve studies for the flute with explanations in the supplement*. Frankfurt : Zimmermann. 68 p. (Cf. p. 41, 67, 80).
- PALACIO-QUINTIN, Cléo. 2012. « « Composition interactive » : du geste instrumental au contrôle de l'électronique dans *Synesthesia 4 : Chlorophylle* ». *Circuit : musiques contemporaines* 22 (1). p. 25–40. (Cf. p. 88).
- PEETERS, Geoffroy. 2004. « A large set of audio features for sound description (similarity and classification) in the CUIDADO project ». *CUIDADO 1st project report*. p. 1–25. (Cf. p. 150, 152, 155, 157, 158, 160).
- PEETERS, Geoffroy, et al. 2011. « The TimbreToolbox : extracting audio descriptors from musical signals ». *Journal of the Acoustical Society of America* 130 (5). p. 2902–2916. (Cf. p. 151, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 174).
- PIJPER, Rogier de. (s.d.) [site web]. « Flute Colors ». <https://www.flutecolors.com>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 22 octobre 2018. (Cf. p. 54).
- POTTIER, Laurent. 2005. « Strategies for the control of microsound synthesis within the "GMU" Project ». Dans *Actes du Third International Symposium on Computer Music Modeling and Retrieval*, sous la dir. de Richard KRONLAND-MARTINET et Thierry VOINIER. Pise, Italie. Repéré le 11 décembre 2015 à l'URL. (Cf. p. 326).
- POWELL, Ardal. 2002. *The flute*. New Haven : Yale University Press. 347 p. (Cf. p. 12, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 29, 33, 330).
- QUANTZ, Johann Joachim. 1752. *Versuch einer Anweisung, die Flöte traversière zu spielen*. Réimpression de l'édition de Berlin (2000). Kassel : Bärenreiter. 424 p. (Cf. p. 14, 28, 31).

- RISSET, Jean-Claude. 2004. « Timbre ». Dans *Musiques : Une encyclopédie pour le XXIe siècle. Les savoirs musicaux, vol. II*, sous la dir. de Jean-Jacques NATIEZ. Arles : Actes Sud. p. 134–161. (Cf. p. 140, 141, 142).
- ROY, Stéphane. 2004. *L'analyse des musiques électroacoustiques : modèles et propositions*. Paris : Harmattan. 590 p. (Cf. p. 112, 128).
- SCHAEFFER, Pierre. 1966. *Traité des objets musicaux. Essai interdisciplines*. Paris : Éditions du Seuil. 712 p. (Cf. p. 113, 126, 131).
- SCHMITZ, Hans-Peter. 1955. *Flötenlehre*. Kassel : Bärenreiter. 237 p. (2 volumes). (Cf. p. 25, 31, 32).
- SEEGER, Charles. 1958. « Prescriptive and Descriptive Music-Writing ». *The Musical Quarterly* 44 (2). p. 184–195. (Cf. p. 111).
- SIEDENBURG, Kai, Ichiro FUJINAGA et Stephen MCADAMS. 2016. « A comparison of approaches to timbre descriptors in music information retrieval and music psychology ». *Journal of New Music Research* 45 (1). p. 27–41. (Cf. p. 149, 150, 151).
- SMALLEY, Denis. 1997. « Spectromorphology : explaining sound-shapes ». *Organised Sound* 2 (2). p. 107–126. (Cf. p. 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 133).
- . 2009. « Klang, Morphologien, Spektren : Spektromorphologie in der Instrumentalmusik ». Dans *Klangperspektiven*, sous la dir. de Lukas HASELBÖCK. Hofheim : Wolke Verlag. p. 45–71. (Cf. p. 125).
- SORAGHAN, Sean, et al. 2018. « A new timbre visualization technique based on semantic descriptors ». *Computer Music Journal* 42 (1). p. 23–36. (Cf. p. 329).
- STEVENS, S.S. 1934. « The attributes of tones ». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 20 (7). p. 457–459. (Cf. p. 116).
- TAFFANEL, Paul, et Philippe GAUBERT. 1923. *Méthode complète de flûte*. Paris : Alphonse Leduc. 217 p. (Cf. p. 22, 23, 24, 27, 34).
- TOFF, Nancy. 1986. *The development of the modern flute (seconde édition)*. Chicago : University of Illinois Press. 268 p. (Cf. p. 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 44, 56).
- . 2012. *The flute book : a complete guide for students and performers (troisième édition)*. Toronto : Oxford University Press. 538 p. (Cf. p. 73).
- TORPEY, Peter Alexander. 2013. « *Media Scores. A framework for composing the modern-day Gesamtkunstwerk* ». Thèse de doctorat (Ph. D.), Massachusetts Institute of Technology. 194 p. (Cf. p. 323, 324, 328).
- TRAUBE, Caroline. 2004. « *An interdisciplinary study of the timbre of the classical guitar* ». Thèse de doctorat (Ph. D., Music Technology), McGill University (Montréal). 218 p. (Cf. p. 173).
- VALADE, Pierre-André. 1990. *Flûte et créations : une approche de la flûte contemporaine basée sur des œuvres écrites spécialement pour cet ouvrage par 15 compositeurs représentant diverses esthétiques musicales actuelles*. Paris : Billaudot. 70 p. (Cf. p. 72, 76, 80, 81, 84, 85).

VERFAILLE, Vincent. 2003. « *Effets audionumériques adaptatifs : théorie, mise en œuvre et usage en création musicale numérique* ». Thèse de doctorat (Ph. D.), Université Aix-Marseille II. 326 p. (Cf. p. 324).

WIKIPÉDIA. 2017 [site web](a). « Cepstre ». <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cepstre>. Dernière mise à jour : 20 avril 2017 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 151).

— . 2017 [site web](b). « Consonne roulée uvulaire voisée ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Consonne_roul%C3%A9e_uvulaire_vois%C3%A9e. Dernière mise à jour : 1er décembre 2017 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 75).

— . 2018 [site web](a). « Consonne roulée alvéolaire voisée ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Consonne_roul%C3%A9e_alv%C3%A9olaire_vois%C3%A9e. Dernière mise à jour : 15 avril 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 75).

— . 2018 [site web](b). « Flutter-tonguing ». <https://en.wikipedia.org/wiki/Flutter-tonguing>. Dernière mise à jour : 2 octobre 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 75).

— . 2018 [site web](c). « Hornbostel-Sachs ». <https://en.wikipedia.org/wiki/Hornbostel%E2%80%93Sachs>. Dernière mise à jour : 11 septembre 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 92).

— . 2018 [site web](d). « Liste des aérophones dans le système Hornbostel-Sachs ». https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_a%C3%A9rophones_dans_le_syst%C3%A8me_Hornbostel-Sachs. Dernière mise à jour : 5 juin 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 91).

— . 2018 [site web](e). « MPEG-7 ». <https://en.wikipedia.org/wiki/MPEG-7>. Dernière mise à jour : 18 octobre 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 151).

— . 2018 [site web](f). « Partition (musique) ». [https://fr.wikipedia.org/wiki/Partition_\(musique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Partition_(musique)). Dernière mise à jour : 15 août 2018 ; repéré le 24 octobre 2018. (Cf. p. 111).

WILSON, Rick. (s.d.) [site web]. « Old Flutes ». <http://www.oldflutes.com/articles/meyer.htm>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 juin 2018. (Cf. p. 20).

WOLFE, Joe. (s.d.) [site web](a). « Brass instrument (lip reed) acoustics : an introduction ». <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/brassacoustics.html#pedal>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 septembre 2018. (Cf. p. 96).

— . (s.d.) [site web](b). « Flute acoustics ». <http://newt.phys.unsw.edu.au/music/flute/>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 septembre 2018. (Cf. p. 62, 63).

— . (s.d.) [site web](c). « How do woodwind instruments work ? » <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/woodwind.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 septembre 2018. (Cf. p. 59).

— . (s.d.) [site web](d). « What is acoustic impedance and why is it so important ? » <http://newt.phys.unsw.edu.au/jw/z.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 26 septembre 2018. (Cf. p. 61).

- WOLFE, Joe, et al. 2001. « Acoustic impedance spectra of classical and modern flutes ». *Journal of Sound and Vibration* 243 (1). p. 127–144. (Cf. p. 57, 58, 62, 94).
- WYE, Trevor. 1999. *Practice books for the flute*. 2^e éd. Londres : Novello. 200 p. (Cf. p. 26, 27, 30, 32, 33, 34, 173, 174).
- . 2000. *Practice books for the flute (Volume 6 - Advanced Practice)*. 3^e éd. Londres : Novello. 35 p. (Cf. p. 27).
- ZIEGLER, Matthias. 2010 [site web]. « Biographie von Matthias Ziegler ». <http://www.flutepage.de/deutsch/composer/person.php?id=497>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 25 mai 2016. En date du 26 juin 2018, le site était en construction. (Cf. p. 86).
- . (s.d.) [site web]. « Soundworlds ». <http://www.matthias-ziegler.ch/english/klangwelten/index.html>. Date de la dernière mise à jour inconnue ; repéré le 27 mai 2016. En date du 26 juin 2018, le site était en construction. (Cf. p. 54, 72, 80, 81, 84, 85).
- . 2010 [vidéo YouTube]. « Matusiflute ». <https://www.youtube.com/watch?v=jQuJBeSjpXg>. Repéré le 26 juin 2018. (Cf. p. 86).

Annexe A

Je fournis dans cette annexe une description de mon parcours en tant que flûtiste, étant donné que la technique instrumentale, l'esthétique sonore et les habitudes de jeu sont grandement influencées, voire déterminées par nos expériences musicales et par l'enseignement que nous avons reçu. On trouvera une liste de mes principaux enseignants (incluant ceux dont j'ai fréquenté les classes de maître plusieurs années de suite) avec ce que je considère être leurs principaux legs, ainsi qu'un résumé de mes expériences musicales.

Principaux enseignants

Danielle Barro (1993-1998) – Chambly (Qc), Canada

- Bases de la technique instrumentale
- Aspects kinesthésiques de la sonorité

Carolyn Christie (1998-2001) – Montréal (Qc), Canada

- Exactitude et souci du détail
- Approche orchestrale de la flûte
- Appartenance à l'école anglo-américaine de flûte

Heather Howes (2001-2004) – Montréal (Qc), Canada

- Vocabulaire et expression timbraux variés
- Prise de risques en vue d'une meilleure expressivité

Marie-Andrée Benny (2004-2006) – Montréal (Qc), Canada

- Développement de la virtuosité
- Méthode de travail en vue de l'acquisition d'une bonne technique
- Expansion des possibilités expressives de l'instrument

Robert Aitken (2005-2006) – Classes de maître

- Apports de l'acoustique pour une meilleure compréhension de l'instrument et du geste de production sonore
- Intégration du corps dans son ensemble dans le jeu instrumental
- Approche créative du jeu instrumental

Robert Langevin (2004-2006) – Classes de maître

- Utilisation des nuances de timbre pour amplifier les changements dynamiques
- Conscience et occupation de l'espace de jeu
- Approche pragmatique et détendue de la technique instrumentale

Jean-Claude Gérard (2006-2007) – Stuttgart, Allemagne

- Précision et exactitude technique
- Efficacité
- Appartenance à l'école française/parisienne de la flûte

Mirjam Nastasi (2007-2009) – Freiburg, Allemagne

- Enrichissement de la palette timbrale, emprunts aux autres instruments
- Responsabilisation en tant qu'interprète, prise de positions esthétiques

Karl Kaiser (2007-2009) – Freiburg, Allemagne

- Spécialité en instruments historiques (traverso baroque, flûte classique)
- Prise de conscience du contexte historique et de l'esthétique sonore qui l'accompagne
- Adaptabilité au changement et capacité d'exploiter les propriétés d'un instrument donné

Expériences musicales déterminantes

Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle présente quelques unes des œuvres interprétées et des expériences artistiques qui ont contribué à façonner ma conception de la musique, mon approche du timbre de la flûte et ma façon d'écouter. Malgré l'apparent anglicisme, le mot « performance » est utilisé dans le contexte de pièces interprétées en soliste plutôt que les termes « interprétation » et « exécution », afin de refléter ma conception d'un rôle plus actif de l'instrumentiste en situation de concert.

- Performance d'*Ausone (version C)*, de Bruce Mather, avec l'Ensemble Musique Avenir (direction Véronique Lacroix ; Montréal, 2001).
- Performance de *Lamento (A la muerte de Raul Lavista)* pour flûte basse, de Mario Lavista (Montréal, 2004).
- *Sacre du Printemps* d'Igor Stravinsky avec un orchestre conjoint formé d'étudiants du Conservatoire de musique de Montréal et de la University of Toronto (2005).
- Performance du *Koncert for Flojte og Orkester* de Carl Nielsen avec l'orchestre du Conservatoire de musique de Montréal (2005).
- *For Samuel Beckett*, de Morton Feldman, avec le KammerEnsemble Stuttgart (Stuttgart/Pforzheim, 2006).

- *Lauf*, d'Annesley Black, Hochschule für Musik Freiburg (2008).
- Performance du *Concerto en mi mineur pour flûte à bec et traverso* de Georg Philipp Telemann sur instruments d'époque, avec Sophie Geiger (Freiburg, 2009).
- *Quatuor de flûtes en ré majeur* d'Anton Reicha sur instruments d'époque, avec Delphine Roche, Aya Komatsu et Eva Frick (Freiburg, 2009).
- Électronique *live* pour le récital de fin doctorat de Geneviève Deraspe (flûte) à l'Université de Montréal. Œuvres : *Traces VI (Multiplicidad)* de Martin Matalon, *Dialog / No Dialog* de Pierre Jodlowsky et *Jupiter* de Philippe Manoury (2012).
- Séminaire « Composer et interpréter la musique mixte », donné par Pierre Michaud à la Faculté de musique de l'Université de Montréal (2013).
- Électronique *live* pour le récital de fin maîtrise de Jérémy Chignec (flûte) à l'Université de Montréal. Œuvre : *NoaNoa*, de Kaija Saariaho (2014).
- Impuls Academy Graz – Cours de maître avec Eva Furrer (flûte) et performance *Trans-luscent Spaces* avec Klaus Lang (2015).
- Enregistrements avec Pierre-Luc Lecours en vue de la composition de la pièce acousmatique *Éclats | Blanc* (2015).
- Laboratoire de musique contemporaine de Montréal (LMCML 2015).
- Festival d'improvisation expérimentale *Improcon* (Desinić, Croatie, 2017).

Annexe B

Cette annexe contient une liste des exemples sonores fournis avec la thèse, par chapitre et par section. Les fichiers, en format .wav, sont disponibles dans l'archive compressée qui accompagne le fichier PDF de la thèse.

Chapitre 4 : Le timbre de la flûte traversière et l'analyse musicale perceptive

L'ensemble de ces fichiers se trouvent dans le répertoire Chapitre4-AnalysePerceptive.

Classes de grain (Schaeffer)

(Cf. section [3.3.3](#))

- **Grain de résonance :** Delisle_Julie_2018_1-Schaeffer_GrainResonance.wav
- **Grain de frottement :** Delisle_Julie_2018_2-Schaeffer_GrainFrottement.wav
- **Grain d'itération :** Delisle_Julie_2018_3-Schaeffer_GrainIteration.wav

Allure et types d'entretien (Schaeffer)

(Cf. section [3.3.3](#))

- **Entretien mécanique :** Delisle_Julie_2018_4-Schaeffer_EntretienMecanique.wav
- **Entretien vivant :** Delisle_Julie_2018_5-Schaeffer_EntretienVivant.wav
- **Entretien naturel :** Delisle_Julie_2018_6-Schaeffer_EntretienNaturel.wav

Archétypes sonores (Smalley)

(Cf. section [4.4](#))

- **Attaque seule :** Delisle_Julie_2018_7-Smalley_AttaqueSeule.wav
- **Attaque résonance :** Delisle_Julie_2018_8-Smalley_AttaqueResonance.wav
- **Entretien gradué :** Delisle_Julie_2018_9-Smalley_EntretienGradue.wav

Types de mouvements (Smalley)

(Cf. section [4.6](#))

- **Mouvement unidirectionnel :** Delisle_Julie_2018_10-Smalley_MouvementUnidirectionnel.wav
- **Mouvement réciproque :** Delisle_Julie_2018_11-Smalley_MouvementReciproque.wav
- **Mouvement cyclique :** Delisle_Julie_2018_12_Smalley_MouvementCyclique.wav

Chapitre 6 : Espaces de timbres acoustiques de la flûte traversière

Chapitre 7 : Aspects particuliers du timbre de la flûte traversière

L'ensemble de ces fichiers se trouvent dans le répertoire Chapitre6-Chapitre7_Groupes, et se rapportent aux groupes de sons décrits aux sections [2.2](#) du chapitre 6 et [2.1](#) du chapitre 7.

Dossier Groupe1_LongsStandard

Exemples sonores pour les sons à mode de production sonore standard et à excitation continue (longs), avec les nuances de timbre *brillant* et *rond* ainsi que les nuances dynamiques *piano* et *forte*.

- Delisle_Julie_2018_1-Brillant-forte.wav
- Delisle_Julie_2018_2-Brillant-piano.wav
- Delisle_Julie_2018_3-Rond-forte.wav
- Delisle_Julie_2018_4-Rond-piano.wav

Dossier Groupe2_CourtsStandard

Exemples sonores pour les sons à mode de production sonore standard et à excitation instantanée (courts), avec cinq différents types d'attaque et les nuances dynamiques *piano* et *forte*.

- Delisle_Julie_2018_1-Court-forte-D.wav
- Delisle_Julie_2018_2-Court-forte-F.wav
- Delisle_Julie_2018_3-Court-forte-K.wav
- Delisle_Julie_2018_4-Court-forte-P.wav
- Delisle_Julie_2018_5-Court-forte-T.wav
- Delisle_Julie_2018_6-Court-piano-D.wav
- Delisle_Julie_2018_7-Court-piano-F.wav
- Delisle_Julie_2018_8-Court-piano-K.wav
- Delisle_Julie_2018_9-Court-piano-P.wav
- Delisle_Julie_2018_10-Court-piano-T.wav

Dossier Groupe4_ExcitationContinue

Exemples sonores pour les sons à excitation continue (longs), avec différents modes de production sonore.

- Delisle_Julie_2018_1-SonTrompette_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_2-Brillant-forte_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_3-Brillant-piano_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_4-Eolien-Voyelle_i-DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_5-Eolien-MachoireFermee_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_6-Eolien-Voyelle_o-DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_7-JetWhistleSiffle_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_8-Mixte_Standard-Eolien_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_9-MultiphoniqueOctave_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_10-Rond-forte_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_11-Rond-piano_DoDiese.wav

- Delisle_Julie_2018_12-Eolien-Voyelle_i-FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_13-Eolien-MachoireFermee_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_14-Eolien-Voyelle_o-FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_15-JetWhistleSiffle_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_16-Mixte_StandardEolien_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_17-MultiphoniqueOctave_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_18-Standard-FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_19-VoixUnisson_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_20-Standard_SiBemol-med.wav
- Delisle_Julie_2018_21-VoixOctave_SiBemol-med.wav

Dossier Groupe6_ExcitationInstantanee

Exemples sonores pour les sons à excitation instantanée (courts), avec différents modes de production sonore.

- Delisle_Julie_2018_1-Mixte_Standard-Eolien.wav
- Delisle_Julie_2018_2-Percussion-Cle.wav
- Delisle_Julie_2018_3-Pizzicato-Slap.wav
- Delisle_Julie_2018_4-Pizzicato-Consonne_T.wav
- Delisle_Julie_2018_5-Eolien-court.wav
- Delisle_Julie_2018_6-Standard-Court_forte.wav
- Delisle_Julie_2018_7-Standard-Court_piano.wav
- Delisle_Julie_2018_8-TongueRam-Expire.wav
- Delisle_Julie_2018_9-TongueRam-Inspire.wav
- Delisle_Julie_2018_10-TongueRam-AvecObstruction.wav

Dossier Groupe10_TechniquesPolyphoniquesEtModulation

Exemples sonores pour les techniques polyphoniques et de modulation (multiphonique à l'octave, *fluttermouth*, usage de la voix, etc.)

- Delisle_Julie_2018_1-Standard_Brillant-forte_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_2-MultiphoniqueOctave_DoDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_3-FluttermouthSeul_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_4-Fluttermouth-VoixOctave_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_5-Fluttermouth-VoixUnisson_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_6-Fluttermouth-VoixTritonInferieure_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_7-Fluttermouth-VoixTritonSuperieure_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_8-MultiphoniqueOctave-FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_9-Standard_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_10-VoixUnisson_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_11-VoixOctaveInferieure_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_12-VoixTritonInferieur_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_13-VoixTritonSuperieur_FaDiese.wav
- Delisle_Julie_2018_14-FluttermouthSeul_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_15-Fluttermouth-VoixOctaveInferieure_SiBemol.wav

- Delisle_Julie_2018_16-Fluttertongue-Voix2octavesEnDessous_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_17-Fluttertongue_VoixTritonPlusOctaveEnDessous_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_18-Fluttertongue-VoixTritonInferieur_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_19-Standard_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_20-Voix-OctaveInferieure_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_21-Voix-2OctavesEnDessous_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_22-Voix-TritonEtOctaveEnDessous_SiBemol.wav
- Delisle_Julie_2018_23-Voix_TritonInferieur_SiBemol.wav

Chapitre 8 : Suivi de changements continus du timbre en temps réel

L'ensemble de ces fichiers se trouvent dans le répertoire Chapitre8_ChangementsContinus, et se rapportent aux groupes de sons décrits à la section 3.

Dossier 1-VibratoEtChevrottement

Exemples sonores démontrant différents types de vibrato.

- Delisle_Julie_2018_FaDiese_ChevrottementLent.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_ChevrottementRapide.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_VibratoLentAmple.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_VibratoLentEtroit.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_VibratoRapideAmple.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_VibratoRapideEtroit.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_ChevrottementLent.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_ChevrottementRapide.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_VibratoLentAmple.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_VibratoLentEtroit.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_VibratoRapideAmple.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_VibratoRapideEtroit.wav

Dossier 2-Fluttertongue

Exemples sonores démontrant l'usage du *fluttertongue*.

- Delisle_Julie_2018_FaDiese_Fluttertongue.wav
- Delisle_Julie_2018_SiBemol_Fluttertongue.wav

Dossier 3-Brillant-Rond

Exemples sonores démontrant les transitions entre les nuances de timbre *brillant* et *rond*.

- Delisle_Julie_2018_DoDiese_BrillantRond_f.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_BrillantRond_p.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_RondBrillant_f.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_RondBrillant_p.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_BrillantRond_f.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_BrillantRond_p.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_RondBrillant_f.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_RondBrillant_p.wav

Dossier 4-Standard-Eolien

Exemples sonores démontrant les transitions entre sons standards et éoliens.

- Delisle_Julie_2018_DoDiese_Bruit-Son.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_Son-Bruit.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_Bruit-Son.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_Son-Bruit.wav

Dossier 5-Voyelles_o-i

Exemples sonores démontrant les transitions entre les voyelles [i] et [o].

- Delisle_Julie_2018_DoDiese_I-O.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_O-I.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_I-O.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_O-I.wav

Dossier 6-JetWhistles

Exemples sonores démontrant les transitions entre les voyelles [i] et [o] durant l'émission de *jet whistles*.

- Delisle_Julie_2018_DoDiese_JetWhistle_I-O.wav
- Delisle_Julie_2018_DoDiese_JetWhistle_O-I.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_JetWhistle_I-O.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_JetWhistle_O-I.wav

Dossier 7-Pitchbends

Exemples sonores de *pitch bends* couvrant et découvrant.

- Delisle_Julie_2018_FaDiese_Pitchbend_Couvrant_2.wav
- Delisle_Julie_2018_FaDiese_Pitchbend_Decouvrant_2.wav